



## **Rapport de stage**

Décodage Neuronal de l'Activité Motrice

Centre de recherche CERVO

### **Destinataire**

Département des stages - Direction de la Faculté des sciences et de génie

Date de remise : 5 septembre 2023

---

Ayoub Echchahed  
NI : 111274558

---

Christian Éthier – Chercheur

## Résumé

Ce rapport présente le travail effectué par Ayoub Echchahed dans le cadre de son stage de recherche gradué au centre de recherche CERVO durant la période estivale 2023. Au sein du groupe du Dr. Christian Éthier, le stagiaire a eu comme tâches le développement d'algorithmes et de modèles pouvant décoder de l'information motrice chez des rongeurs à partir d'enregistrements neuronaux réalisés dans leur cortex moteur primaire durant l'exécution d'une tâche. Le but de ce travail est de contribuer au développement d'interfaces cerveau-machine tout en utilisant des méthodes de décodage moderne tels que les réseaux de neurones profonds de type récurrents. Trois grands axes ont caractérisé ce projet: le traitement des données neuronales, le traitement des données cinématiques, et finalement l'entraînement de modèle pour le décodage neuronal. Les résultats obtenus démontrent que les expériences réalisées avec les outils développés durant le stage permettent effectivement le décodage neuronal de certains variables motrices avec une fiabilité acceptable, et cela malgré plusieurs contraintes expérimentales abordées dans le rapport. Ainsi, ces résultats obtenus au bout de quelques itérations cet été ouvrent la voie à plusieurs itérations intéressantes qui pourraient tester différentes manières d'améliorer la fiabilité du décodage, puis éventuellement de tester la capacité à généraliser pour différentes sessions, tâches, et sujets.

## Table des matières

Résumé .....	ii
Table des matières .....	iii
Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux .....	v
Remerciements .....	ii
1 Introduction .....	1
1.1 Présentation personnelle.....	1
1.2 Présentation de l'organisation .....	1
1.3 Présentation du stage et de son environnement.....	1
2 Responsabilités et tâches du stagiaire.....	2
2.1 Rôle et contribution du stagiaire.....	2
2.2 Objectifs, problématique, méthodologie/théorie .....	3
2.3 Description des tâches et des travaux effectués.....	4
2.4 Résultats / analyses et discussions.....	7
2.5 Comparaison avec les attentes du stagiaire .....	10
3 Développement et renforcement des compétences.....	11
3.1 Techniques.....	11
3.2 En ingénierie ou scientifiques .....	11
3.3 Communication .....	11
3.4 Réflexion sur la formation pratique et théorique reçue .....	12
3.5 Bilan des acquis.....	12
4 Conclusion .....	12
Références .....	14

## Liste des figures

Figure 1 : Stagiaire performant les 3 grands mandats du stage .....	2
Figure 2 : Plan des étapes nécessaires au décodage neuronale.....	4
Figure 3 : Schéma de la résolution temporelle R .....	5
Figure 4 : Variables motrices choisies pour le décodage .....	6
Figure 5 : Illustration de l'utilisation de l'outil DeepLabCut .....	7
Figure 6 : Exemple d'architecture LSTM .....	8
Figure 7 : Résultat des prédictions avec normalisation .....	9
Figure 8 : Résultat des prédictions avec standardisation.....	9

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Configuration de l'un des meilleurs décodeurs .....	9
---	---

## **Remerciements**

Je tiens à remercier le Dr. Christian Éthier et son groupe.

# **1 Introduction**

## **1.1 Présentation personnelle**

Dans le cadre du cours *IFT-6000 Stage en milieu professionnel* de la maîtrise en informatique à l'Université Laval, le stagiaire Ayoub Echchahed a réalisé son premier stage de recherche dans le domaine de l'intelligence artificielle appliqué aux interfaces cerveau-ordinateur. Cette occasion lui a notamment permis d'appliquer ses connaissances théoriques acquises après le suivi de 10 cours gradué en informatique au cours des années 2022-2023.

## **1.2 Présentation de l'organisation**

Le stage se déroula au sein du centre de recherche CERVO, là où se trouve le laboratoire du superviseur Dr. Éthier. Situé au 2301 Avenue D'Estimauville à Québec, ce centre de recherche est l'un des plus importants centres en neurosciences et en santé mentale au Canada, regroupant une soixantaine de chercheurs dirigeant des équipes de recherche totalisant plus de 400 personnes. L'une des missions du centre est la progression des connaissances sur les causes et le traitement des maladies neurologiques grâce au développement de nouvelles technologies pour comprendre le cerveau [1].

