



ENSIM

École d'ingénieurs
Le Mans Université

PROJET 4A 2020/2021

Rapport intermédiaire

Casque d'interaction neuronale

ÉQUIPE

Jessy LEBRUN
Dylan JACQUOT
Tom POUDEROUX
Kevin ZEMSI

Estelle GANOT
Aristide BOURRY
Adrien DANIS
Alexis NAIN

ENCADRENT

Catherine CLÉDER
Kais HASSAN

Une interface cerveau-machine (BCI) a pour objectif de traduire les signaux corticaux, captés à l'aide d'électrodes, en signaux compréhensibles par un ordinateur. Le principe du projet repose sur le fait qu'imaginer un mouvement ou l'exécuter provoquent une activité électrique cérébrale similaire. L'objectif du projet est de capter ces signaux électriques, de les traiter puis de les décoder afin d'exécuter des commandes numériques préalablement associées.

Table des matières

Introduction.....	3
Remerciements	4
Table des sigles et acronymes	5
Chapitre I : Les origines du projet.....	6
1.1 Problématique et objectifs.....	6
1.1.1 Contexte	6
1.1.2 Les enjeux.....	6
1.1.3 Objectifs et contraintes.....	6
1.2 Gestion de projet.....	7
1.2.1 La planification de projet et les outils utilisés.....	7
1.2.2 Organisation de l'équipe.....	8
Chapitre II : L'évolution après un semestre	10
2.1 Général.....	10
2.1.1 Etat de l'art	10
2.1.2 Anatomie du système nerveux	12
2.1.3 L'entreprise OpenBCI et ses produits.....	13
2.1.4 Législation	13
2.2 Acquisition de signaux.....	15
2.2.1 Matériel historique.....	15
2.2.2 Les spécifications	15
2.2.3 Les signaux EEG	16
2.2.4 Transmission et API	17
2.3 Prétraitements des données	19
2.3.1 Nécessité de pré-traitement	19
2.3.2 Les sources de bruit	19
2.3.3 Technique de traitement utilisé.....	19
2.3.4 Technique de filtres.....	20
2.3.5 Résultat obtenu	23
2.4 Classification de signaux	25
2.4.1 Les recherches qui ont déjà été menées	25
2.4.2 Les datasets disponibles.....	26
2.4.3 Nos résultats préliminaires	26
2.5 Interface Homme-Machine	28
2.5.1 Logiciel tiers	28
2.5.2 Domaine d'application	30
2.5.3 Logiciel équivalent	31
2.5.4 Conception de l'application	32





Chapitre III : Prévion & avenir	34
3.1 Perspectives	34
3.2 La JPO de l'ENSIM.....	35
Conclusion	36
Annexes	37
A. Liste des réalisations	37
B. Analyse d'impact sur la protection des données (PIA) - Projet 4A - Casque d'interaction neuronale : exploration	38



Introduction

Ce projet est réalisé dans le cadre des projets de quatrième année de cycle ingénieur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans (ENSIM) au sein de la spécialité Informatique.

Depuis plusieurs années, les mesures électroencéphalographiques (EEG) ont gagné en qualité et en précision à mesure des avancées en électronique, en traitement des signaux numériques et en algorithmique. D'abord employée dans le domaine médical, cette technologie, auparavant onéreuse, s'est démocratisée depuis. Des projets, notamment artistiques, se sont pleinement développés grâce à des entreprises privées et des communautés telles que celles d'OpenBCI, Emotiv, Neuromore, OpenVibe, ou d'autres proposant des outils de mesures accessibles à un plus grand public et laissant entrevoir des possibilités de contrôle cognitif en temps réel de systèmes interactifs sonores et visuels.

En effet, les BCI enregistrent les signaux cérébraux afin de les traduire sous la forme de commandes permettant de faire fonctionner différents dispositifs et fournir un feedback à l'utilisateur concernant la transformation des intentions en actions. La solution qui est utilisée au niveau du projet pédagogique est l'OpenBCI, qui consiste à pouvoir mesurer et enregistrer l'activité du cerveau (EEG), des muscles (EMG), et du cœur (ECG) à travers de leur logiciel open-source.

Actuellement, les BCI ont principalement leur place dans la médecine. En outre, elles sont développées principalement pour des personnes lourdement handicapées au niveau moteur pour qu'elles puissent communiquer ou interagir avec leur environnement par la pensée ou grâce à leur motricité restante.

Ce document a pour objectif de vous présenter l'état de nos recherches effectuées et à venir. Ce rapport a pour objet de vous projeter de notre petit univers et de vous donner une idée de notre prochaine soutenance.



Remerciements

Avant de commencer, nous tenons à remercier tout particulièrement nos encadrants, Mme CLEDER Catherine et M. HASSAN Kais, et à leur témoigner toute notre reconnaissance pour la confiance qu'ils nous ont accordé, ainsi que pour leurs précieux conseils durant tout ce semestre.

Pour finir nous tenons à adresser nos remerciements collectifs à toutes les personnes qui ont pris part de près ou de loin à notre projet.





Table des sigles et acronymes

Sigles	Française	Anglaise
BCI	Interface Neuronale Directe	Brain Computer Interface
EEG	Electroencéphalogramme	Electroencephalogram
GUI	Graphical User Interface	Interface graphique
EMG	Electromyogramme	Electromyogram
RFC	Forêt aléatoire	Random Forest
IA	Intelligence Artificielle	Artificial Intelligence
PIA	Analyse d'impact sur les données	Privacy Impact Assessment
DPO	Délégué à la protection des données à caractère personnel	Data Protection Officer

Chapitre I : Les origines du projet

1.1 Problématique et objectifs

1.1.1 Contexte

Le projet est né lors des cours d'Évolution des Problématiques de l'Informatique encadré par Mme CLÉDER. En effet, à la suite de ce cours et du travail de synthèse réalisé par l'un des membres de l'équipe, débouchant sur la création d'un article futuriste visant à imaginer l'avenir dans ce domaine, il a eu l'opportunité de proposer ce projet et de constituer une équipe pour travailler dessus. A partir de cette imagination, le projet de réalisation d'un casque d'interaction neuronal est devenu réalité.

1.1.2 Les enjeux

Les enjeux du projet sont plutôt orientés sur les aspects technologiques et le facteur humain.