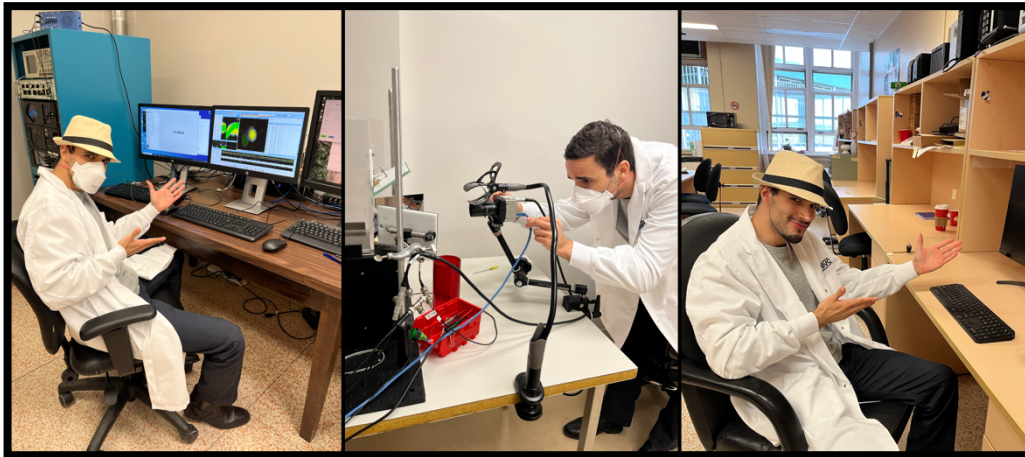
## **1.3 Présentation du stage et de son environnement**

Le stage s'est effectué du 15 mai 2023 au 25 août 2023 sous la supervision de Dr. Christian Éthier, un chercheur / professeur rattaché au centre de recherche CERVO et à la faculté de médecine de l'Université Laval. Ce stage fait d'ailleurs suite à une collaboration précédente entre Dr. Éthier et le stagiaire durant la session d'automne 2022, où le stagiaire a réalisé un projet de décodage neuronal dans le contexte du cours *GEL-7072 Bio-instrumentation et microsystèmes biomédicaux*. Le sujet principal du projet de recherche concerne la possibilité de pouvoir décoder de l'information motrice chez des rongeurs à partir d'enregistrements réalisés dans leur cortex moteur primaire durant l'exécution d'une tâche. Cela s'inscrit dans un contexte plus général touchant aux développements d'interfaces cerveau-ordinateur, un domaine ayant le potentiel de pouvoir rétablir des aspects clés tels que la communication ou la mobilité chez les personnes qui en ont perdu la capacité. Le superviseur Dr. Éthier en est d'ailleurs un expert, ayant publié plusieurs articles dans le domaine des interfaces cerveau-ordinateur et leurs applications [2]. Finalement, le stagiaire gradué de recherche a évolué au cours de son stage au sein d'un groupe de recherche d'environ 10 personnes, travaillant dans des environnements diversifiés tels que des bureaux et des laboratoires.

## 2 Responsabilités et tâches du stagiaire

### 2.1 Rôle et contribution du stagiaire

Les principaux rôles du stagiaire ont été le développement d'outils algorithmiques et de modèles pouvant décoder de l'information motrice à partir d'enregistrement neuronaux faits dans le cortex moteur primaire de rats performant des tâches spécifiques. Dans ce contexte-ci, le décodage d'information motrice signifie la capacité à prédire les mouvements de la patte avant d'un rat uniquement à partir de ses signaux cérébraux. Donc pour ce faire, le stagiaire a travaillé en collaboration avec une équipe d'étudiants au 1<sup>er</sup>, 2<sup>ème</sup>, et 3<sup>ème</sup> cycle afin de réaliser les expérimentations servant à collecter les données et produire les outils servant à créer des jeux de données servant à entrainer des modèles de décodages neuronaux.



- Figure 1: Photos du stagiaire performant des tâches reliées aux 3 grands mandats de son stage:  
à gauche le traitement des données neuronales, au centre le traitement de données  
cinématiques, et à droite l'entrainement de modèles.

## 2.2 Concepts Importants

- **Objectifs & Problématiques**

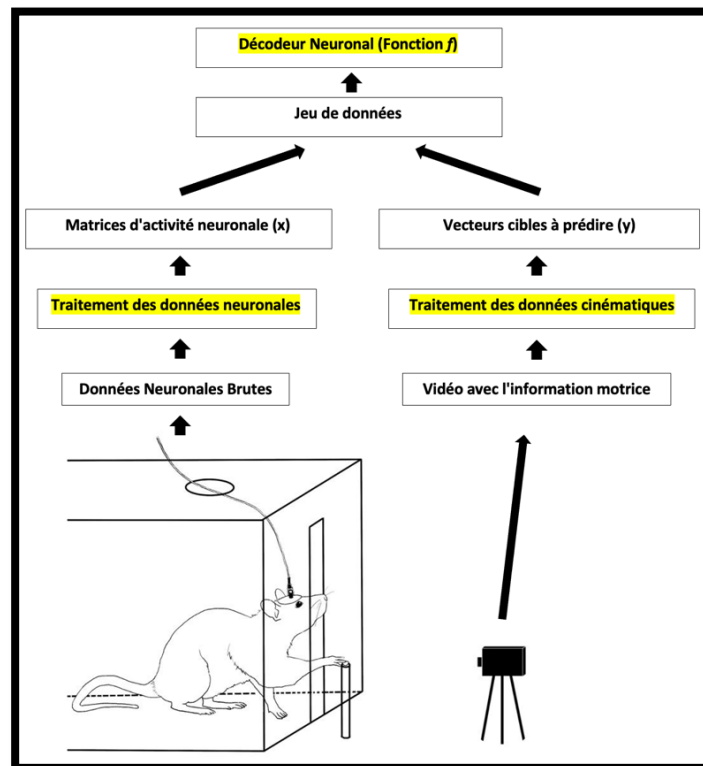
Les principaux **objectifs** de ce stage ont été le développement d'outils, d'algorithmes, et de modèles permettant le décodage d'informations motrices à partir d'enregistrements réalisés dans le cortex moteur primaire de rongeurs réalisant des tâches spécifiques. Quant aux **problématiques** reliées aux objectifs ci-dessus, celles-ci sont multiples. Par exemple, plusieurs contraintes pèsent sur la capacité à décoder de façon fiable de l'information à partir d'enregistrements cérébraux. En effet, des contraintes expérimentales tels que la dégradation des signaux ou le nombre d'électrodes fonctionnelles utilisées signifient qu'il est important de procéder à des collectes de données de façon itérative afin de s'assurer d'avoir des données de qualité servant par la suite à l'entraînement de modèles fiables. Il est par la suite question de problématiques reliées au décodage en lui-même. Par exemple, quels types de modèles utilisés pour le décodage? Combien de données sont nécessaires pour avoir des décodeurs qui généralisent bien à des nouvelles situations? Quelles méthodes d'entraînements et quels types de prétraitements de données devraient être utilisées? Bref, le but est de décoder le plus d'informations possibles tout en travailler sous plusieurs types de contraintes.

- **Théorie**

Le concept théorique clé de ce stage est le **décodage neuronal**, ce qui signifie la capacité à prédire de l'information à partir d'enregistrement neuronal. La nature des enregistrements correspond à l'activité des neurones sous forme de potentiels d'actions dans une certaine région du cerveau. Simplement, un potentiel d'action correspond à un changement rapide du potentiel électrique à la surface d'une cellule nerveuse, suivi d'un retour à la normale du potentiel électrique. En utilisant des microélectrodes pouvant enregistrer ses micro-signaux dans le cerveau, il est possible d'établir une fonction de prédiction, aussi appelée décodeur neuronal, entre l'activité dans plusieurs canaux d'enregistrements (variable  $x$ ) et une variable dite cible ( $y$ ). Dans le cas de décodage neuronal moteur, les variables qui nous intéressent sont souvent la dynamique des joints d'un corps en mouvement, aussi appelé cinématique. Ainsi, le décodeur cherchera à prédire des variables cinématiques à partir de l'activité neuronal, à condition d'avoir assez de données d'entraînement sous forme de paires (matrice de données neuronales, vecteur de cinématique). Souvent, l'activité neuronale pour un certain point de prédiction va être sous forme d'intervalle précédent ce point. Par exemple, si nous cherchons à prédire l'angle d'ouverture  $y$  de la patte avant d'un rat au temps  $t=5$ , nous irons chercher l'activité neuronale qui précèdent ce point de prédiction via une durée d'intervalle discrétionnaire. Si cette durée est 1 seconde, la matrice d'activité neuronale va couvrir le temps  $t=4$  à  $t=5$ .

- **Échéancier**

La **Phase 1** de l'échéancier (Mai-Juin) consistait en la phase de recherche, où un grand nombre de papiers scientifiques ont été analysés afin de se mettre à jour sur le domaine des interfaces cerveau-machine et les différents types de méthodes modernes utilisées pour traiter/décoder les signaux neuronaux venant du cortex moteur. La **Phase 2** de l'échéancier (Juin-Juillet) consistait en la phase de design et de test. Au cours de celle-ci, il a été question du design et des tests de différentes méthodes pour le traitement des données collectées lors d'expérimentations. L'utilisation de méthodes de qualité est très importante puisque celles-ci sont utilisées pour générer les jeux de données sur lesquels les modèles sont entraînés. La **Phase 3** de l'échéancier (Août) consistait en la phase de collection de données et de décodage de différentes variables motrices. Donc pendant qu'un rat performait une tâche de saisi de nourriture, les données neuronales brutes ainsi qu'une vidéo de la session ont été enregistrées, et cela à travers plusieurs sessions et plusieurs sujets. Par la suite, les données ont été traitées avec les outils développés précédemment afin de générer différents types de jeu de données qui ont servi à entraîner différents types de décodeurs. Puis, ces décodeurs ont été testés sur des données absentes durant l'entraînement afin d'évaluer l'efficacité des modèles de type réseaux de neurones profonds récurrents utilisés.



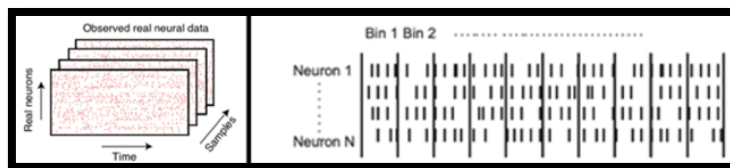
- Figure 2: Plan conceptuel des étapes nécessaires au décodage neuronal à partir des enregistrements bruts de données neuronales et vidéo. Surligné en jaune, nous avons les grands mandats du stage.