En premier lieu, c'est le défi technologique qui nous a interpellé. Comme évoqué dans la majorité des documents, les BCI font intervenir une notion d'unimodalité, c'est-à-dire la capacité d'une solution à exploiter la possibilité de sortir une seule action simultanément. Ainsi, nous avons voulu à travers ce projet, tester cette capacité à travers différentes parties entre elles. La possibilité de multimodalité est, à ce jour, un problème de la recherche vu que la partie logicielle est bien plus performante que la partie matérielle.

C'est aussi un défi humain dans le sens où le projet est composé de quatre sous parties identifiées, un peu sous la forme de mini-projet à leur échelle. Chaque partie doit être composée d'un nombre d'étudiants qui se spécialisent en quelque sorte afin de pouvoir répondre aux différents besoins de chaque partie. L'affectation de huit étudiants sur ce projet était donc une nécessité afin d'offrir une spécialisation des tâches.

1.1.3 Objectifs et contraintes

Les objectifs principaux de ce projet se portent sur :

- **Analyse des perspectives des BCI** : L'intérêt premier du projet est de tester les possibilités du kit OpenBCI à travers plusieurs applications de prédictions de l'état cérébral des personnes.
- **Prise en main de la solution OpenBCI** : Consiste en l'appréhension de l'acquisition des signaux ainsi que de l'assemblage des différents composants du casque où l'équipe a dû apprendre de la documentation fournie par l'entreprise OpenBCI et garder une synthèse du principe de fonctionnement grâce à l'outil fourni.
- **Mise en œuvre du casque d'intégration neuronal** : Développement d'une application Unity3D qui prend la forme d'un jeu. Le but est de pouvoir utiliser le casque en tant qu'unique ou principal moyen d'interaction.
- **Documentation pour l'utilisation de l'OpenBCI** : La production d'une documentation précise sur les parties "Systèmes embarqués", "Traitement du signal" et "Intelligence artificielle" afin de faciliter la prise en main rapide lors de futurs projets. Ainsi, une personne utilisant ce casque pourra rapidement trouver les informations dont elle a besoin, en plus de donner un exemple simple d'interface neuronale directe.



1.2 Gestion de projet

1.2.1 La planification de projet et les outils utilisés

Pour accompagner les recherches et le développement du projet, nous avons utilisé divers outils afin d'organiser l'avancement des tâches ainsi que d'accélérer notre productivité au sein du projet.

Lors de la phase de planification des tâches du projet, nous avons été confrontés à un problème qui est principalement lié à nos connaissances de l'environnement technique. En effet, nous n'avions jamais eu l'occasion de travailler sur un sujet dans le domaine de la R&D. Par conséquent, nous avons adapté et adopté une méthode orientée plutôt agile car il nous a paru très difficile d'établir des documents tel qu'un cahier des charges, une structure de découpage du projet voire encore un Gantt. Il nous a paru préférable d'utiliser une solution de cartes un peu à l'image de la méthode Scrum établie séance après séance grâce à l'application Planner de Microsoft [Figure 1.2.1.1].

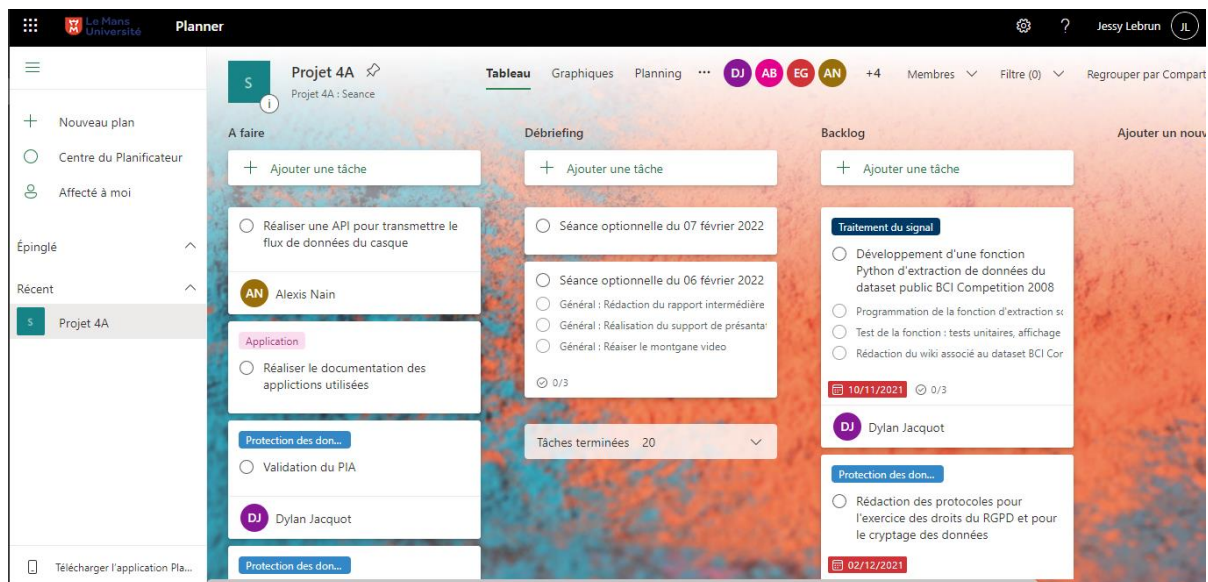


Figure 1.2.1.1 : Capture d'écran du Planner

Afin de manager le projet sur l'ensemble de l'année et de faire la passation à la prochaine équipe, nous avons utilisé plusieurs types d'outils tel que :

- L'application **Gitea** : Hébergée sur l'un de nos serveurs privés, cette solution web open source, nous permet de générer par interface graphique nos repositories Git distants avec un suivi des bugs, l'intégration continue et la livraison continue avec gestion de ticket intégrée. Adresse du Gitea : <https://gitea.jessy-lebrun.fr/>
- L'application **DokuWiki** : Hébergée sur l'un de nos serveurs privés, cette solution nous permet de préparer notre documentation technique finale afin de faciliter le partage des informations sur le projet auprès des prochaines équipes et au sein du groupe projet. Il est vrai que Gitea dispose d'un système de wiki intégré mais il ne permet pas de gérer son contenu de façon modulable comme DokuWiki. A l'instar d'un document partagé, cette application permet d'être plus rapide dans les explications en réalisant des liens HyperText entre les différents paragraphes et les différentes pages disponibles sur le wiki et ainsi entrer directement dans l'essentiel du problème. Adresse du wiki : <https://wiki.jessy-lebrun.fr/>