## 2.3 Description des tâches et des travaux effectués

### 2.3.1 Traitement des données neuronales

Le premier grand mandat consiste en l'étape du traitement des données neuronales, après que ceux-ci viennent d'être stockées par le système d'enregistrement. Au sein de ce mandat, deux sous-mandats peuvent être distingués: le traitement de signal et les algorithmes nécessaires à la génération de matrice de données neuronales pour le jeu de données. Il est bien important de comprendre que ce n'est pas l'entièreté de l'enregistrement neuronal qui nous intéresse, mais uniquement les fenêtres où le rat performe la tâche (ex: extension du bras pour chercher de la nourriture). Donc il est bien important d'identifier les fenêtres d'intérêts, ce que nous avons réalisé manuellement au départ et automatiquement par la suite via un détecteur de mouvement infrarouge. Ainsi, les points de prédictions choisis à une fréquence de temps fixe seront uniquement à l'intérieur de ces intervalles. Dans ce contexte, le terme intervalle est synonyme d'atteintes à la cible, ou *reachings* en anglais.

Mes tâches liées à ce mandat ont consisté tout d'abord par une phase de recherche, de tests d'algorithmes, et de sélection de logiciels afin de performer un traitement de signal optimal sur les données brutes. En effet, les données contiennent initialement beaucoup d'artefacts qui doivent être retirés avant de procéder à l'identification de potentiel d'actions dans chaque canal d'enregistrement. Par la suite, une tâche importante a été la production de fonctions en Python pouvant prendre les temps des potentiels d'actions sur chaque canaux (aussi appelé *spike trains* en anglais) et ressortir des matrices de données neuronal qui discrétise l'information contenu dans les canaux pour chaque point de prédiction. La discrétisation implique la création de bin au sein duquel nous comptons le nombre de potentiel d'action pour la durée de la bin. Cette durée se nomme d'ailleurs la résolution temporelle  $R$ , et elle se trouve généralement entre 20 ms et 100 ms. (Voir la figure ci-dessous)

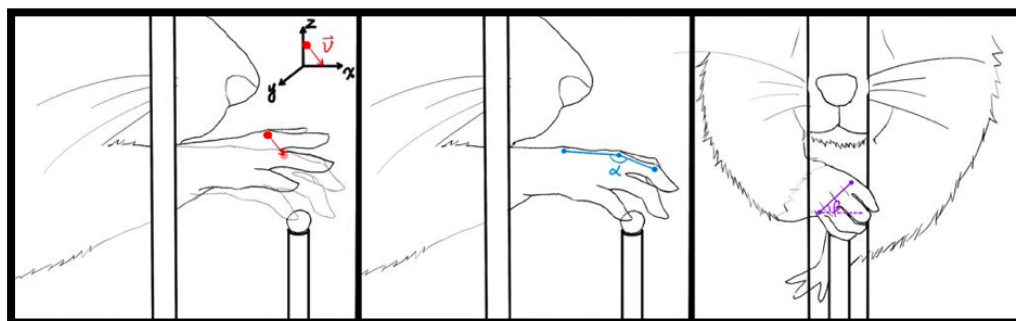


- Figure 3: À gauche, on peut voir des données neuronales servant à une prédiction. À droite, nous pouvons voir le processus de discrétisation du signal avec des bins de résolution temporelle  $R$ .

### 2.3.2 Traitement des données cinématiques

Le second grand mandat consiste en l'étape du traitement des données cinématiques. En d'autres mots, nous cherchons à extraire à partir d'une vidéo du rat enregistrée durant la session des variables motrices d'intérêts uniquement dans les intervalles où le rat performe des atteintes à la cible.

Pour cela, le stagiaire a établi comme variables d'intérêts 5 type de variables majoritairement décorrélées les unes des autres: les 3 premières représentent le vecteur de vitesse en 3D ( $x, y, z$ ) de la patte avant du rat lorsque celle-ci se déplace dans l'arène d'intérêt. Ce vecteur de vitesse est simplement obtenu grâce au calcul de la dérivée première de la position de la patte à travers le temps en 3 dimensions. Les deux autres variables sont l'angle d'ouverture de la main et l'angle d'orientation de la main. Celles-ci sont calculé via de simples calculs trigonométriques d'angles à partir de la position des joints sur les images de la vidéo tournée en 240 images par seconde. (Voir la figure 5). L'outil utilisé pour obtenir ces prédictions de joints sur l'animal pendant qu'il atteint la cible se nomme *DeepLabCut*. Celui-ci consiste en une librairie utilisant des réseaux de neurones pré-entraîné sur des images pour permettre à un utilisateur d'utiliser quelques images étiquetées avec les joints désirés, et le modèle sera entraîné pour performer ces prédictions de façon plutôt fiable. Bref, c'est ainsi qu'il est possible d'extraire les vecteurs de variables motrices pour les utilisés conjointement et de façon synchroniser avec les matrices de données neuronales.



- Figure 4: Une illustration des variables motrices qui ont été choisies pour le décodage. Le vecteur de vitesse en 3D est représenté à **gauche**. L'angle de fermeture est représenté au **milieu**. L'angle d'orientation est représenté à **droite**.