- Les applications **Discord** et **Messenger** : Elles sont nos supports de communication dans le groupe de projet. En effet, l'application Messenger de Meta nous permet d'échanger de façon spontanée des informations afin d'avoir des réponses rapides. De plus, Discord nous permet d'échanger des informations et des fichiers rapidement tout en gardant un fil d'Ariane sur le sujet grâce à la structuration des salons textuels et vocaux. Il nous a également permis de dialoguer rapidement avec nos enseignants référents dès que cela était nécessaire.
- Le **SharePoint** : Solution logicielle professionnelle de Microsoft que Le Mans Université met à disposition des étudiants dans leur écosystème, nous permettant d'utiliser principalement OneDrive, le Planner aussi que la suite bureautique collaborative Microsoft 365.
- L'IDE **PyCharm** : En raison du principal langage de programmation utilisé, Python3, au sein du groupe de projet, il a été préférable de choisir un IDE unique afin de pouvoir faciliter le travail collaboratif grâce aux outils intégrés gérés principalement automatiquement tel que Git, Conda, et bien d'autres. Tous ces outils sont présentés de façon graphique ce qui facilite leur utilisation.
- Moteur de jeu **Unity** : Au vue de la facilité de création et d'exploitation d'une application qui a une gestion simplifiée des Media queries, sans compter sur la publication sur différent terminal, le moteur de jeu Unity s'avère extrêmement pratique afin de développer l'application finale de notre projet.

Les applications que nous avons utilisées sont, pour la majorité, des logiciels open source et très populaires dans l'industrie. De plus, la communauté de ces logiciels est assez conséquente, cela nous aidera donc beaucoup dans l'avancement de nos travaux.

1.2.2 Organisation de l'équipe

Au fur et à mesure de l'avancement du projet, nous avons dû développer une nouvelle façon de travailler de façon autonome, en équipe, et ce de façon rigoureuse afin de gérer l'avancement de notre travail. De ce fait, nous avons structuré notre équipe selon l'organigramme [Figure 1.2.2.2] de telle sorte que chaque personne gagne en expérience et puisse monter en compétence.

Le projet ainsi été décomposé en quatre grandes parties [Figure 1.2.2.1]. Chaque partie représente à lui seul, une sortie de micro-projet qui doit s'articuler continuellement avec les autres afin d'assurer la cohésion du projet.

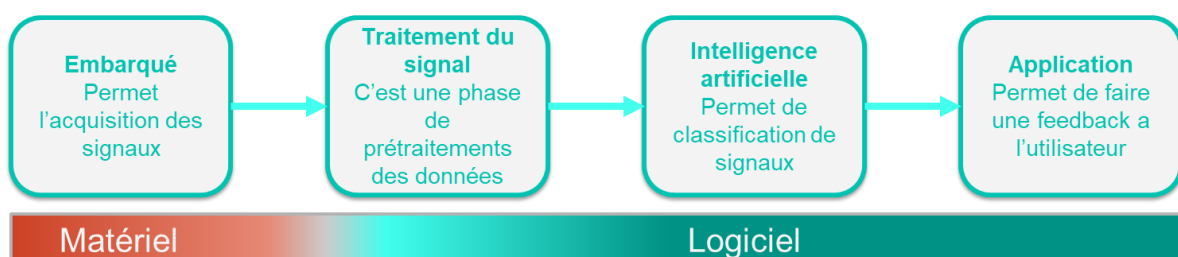


Figure 1.2.2.1 : Les grandes parties de projet

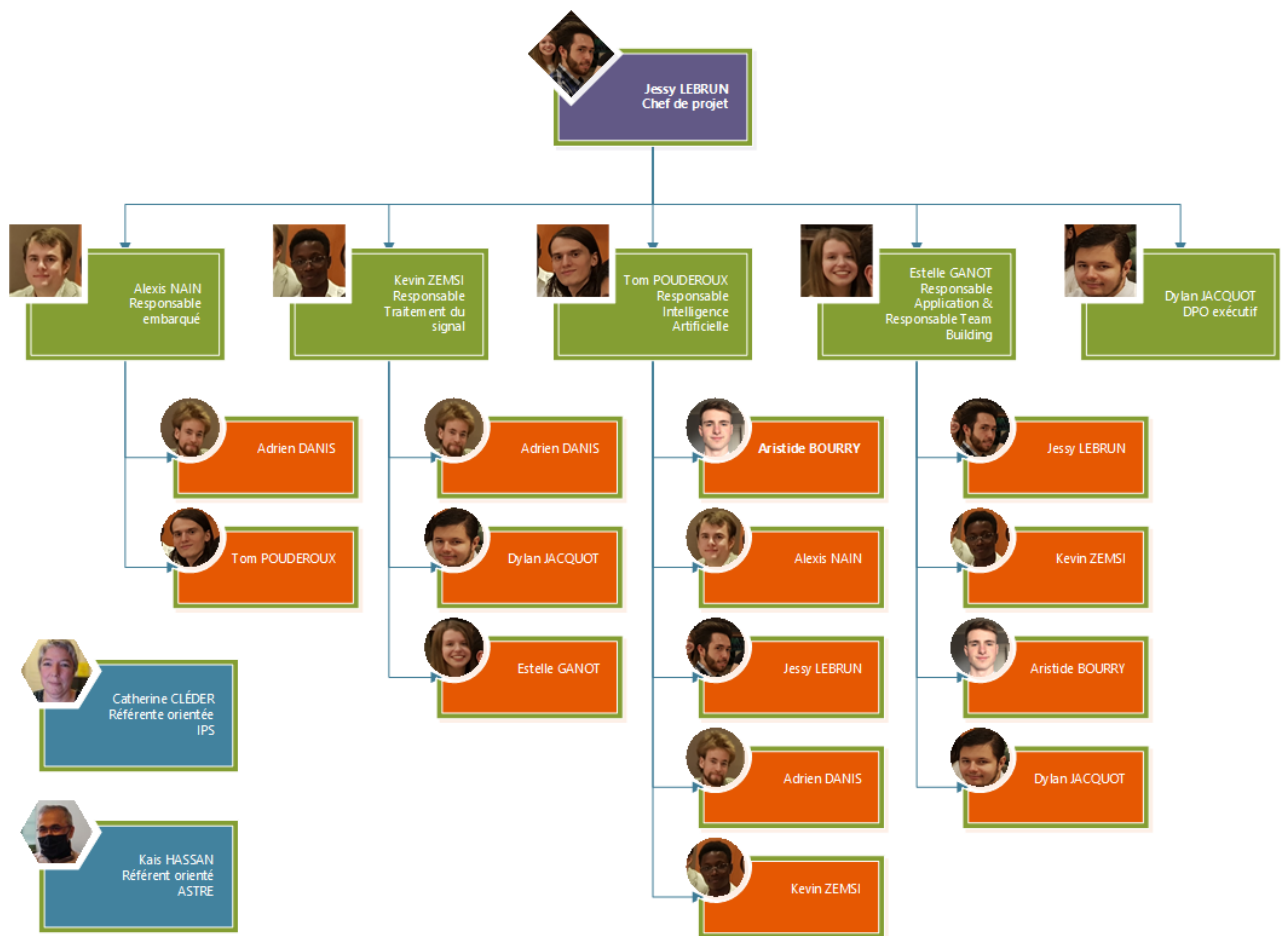


Figure 1.2.2.2 : Organigramme du projet casque d'interaction neuronal

Au vu de la charge de travail et notre détermination pour réaliser le projet, chaque personne s'est vu être affectée dans deux voire trois parties, au sein du projet, selon son choix.

Chapitre II : L'évolution après un semestre

2.1 Général

2.1.1 Etat de l'art

a. Les BCI sur le marché

Il existe actuellement sept principales entreprises proposant des solutions complètes pour les BCI :

- **Neuralink** : il s'agit d'un implant placé sous la peau derrière l'oreille. Cette solution est une BCI qui est très intrusive nécessitant une opération médicale pour être utilisée, la partie processeur se met derrière l'oreille puis quatre électrodes sont placées sur la boîte crânienne. Le coût total de l'appareil s'élève à 3000\$ avec l'opération chirurgicale comprise.
- **Neurable** : il s'agit d'un casque audio BCI. L'entreprise est la première à avoir développé un jeu sur une BCI. Neurable possède une communauté de taille moyenne et un développement logiciel de haut niveau pour les utilisateurs particuliers. Les électrodes sont au nombre de seize. Elles sont disposées autour de l'oreille et ne couvrent donc pas l'entièreté de l'activité cérébrale. Le casque n'est cependant pas encore disponible à la vente.
- **Emotiv** : Ce produit est un véritable casque neuronal, disponible en version dure et en version souple. En revanche, le développement d'applications l'exploitant se fait via un logiciel payant coûtant près de 1600\$ par an. De plus, on ne peut réparer le casque si le plastique casse et la communauté dessus n'est pas très développée à l'heure actuelle.
- **Kernel** : Ce casque est une BCI très haut de gamme, qui possède 52 sources et 312 détecteurs. Les sources et les détecteurs forment des paires et chaque paire constitue un canal. Au total, plus de 500 canaux peuvent être formés. Le casque est très solide puisqu'il est fait en métal mais est néanmoins très lourd, pesant ainsi près de 2,2Kg. On peut y connecter jusqu'à 20 modules développés par Kernel. Le casque coûte entre 37200\$ et 99200\$ et ne permet pas le traitement de données en temps réel.
- **NextMind** : il s'agit d'un casque neuronal développé de A à Z, il est pré-entraîné pour reconnaître différentes commandes. Il possède un kit de développement pour faire des applications l'exploitant mais le casque est uniquement orienté jeux vidéo. Il coûte 399,99\$ mais est en rupture de stock de manière assez régulière.
- **BitBrain** : Cette entreprise propose des casques secs et semi-secs. Plusieurs modèles de casques secs sont disponibles. Le plus haut de gamme comporte 12 canaux, non modulaires, répartis sur le cortex frontal, pré-frontal, temporal, occipital et pariétal. Il n'y a pas de prix annoncé, il faut contacter le fabricant pour obtenir un devis.
- **OpenBCI** : Cette société propose à la vente un casque entièrement modulaire avec un modèle 3D fourni pour l'impression. Le casque est donc réparable s'il casse (à l'exception de l'électronique). La programmation du casque est open source, on peut donc exploiter le casque selon nos besoins avec des modèles d'IA sur mesure. Le casque est orienté 100% modulaire pour que chacun puisse l'adapter au mieux à ses besoins. Le casque coûte 2059,99\$. Il s'agit de la solution que nous avons retenu pour notre projet.



b. Les applications utilisées avec les BCI

Les applications existantes sont les suivantes :

1. NeuroEntertainment

- **Neurogaming** : Jeux vidéo contrôlés par un BCI.
- **Neurojouets** : Par exemple un hélicoptère commandé par la pensée (en outre via l'imagination motrice).
- **Art** : Utilisation des BCI dans la génération de musique et d'œuvres d'art.
- **Réalité Virtuelle** : Les BCI sont intégrées aux casques de réalité virtuelle grâce au design et l'utilisation de ces derniers compatible avec l'installation d'électrodes.

2. Sécurité

- **Authentification basée sur les ondes cérébrales** : Utilisation de la biométrie cérébrale pour l'identification des personnes. Ces dernières sont similaires aux empreintes digitales, différentes pour chaque personne, et permettent ainsi d'identifier de manière plus sécurisée un individu.

3. Thérapie de Rétroaction Biologique

- **Traitement de l'anxiété** : Utilisation du neurofeedback pour gérer l'anxiété. Cette méthode est similaire à la pleine conscience.
- **Amélioration du sommeil** : Utilisation des BCI pour les recherches sur le sommeil.
- **Syndrome de stress post traumatique** : Le traitement des SSPT se fait en générant des ondes cérébrales alpha, on utilise donc les casques neuronaux pour trouver et sélectionner les exercices qui en génèrent le plus.

4. Entraînement cognitif

- **Optimisation des performances** : Le neurofeedback permet d'optimiser ses performances intellectuelles.
- **Vieillesse du cerveau** : Prédiction des futurs déclin cognitifs à l'aide de certains biomarqueurs.
- **Pleine conscience** : Le neurofeedback aiderait à atteindre la pleine conscience selon différentes études.
- **Apprentissage accéléré** : Possibilité d'augmenter ses capacités mémorielles grâce au neurofeedback des ondes thêta.
- **Créativité améliorée** : Etude des ondes thêta et alpha pour améliorer la créativité des individus.

5. Réhabilitation

- **Récupération après un AVC** : Exercices cérébraux avec adaptation selon l'observation du neurofeedback.



- **Addiction** : Recherche sur les effets des addictions sur le cerveau et sur les traitements possibles pour y remédier.

6. Diagnostic

- **Commotion cérébrale** : Les BCI peuvent permettre aux médecins d'avoir une première analyse pour savoir si un patient a besoin d'une IRM ou non ou pour savoir s'il a une commotion cérébrale.
- **Alzheimer** : Les EEG peuvent aider à détecter Alzheimer tôt dans son développement.
- **Epilepsie** : Les EEG seraient une opportunité de faire une détection à bas coût de l'épilepsie pour les personnes qui n'ont pas les moyens d'organiser une détection de manière classique.