### 2.3.3 Décodage neuronal

Le dernier grand mandat représente la dernière étape du processus, c'est à dire l'entraînement de modèles servant à décoder l'activité neuronale. Après la génération de jeux de données avec des paramètres bien précis (voir tableau 1) pour différents rats et différentes sessions, il est nécessaire de produire des codes servant à: prétraiter les paires de données (x, y) avec diverses transformations (ex: normalisation, ...), la séparation en un jeu d'entraînement et de test, puis des codes servant à l'initialisation des modèles, de l'entraînement, de la phase de test, et la visualisation des résultats. L'outil de choix que le stagiaire a utilisé pour performer toutes ces étapes est l'utilisation de *Notebooks Jupyter*, facilitant ainsi la collaboration avec des pairs si nécessaire. Également, le stagiaire a payé l'accès à des GPUs Nvidia A100 et V100 pour pouvoir accélérer l'entraînement de plusieurs modèles simultanés sur des jeux de données différents, accélérant ainsi les itérations à faire pour obtenir des résultats plus satisfaisants.

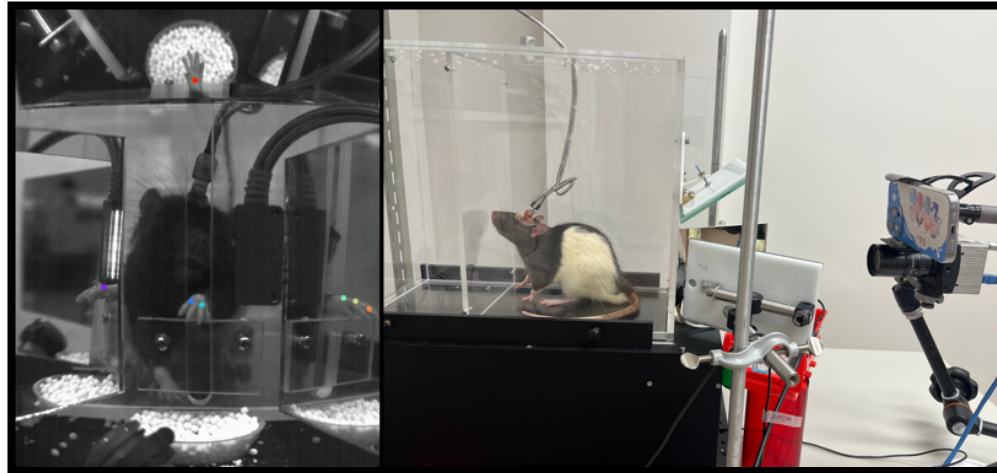
## 2.4 Résultats / Analyses / Discussions

### 2.4.1 Traitements des données neuronales

Après l'étude de nombreuses approches, il a été décidé avec le superviseur que le logiciel *Plexon Offline Sorter* représentait la meilleure option pour réaliser les traitements de signaux que nous voulions car celui-ci permettait rapidement d'éliminer les artefacts de hautes amplitudes, suivi des artefacts cross-canaux. Puis, le logiciel pouvait être configuré pour performer de la détection de potentiel d'actions, peu importe leur configuration. Il permet également d'identifier de façon automatiser ou manuels plusieurs neurones dans un seul canaux, ce qui se nomme le *spike sorting*.

### 2.4.2 Traitements des données cinématiques

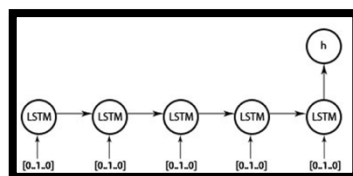
Les résultats obtenus avec l'outil DeepLabCut ont été de bonne qualité. En effet, l'outil arrivait bien à prédire la position des joints qui nous intéressaient pour toutes les images, et ce, avec un étiquetage limité à 100-200 images seulement. Par la suite, les prédictions brutes étaient exportées dans un fichier csv, où quelques lignes de codes transformaient ces données en variables motrices désirées.



- Figure 5: À **gauche**, il est possible de voir le résultat des prédictions de l'outil Deeplabcut sur une image afin d'obtenir la position des joints désirés. Cela sert par la suite à calculer les 5 variables motrices. Le miroir du haut permet de calculer le déplacement en (x, y), le miroir de gauche l'élévation (z), et les deux autres servent aux calculs des angles. À **droite**, nous avons une image prise durant un enregistrement.

### 2.4.3 Décodage neuronal

La principale architecture de modèle utilisée pour le décodage neuronal réalisé durant l'été est le réseau de neurones profonds récurrents du nom de LSTM (*Long short-term memory*). Malgré qu'il aurait été possible de comparer l'utilisation de différentes architectures, cette décision découle du fait que cette architecture est parmi l'une des meilleures approches pour du décodage neuronal, et que le but premier de ce stage était d'analyser la possibilité de décoder de l'informations motrices à partir d'enregistrement du cortex moteur. Donc nous avons plutôt chercher à itérer sur le design des expérimentations et le design des datasets. Par contre, une excellente itération serait la comparaison entre plusieurs architectures dont le Transformer. Plus précisément, un LSTM de type *many-to-one* a été utilisé, ce qui signifie que les vecteurs de la matrice neuronale sont traités séquentiellement et que la prédiction n'est pas faite en continue mais plutôt uniquement à la fin à partir du dernier état interne. Également, une réduction de dimensionnalité a été appliqué sur toutes les matrices neuronales, faisant passer les dimensions de 30 (environ) à 10 dimensions, permettant ainsi de maximiser la densité d'information. Cela a d'ailleurs comme impact un meilleur apprentissage pour les modèles.