2.1.2 Anatomie du système nerveux

Le cerveau est constitué de plusieurs parties. Les plus importantes sont le lobe frontal, occipital, pariétal, le cervelet, le tronc cérébral, le thalamus, l'hypothalamus et l'hypophyse et l'épiphyse. Le lobe frontal est responsable de la créativité de l'individu. Le lobe pariétal, quant à lui, est responsable des fonctions somato-sensitives (fourmillement, douleur entre autres). Les lobes occipitaux situés à l'arrière du cerveau sont responsables de l'analyse et de l'interprétation de la vision, ils permettent à l'individu de se constituer des souvenirs. Le cervelet, situé sous le cerveau, est responsable du tonus postural (réflexes de posture) et de l'équilibre.

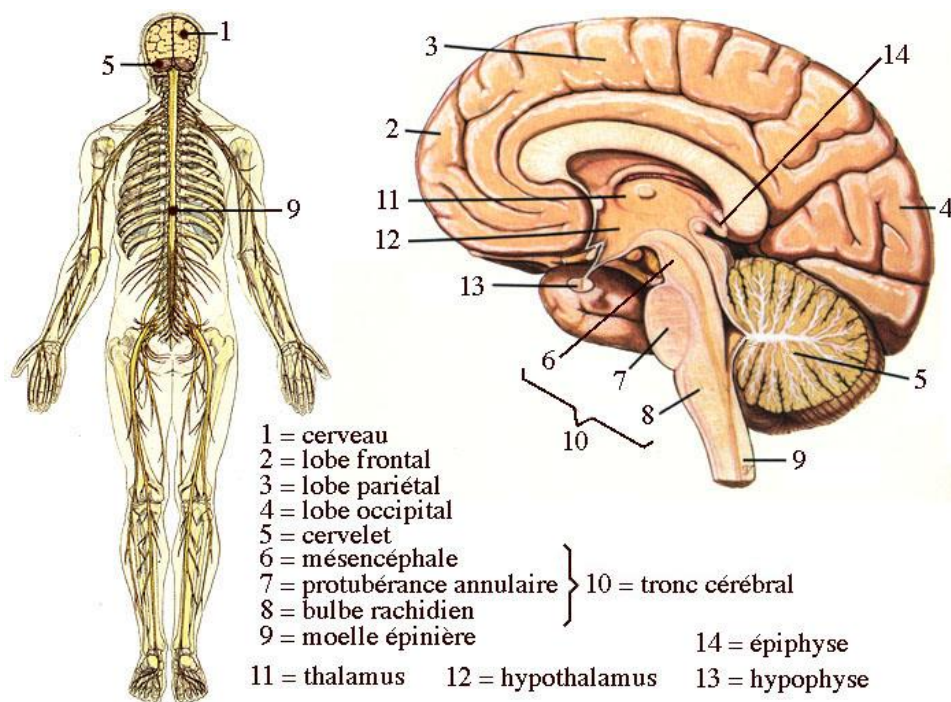


Figure 2.1.2.1 Représentation schématique du système nerveux humain

Le tronc cérébral est le lieu de passage de nombreuses voies motrices et sensibles. Le thalamus situé au centre du cerveau est responsable du contrôle du système moteur dans une situation d'alarme. L'hypothalamus, qui comme son nom l'indique est situé sous le thalamus, est responsable de la régulation de la température corporelle, de la faim, de la soif et des cycles menstruelles chez la femme. L'hypothalamus est aussi responsable des émotions et du comportement sexuel.

L'épiphyse sécrète la mélatonine, hormone responsable du sommeil. L'hypophyse, quant à lui, est responsable de toutes les hormones du corps, directement par exemple avec la prolactine qu'il produit ou indirectement en agissant par exemple sur les glandes surrénales pour produire de la cortisone ou sur la thyroïde pour sécréter des hormones thyroïdiennes

2.1.3 L'entreprise OpenBCI et ses produits

OpenBCI est une entreprise qui développe des outils open source pour la biodétection et les neurosciences. Leur but est de baisser la hauteur de marche pour entrer dans le monde des interfaces neuronales. L'entreprise est relativement jeune puisqu'elle a moins de 10 ans. Ils proposent des casques à électrodes sèches ou à gel, souples ou dur. Les casques souples sont en tissus ou polymère, les casques durs peuvent être fournis avec le casque ou peuvent être en kit à imprimer nous-même.

En plus de ces casques et ses électrodes, ils proposent des cartes d'acquisitions, une à 8 ou 16 canaux, ou une pour les débutants à 6 canaux. Ils proposent aussi une carte d'acquisition tout-en-un Emotibit spécialisée dans la capture haute qualité de données émotionnelles, physiologiques et de mouvements.

2.1.4 Législation

a. Les règles en vigueur

Dans le cadre de notre projet, nous serons amenés à exploiter des données électroencéphalographiques et à les stocker afin de former des jeux de données utiles à des fins de test, de calibrage ou encore pédagogiques.

Ainsi, nous devons nous demander si une telle conservation de données pose des problèmes en termes de gestion des données personnelles.

Tout d'abord, il faut définir ce qu'est une donnée à caractère personnel. D'après la CNIL, une donnée à caractère personnel est "toute information relative à une personne physique susceptible d'être identifiée, directement ou indirectement". Une telle donnée est, lorsqu'elle concerne un résident de l'Union Européenne, protégée juridiquement par le Règlement général sur la protection des données (RGPD) et la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés en France, qui en est le précurseur.

Nous nous sommes renseignés auprès de différents enseignants au sein de l'ENSIM qui nous ont tous confirmé qu'il est bien nécessaire de protéger les signaux électroencéphalographiques récoltés. En effet, il existe déjà dans le monde de la recherche en informatique des applications permettant de réidentifier une personne à partir d'un signal EEG : il s'agit de la biométrie électroencéphalographique. De tels procédés existent déjà et pourraient très bien devenir de plus en plus performants dans les années à venir.

De plus, il s'avère que des données électroencéphalographiques peuvent être fortement sensibles en détenant des informations directes sur l'état de santé d'une personne (mental et cérébral notamment). Il est aussi possible à l'aide d'algorithmes exploitant de l'intelligence artificielle d'extraire des informations identifiantes telles que le sexe ou l'âge d'une personne (qui sont alors estimés avec une marge d'erreur).