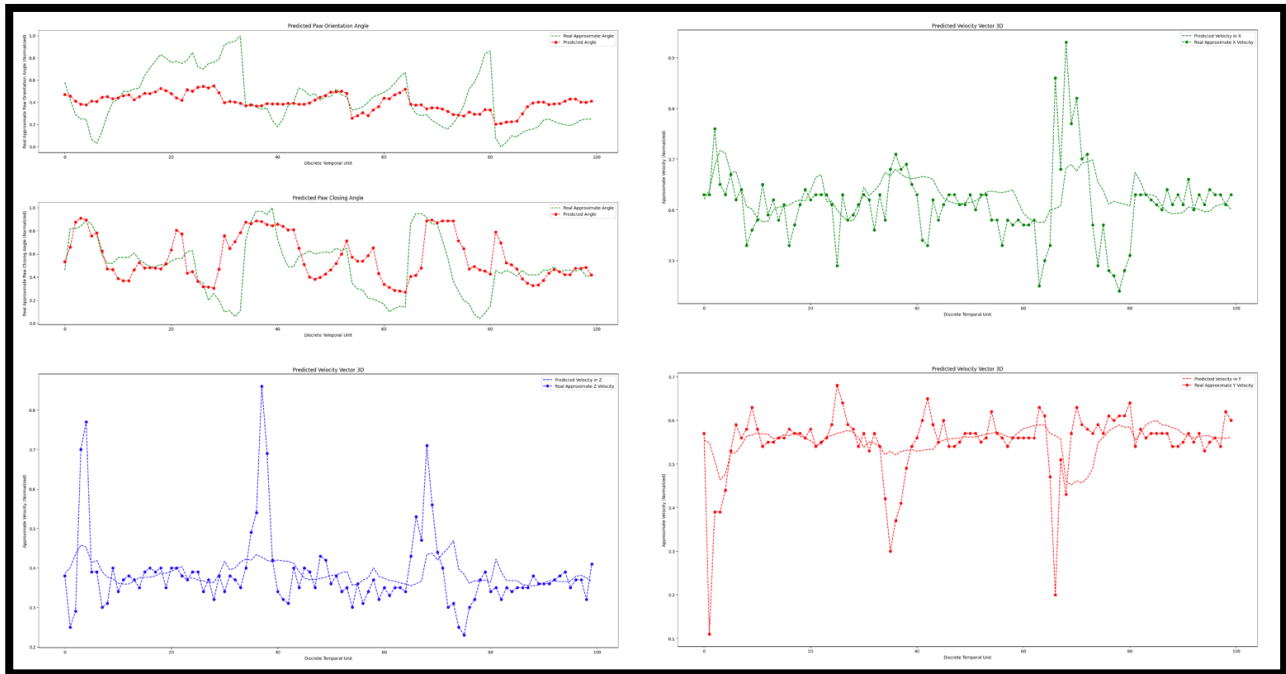


- Figure 6: Voici un exemple d'architecture de LSTM utilisé pour prédire les vecteurs de 5 variables à partir de son dernier état interne.

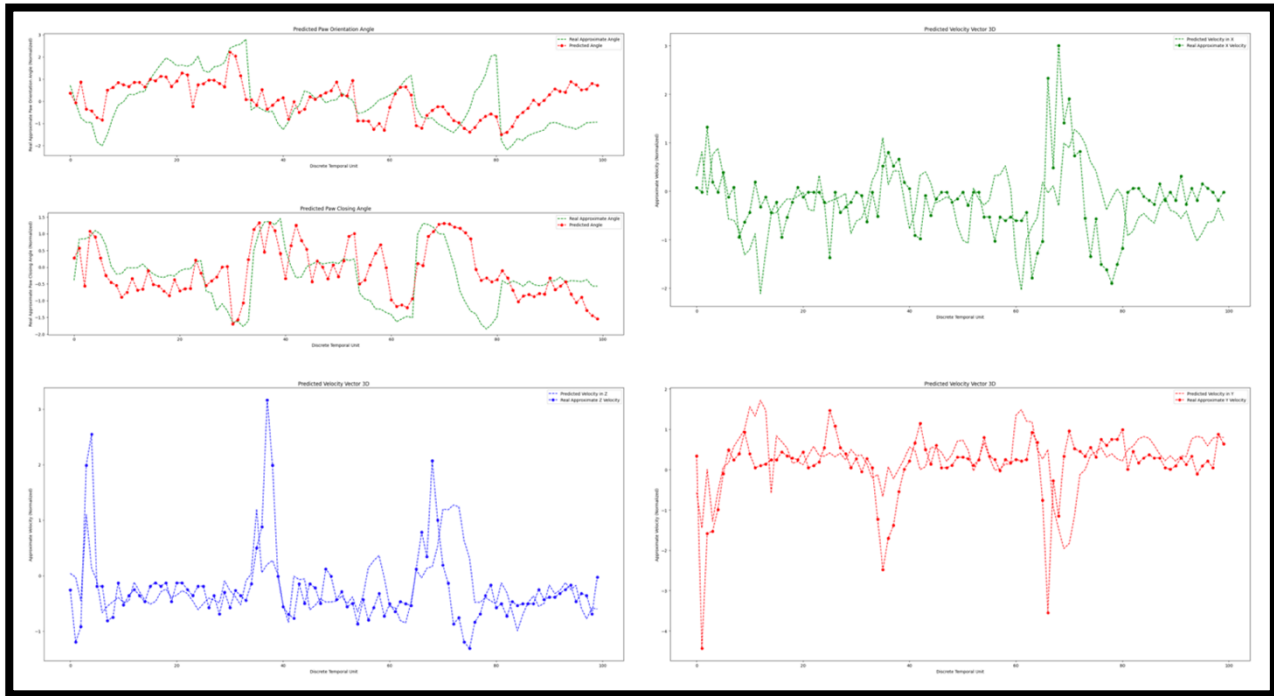
	Nb d'atteintes	Nb prediction points	Taille totale du tenseur	Résolution temporelle R / Bin	Nb de Canaux	Nb epochs	Dropout
<b>LSTM V9</b>	70	1343	26 x 15 x 1343	20 ms	26	200	20%

- Tableau 1: Configuration de l'un des meilleurs décodeurs obtenus

Deux métriques ont été utilisées à tour de rôle comme fonction objective pour entrainer les modèles et tester leurs performances: l'erreur moyenne absolue (EMA) et l'erreur quadratique moyenne (EQM). L'utilisation de l'EMA était caractérisée par des modèles qui allait vite minimiser l'erreur moyenne, mais ne faisait pas beaucoup attention aux données avec des écarts importants vis à vis la moyenne. Quant à l'utilisation de l'EQM, celle-ci minimisait beaucoup plus les écarts entre les prédictions et les données à fortes écarts par rapport à la moyenne. Ainsi, il fallait faire très attention si le jeu de donnée contenait beaucoup de données aberrantes. Finalement, deux types de transformations ont été testé avant l'entrainement: la normalisation et la standardisation. La première change la variation totale des données entre  $[0,1]$  tandis que la seconde a pour effet que les valeurs seront centrées autour de la moyenne avec un écart type unitaire. À travers les itérations, il semble que la normalisation était plus optimale, probablement dû à la distribution non-gaussienne des données. Finalement, la durée des entrainements étaient relativement courtes, ne dépassant pas 300 passages sur le jeu de données en raison de la petite taille de ceux-ci.



- Figure 7: Résultats des prédictions des 5 variables motrices sur le jeu de données de test pour le décodeur LSTM V9 avec *normalisation*



- Figure 8: Résultats des prédictions des 5 variables motrices sur le jeu de données de test pour le décodeur LSTM V9 avec *standardisation*

Les résultats ci-dessus affichant les prédictions de test pour le LSTM V9 avec normalisation ou standardisation semblent plutôt bien pour des itérations obtenues plutôt rapidement à la fin de l'été. En effet, il est possible de voir que le décodeur a appris à décodeur un bon degré d'information en général, ce qui se traduit par des tendances approximativement similaires. Quant à la métrique objective, la EMA d'entraînement correspond à 0.1080 et la EMA de test correspond à 0.0981, ce qui démontre aucun surentrainement via de l'*overfitting*.

## 2.5 Comparaison avec les attentes du stagiaire

Les attentes du stagiaire avant et pendant le début du stage ont rapidement évolué au cours de l'été. En effet, le stagiaire avait plutôt sous-estimé le temps nécessaire à l'obtention d'un jeu de données acceptable lorsque des aspects expérimentaux sont inclus dans l'équation. En effet, malgré le fait que la responsabilité du stagiaire résidait dans l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle modernes pour du décodage neuronal, il fût tout de même nécessaire d'aller générer les données manuellement, ce qui représente un processus itératif long qui ne marche pas à tous les coups. Par exemple, ce n'est pas tous les implants de microélectrodes qui enregistrent des bons signaux. Ainsi, le stagiaire avait prévu de pousser le décodage et l'analyse de la généralisation dans différents contextes beaucoup plus loin que ce qui lui était demandé, mais cela n'a pas pu être réalisé.

### **3 Développement et renforcement de mes compétences**

#### **3.1 Techniques**

Durant ce stage au sein du centre CERVO, j'ai été immergé dans un environnement de recherche avancée en neurosciences. Cette expérience m'a donné l'opportunité d'interagir avec des experts renommés et de me familiariser avec divers outils dédiés au traitement des signaux cérébraux. Le CERVO, étant un centre de recherche médicale, opère avec des normes et protocoles d'hygiène stricts. Travailler dans ce cadre m'a enseigné les réflexes et bonnes pratiques nécessaires, facilitant ainsi une éventuelle transition vers d'autres centres de recherche médicale.