Cela pourrait donc conduire à des dérives très graves si des mesures de protection des données ne sont pas appliquées aux interfaces neuronales.

Il découle ainsi de toute cette analyse que les données électroencéphalographiques recueillies doivent être considérées comme des données à caractère personnel et donc respecter les règles fixées par le RGPD.

Ces règles impliquent des devoirs pour le responsable de traitement. Nous allons donc devoir adapter nos méthodes d'acquisition et nos productions afin notamment de garantir un droit d'accès/portabilité (possibilité pour les volontaires de récupérer leurs données à tout moment sous un format universellement lisible), un droit d'effacement des données et un droit d'opposition au traitement. Il faudra également prendre des mesures importantes de recueil de consentement et de cybersécurité.

b. Solution mise en place

Pour être certain de mettre en conformité notre projet avec le RGPD, nous avons réalisé une analyse d'impact sur les données personnelles (ou PIA, pour Privacy Impact Assessment). En effet, le RGPD précise notamment ceci :

D'après l'**Article 35 - Analyse d'impact relative à la protection des données** : "*Lorsqu'un type de traitement, en particulier par le recours à de nouvelles technologies, et compte tenu de la nature, de la portée, du contexte et des finalités du traitement, est susceptible d'engendrer un risque élevé pour les droits et libertés des personnes physiques, le responsable du traitement effectue, avant le traitement, une analyse de l'impact des opérations de traitement envisagées sur la protection des données à caractère personnel. Une seule et même analyse peut porter sur un ensemble d'opérations de traitement similaires qui présentent des risques élevés similaires.*"

Ainsi, il semble clair que notre projet rentre dans le cadre de l'obligation de rédaction d'un PIA. Il concerne une technologie émergente (une interface cerveau-machine), concerne une donnée à caractère personnel et est susceptible d'engendrer des risques pour les personnes concernées (car possiblement identifiantes et révélatrices de données sensibles tel qu'évoqué précédemment).

Nous avons donc réalisé un PIA (dans notre cas à l'aide du logiciel fourni par la CNIL) qui nous permettra d'établir une politique précise et complète de gestion des données à caractère personnel en conformité avec le RGPD [Annexe B]. Il s'agit d'un document d'une vingtaine de pages détaillant notre politique de protection des données et décrivant en quoi notre projet est conforme au RGPD. Il nous faudra respecter l'ensemble des mesures qui y seront décidées pendant l'ensemble du projet, notamment concernant les droits et la cybersécurité.

Nous avons également rédigé des formulaires de consentement à l'exploitation des données personnelles et des protocoles permettant aux personnes concernées d'exercer leurs droits garantis par le RGPD et décrits dans la partie précédente.

Nous avons ensuite élaboré une politique de cybersécurité basée essentiellement sur le cryptage des données via OpenSSL et sur la protection de l'accès aux fichiers issus de la récolte des signaux électroencéphalographiques.

Nous avons enfin décidé de nommer un responsable à la protection des données personnelles, Dylan Jacquot, qui a eu la charge de rédiger avec l'aide de l'équipe ces différents documents et qui devra s'assurer du respect du RGPD tout au long du projet.



2.2 Acquisition de signaux

2.2.1 Matériel historique

La découverte de l'électroencéphalographie est attribuée au scientifique Richard Carton qui l'a découvert en 1875. Seulement le principe fut découvert, il faudra attendre 1920 pour que le neurologue Hans Berger invente l'électroencéphalogramme (par la suite appelé EEG) c'est à dire l'appareil qui va permettre de lire les signaux des neurones. Les signaux étant vraiment trop faibles pour pouvoir être interprétables, Hans Berger va amplifier lesdits signaux.

Le premier EEG celui de M. Berger permettait de capter les signaux des neurones via des électrodes disposées sur le cuir chevelu et un amplificateur de tension après celles-ci. Les signaux ainsi recueillis étaient écrits sur des bandes de papier millimétrées comme celle-ci :

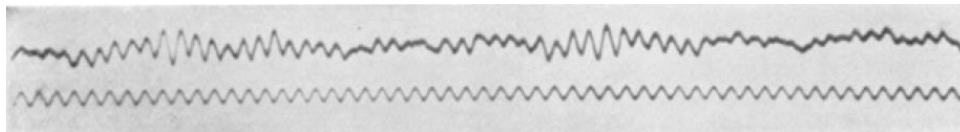


Figure 2.2.1.1 : Exemple de signal EEG

Les EEG commenceront à couramment être utilisés à partir des années 50, encore au début sur des bandes de papier millimétrées mais par la suite, le numérique viendra remplacer le papier pour avoir les courbes sur un écran et plus particulièrement sur un ordinateur.

Les applications pour les EEG sont diverses comme le médical et par exemple l'imagerie cérébrale électrophysiologique. Mais aussi dans le domaine scientifique autre que la médecine là où intervient notre projet.

2.2.2 Les spécifications

L'Open BCI que nous utilisons est un système qui permet de faire selon le besoin, soit un EEG pour mesurer l'activité du cerveau soit un électromyogramme (EMG) pour mesurer l'activité des muscles soit un mélange des deux afin de mesurer l'activité de cerveau et de quelques muscles.

Les seules différences notables de matériel entre ces deux configurations étant le changement d'électrodes et l'absence d'armature de casque pour l'EMG puisque les électrodes sont directement collées sur les muscles. Mais sinon le matériel pour les deux configurations reste le même.

OpenBCI propose plusieurs kits de matériel et voici le matériel que contient dans le kit que nous avons choisi :

- Un kit d'électrodes pour EEG avec des appuis pour le confort du casque

Les électrodes de l'EEG fonctionnent en étant en contact avec le cuir chevelu et capte les signaux des neurones. Elles sont fournies avec des "peignes", des extensions conductrices qui permettent d'avoir une meilleure conductivité avec les cheveux longs. Elles ont aussi un câble avec une prise femelle qui peut être relié à une carte d'acquisition. Les embouts de 2 électrodes sont plats puisqu'elles sont pour le devant du crâne, là où il n'y a pas de cheveux.