#### **3.2 En ingénierie ou scientifiques**

L'apprentissage technique a été significatif. J'ai collaboré avec plusieurs neuroscientifiques pour approfondir ma compréhension des techniques opératoires, le choix du nombre d'électrodes, et la manipulation d'instruments avancés pour le décodage des signaux neuronaux. Face à des défis tels que des signaux de rongeurs difficilement exploitables ou extrêmement bruités, j'ai dû développer des stratégies de traitement pour isoler les signaux pertinents. Ma compétence en programmation Python s'est notamment renforcée, en particulier dans le domaine du traitement des signaux. J'ai implémenté diverses méthodes pour réduire le bruit et transformer les signaux, optimisant ainsi leur utilisation pour l'entraînement de modèles. Le projet de recherche exigeait une démarche méthodique. La sensibilité du décodage neuronal à la qualité des données m'a poussé à veiller scrupuleusement au respect des protocoles, depuis la pose des électrodes jusqu'à l'analyse des signaux. Ma capacité de gestion de projet s'est améliorée grâce à la coordination d'une équipe d'étudiants, chacun étant responsable de tâches spécifiques, depuis l'extraction des coordonnées des articulations des rongeurs avec DeepLabCut, le développement de fonctions de prétraitement, jusqu'au choix des modèles et leurs paramètres.

#### **3.3 Communication**

La coordination effective du projet nécessitait une communication fluide avec différents membres de l'équipe de recherche. Il m'a fallu adapter mon discours pour exprimer clairement mes besoins, surtout lors de la vulgarisation d'approches algorithmiques à une équipe principalement formée en neurosciences. Cette expérience m'a permis d'affiner mes compétences de communication en fonction de l'interlocuteur.

### **3.4 Réflexion sur la formation pratique et théorique reçue**

Pour assurer le succès du projet, j'ai investi du temps dans la lecture d'articles de recherche pour rester à jour. Ceci, couplé à une approche très pratique, a nécessité la mise en place d'un atelier pour filmer les mouvements du rongeur de manière optimale et ainsi collecter des données fiables.

### **3.5 Bilan des acquis**

Ce projet de recherche a été l'occasion de consolider mes connaissances théoriques en les appliquant à un cas réel. Sur le plan humain, j'ai amélioré mes compétences en communication et en gestion de projet. L'exigence rigoureuse du projet m'a enseigné l'importance d'une approche maîtrisée et minutieuse, essentielle pour obtenir des résultats concluants.

## **4 Conclusion**

Dans le cadre de mon stage de recherche à l'été 2023 au centre CERVO, j'ai eu l'opportunité d'appliquer des outils d'intelligence artificielle afin de décoder de l'information motrice à partir d'enregistrements faits dans le cortex moteur de rats en mouvement. Pour réussir cela, le stagiaire a dû travailler avec ses collaborateurs afin de développer des méthodes pour le traitement des données neuronales, des méthodes pour le traitement des données cinématiques, et finalement des méthodes pour l'entraînement de modèles d'apprentissage profond. Après la phase de développement et de test, le stagiaire a participé à la collection de données pendant plusieurs sessions d'enregistrements afin de construire des jeux de données nécessaires à l'entraînement de différents types de décodeurs neuronaux. À la fin du stage, les meilleurs résultats obtenus avec un réseau de neurones profonds récurrents de type LSTM démontrent qu'il est en effet possible de prédire certaines variables motrices à partir de signaux neuronaux avec une erreur acceptable sur des séquences d'activités non-incluses dans l'entraînement.

En rétrospective, plusieurs améliorations et analyses supplémentaires semblent intéressantes pour de futures itérations. Tout d'abord, l'addition de stratégies de recherche d'hyperparamètres (ex: *grid search*) serait une excellente idée en raison de la sensibilité des résultats à ceux-ci. Également, le test de différentes architectures et un contrôle plus strict des données aberrantes seraient de bonnes itérations à faire. Finalement, une analyse beaucoup plus profonde quant aux capacités de généralisation à de nouvelles sessions d'enregistrements, de nouvelles tâches motrices, ou encore à de nouveaux sujets seraient quelques choses d'important à réaliser.

D'ailleurs, en raison des récents progrès de technologies d'enregistrements neuronaux et de l'avancé des recherches en apprentissage profonds, l'avenir des interfaces cerveau-machine semblent très prometteur pour résoudre des problèmes très importants dans nos sociétés. Ainsi, ce stage s'inscrit dans un contexte clé pour le futur, que cela soit par rapport à des perspectives académiques ou professionnelles. D'ailleurs, l'expérience gagnée par le stagiaire au cours de ce stage lui servira directement pour sa deuxième maîtrise à l'Université Montréal.

## Références

[1] Site Web CERVO. <https://cervo.ulaval.ca/fr/propos-de-cervo> (Consulté le 02/09/2023)

[2] Ethier, Christian, et al. "Restoration of grasp following paralysis through brain-controlled stimulation of muscles." *Nature* 485.7398 (2012): 368-371.