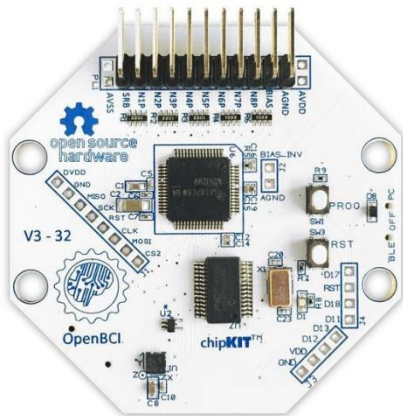


Figure 2.2.2.1 : Carte d'acquisition Cyton



Figure 2.2.2.2 : Shield d'acquisition Daisy

La carte d'acquisition Cyton est une carte alimentée par un boîtier à piles mais que nous avons décidé de remplacer par une batterie Lithium-Ion de 3,7V. Elle inclut un μ Contrôleur avec un Firmware, une puce RFduino programmable qui s'occupe de la transmission des mesures via Bluetooth ou radio, 8 canaux analogiques d'acquisition, un accéléromètre et un emplacement pour carte SD pour stocker les mesures.

La Daisy n'est rien d'autre qu'un "shield" pour la Cyton afin de rajouter 8 canaux d'acquisition supplémentaires.

- Un kit complet d'électrodes pour EMG
- Un panel de câbles pour l'EEG
- Un autre panel de câbles pour l'EMG
- Un USB dongle



Figure 2.2.2.3 : Dongle USB

L'USB dongle est une clé USB qui possède un module radio RFduino afin de récupérer les données envoyées par la Cyton et les retransmettre via un module série de l'USB sur l'ordinateur.

L'armature du casque, les "boulons" et les serre-câbles ne sont pas fournis dans ce kit. Ils sont donc à imprimer soi-même avec une imprimante 3D mais plus de détail sera consacré dans la partie modélisation à ce niveau-là. Elle respecte la norme de placement des électrodes 10-20 [Figure 2.2.2.4]

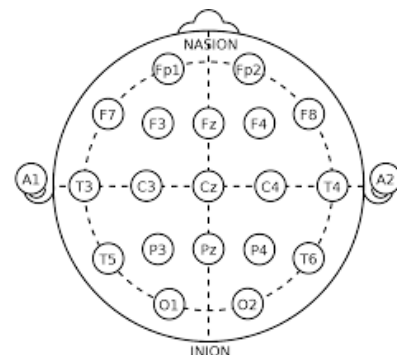


Figure 2.2.2.4 : Système 10-20

2.2.3 Les signaux EEG

Les systèmes EEG capturent des informations sur de nombreux aspects différents de cognition, de comportement et des émotions. La technologie aide non seulement à étudier le

cerveau, mais a également des applications dans le domaine de la santé, dans la surveillance EEG affective et émotionnelle et dans l'amélioration humaine. Cependant, les données EEG ne sont pas faciles à interpréter : elles sont très bruyantes, varient considérablement d'un individu à l'autre et, même pour une même personne, évoluent considérablement dans le temps.

Les signaux EEG enregistrent l'activité électrique du cerveau à l'aide d'électrodes EEG placées sur le cuir chevelu. Ils sont bruyants, comportent des artefacts et, surtout, ce ne sont pas le type de signaux auxquels les gens sont habitués (images, graphiques, ...). Les médecins, les neuroscientifiques et les ingénieurs biomédicaux reçoivent généralement une formation pendant de nombreuses années pour comprendre et extraire des informations significatives des données EEG.

2.2.4 Transmission et API

Les protocoles proposés par OpenBCI pour échanger des données sont au nombre de 2 : soit via ondes radio, soit via Bluetooth. Nous avons retenu la radio pour sa capacité à transmettre plus de données tout en étant plus fiable et plus facile à mettre en place que le Bluetooth.

Le format d'envoi des données, composé de 31 octets par échantillon, est assez simple :

- 2 octets dits "Header",
- 24 octets de données,
- 6 octets de données auxiliaires,
- 1 octet dit "Footer".

Dans ces 24 octets de données, 3 sont utilisés pour chaque canal d'acquisition (soit 8 canaux pour la Cyton d'OpenBCI). Les octets de Header, Footer et de données auxiliaires ne sont pas exploités pour notre utilisation du casque.

Dans un souci de bande passante pour la liaison radio, le protocole ne permet pas l'échange de plus de 32 octets par échantillon avec une vitesse d'échantillonnage de 250 Hz. Ce point ne pose de problèmes que si l'on vient rajouter l'extension "Daisy" à la Cyton, ce qui est notre cas.

En effet, le nombre de canaux d'échantillonnage passe de 8 à 16, pour les même 24 octets de données dans le protocole de transmission. Pour se faire, la Cyton va compresser les données avant de les envoyer selon un moyennage qui est expliqué sur la documentation d'OpenBCI, ainsi que comment la carte transmet ses informations, mais la méthode expliquée est une méthode de compression très destructive et non réversible [figure 2.2.4.1].



sample#	recorded	sent	sent
0	board(0),daisy(0)		an invalid sample
1	board(1),daisy(1)	avg(board(0),board(1))	
2	board(2),daisy(2)		avg(daisy(1),daisy(2))
3	board(3),daisy(3)	avg(board(2),board(3))	
4	board(4),daisy(4)		avg(daisy(3),daisy(4))
5	board(5),daisy(5)	avg(board(4),board(5))	
6	board(6),daisy(6)		avg(daisy(5),daisy(6))

Figure 2.2.4.1: Format des données envoyées lors de la présence du module Daisy

Après avoir essayé en vain de comprendre comment récupérer les données une fois transmises, nous avons trouvé sur YouTube un utilisateur qui utilise une bibliothèque Python nommé "pyOpenBCI". Cette bibliothèque permet de se connecter aux cartes fournies par OpenBCI ayant toujours le microprogramme de base installé et d'initialiser la liaison radio, et ainsi récupérer le flux d'échantillon décompressé envoyé par la carte. Malgré son manque de documentation en ligne, sa documentation interne est suffisante pour permettre son exploitation dans l'API.

L'API sera le début de la chaîne de traitement du signal : C'est elle qui recevra le flux de donnée en provenance du casque, qui adaptera le flux en données lisibles et ordonnées pour le traitement du signal de l'étage suivant, qui s'occupera de leur mise en mémoire tampon, et qui transmettra ces dernières selon un décalage prédéfini. Par exemple, on peut demander d'envoyer les données en traitement tous les 10 échantillons reçus. Grâce à ce tampon qui conservera les quelques milliers d'échantillons dernièrement reçus, le caractère temporel est plus facilement pris en charge par le traitement et l'IA : Quand une donnée arrive du casque, l'API va supprimer l'échantillon le plus vieux pour ajouter la nouvelle donnée et, de temps en temps, envoyer ce tampon dans l'étage de traitement. Si une information utile était présente à la coupure entre 2 envois de données, elle ne sera pas perdue et sera correctement transmise au prochain envoi de données.

2.3 Prétraitements des données

2.3.1 Nécessité de pré-traitement

Les signaux captés sur le cuir chevelu ne sont pas nécessairement une représentation précise des signaux provenant du cerveau car les informations spatiales se perdent. Ceux-ci contiennent des motifs neurophysiologiques particuliers permettant d'identifier l'état mental de l'utilisateur. Ces motifs sont provoqués lors de la réalisation de tâches cognitives ou motrices particulière. Néanmoins, ces signaux contiennent aussi du bruit, d'où l'importance du prétraitement des données qui a pour but d'éliminer le bruit contenu dans les signaux précédemment acquis. Le prétraitement consiste donc à filtrer dans le domaine fréquentiel (par exemple filtre passe-bande) et spatial (par exemple filtre Laplacien de surface ou CSP).

2.3.2 Les sources de bruit

Le bruit peut provenir de :

- L'environnement, dont le réseau électrique (50HZ), qui en est la principale source, il sera donc important pour nous d'alimenter le casque sur batterie plutôt que sur secteur pour éviter les 50HZ.
- Une activité physiologique parasite telle que l'activité musculaire de la face (mouvement des yeux contraction de la mâchoire) dont l'amplitude est supérieure est celle du signal cérébral, d'où l'importance d'installer l'utilisateur confortablement et s'assurer qu'il est détendu pour les éviter.
- L'activité cérébrale de fond (rythme alpha) dont la fréquence couvre certains motifs neurophysiologiques.
- Les mouvements des capteurs enregistrant l'activité cérébrale.

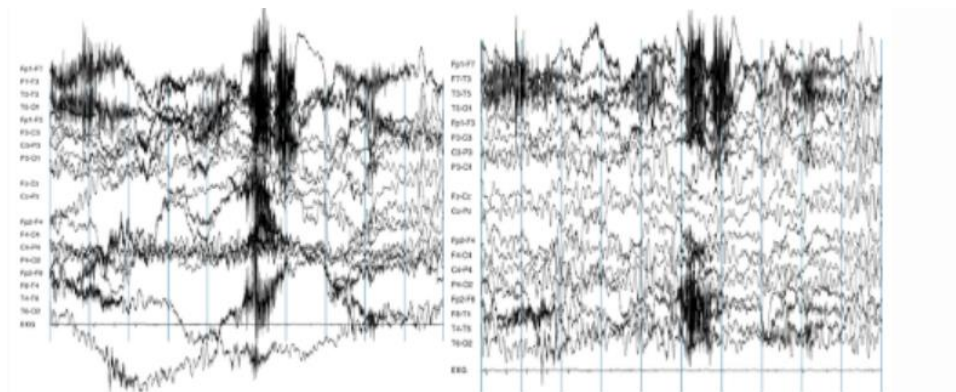


Figure 2.3.2.1 : Exemple de données non filtrées à gauche vs filtrées à droite

2.3.3 Technique de traitement utilisé

Il existe deux techniques majeures d'acquisition du signal. La technique invasive qui permet d'acquérir un signal meilleur mais nécessite malheureusement une opération chirurgicale ce qui n'est pas de notre ressort. La deuxième est la technique non-invasive que nous allons appliquer dans notre projet car présente moins de risque pour les différents sujets.

La technique non-invasive enregistre uniquement l'activité cérébrale périphérique et non l'activité cérébrale profonde comme le permettent les électrodes intra-cérébrale. Le signal recueilli correspond donc à la résultante d'activités oscillatoires à des différentes fréquences des neurones situés à plusieurs centimètres d'électrodes. Cette technique

nécessite l'utilisation d'une patte conductrice qui permette de réduire l'impédance de contact entre l'électrode et la surface du cuir chevelure, ainsi nous aurons une meilleure qualité du signal enregistré

2.3.4 Technique de filtres

Le traitement du signal dans une application BCI est composé de deux étapes majeures : le filtrage fréquentiel et le filtrage spatial. Le premier a pour vocation de ne conserver dans le signal que les bandes de fréquences contenant du signal utile. Le second permet quant à lui de sélectionner les canaux utiles (c'est-à-dire les électrodes) par rapport aux états cérébraux visés. Il peut aussi s'avérer utile pour débruiter en éliminant les parties redondantes du signal.

a. Filtrage fréquentiel

De manière générale, l'étape de filtrage fréquentiel consiste en l'application de filtres passe-bande qui laissent passer une bande de fréquence limitée et coupe-bande qui laisse passer toutes les bandes de fréquences sauf une bande spécifique. Il en existe deux types : les filtres analogiques et les filtres numériques. Les premiers reposent sur l'utilisation à bon escient des propriétés des composants électroniques de base comme les condensateurs et les bobines. Ils s'appliquent donc directement au signal électrique analogique. Les seconds quant à eux sont utilisables dès lors que le signal est numérisé. Ils sont des solutions algorithmiques permettant de réaliser le filtrage du signal.

Pour ce projet, les filtres numériques semblent bien plus adaptés puisque les signaux acquis des électrodes sont numérisés.

Avant la mise en place de ces filtres, il faut donc se documenter sur les plages de fréquence concernant les états cérébraux ciblés par notre application. Pour cela, il faut tout d'abord étudier les différents rythmes cérébraux existants.

En effet, la résolution spatiale et temporelle des électrodes ne permet pas une analyse extrêmement fine des signaux cérébraux : nous ne serons capables de détecter que les signaux cohérents d'un ensemble de neurones. Les rythmes cérébraux sont alors très pratiques car ils concernent un nombre important de neurones agissant de manière synchrone. Ainsi, un rythme cérébral va produire un motif cérébral relativement reconnaissable dans le signal.

Notre cerveau émet des signaux à différentes fréquences selon son activité. Plus le sujet est dans un état de repos et plus les fréquences d'émission des signaux seront faibles.

Dans ce projet, nous exploiterons le rythme sensorimoteur, qui est caractéristique notamment des mouvements imaginés des mains.

Il s'agit d'un rythme cérébral lié à l'exécution d'un mouvement ou de son imagination par un sujet que nous appellerons événement par la suite. Lorsque l'événement est terminé, on observe une ERS (event-related synchronization), c'est-à-dire une synchronisation des neurones au sein du cortex moteur, ceux-ci fonctionnant alors au même rythme. Puisque les neurones travaillent de manière coordonnée, la résultante de leurs signaux est importante par résonance. On observe alors un signal fort à ce moment au niveau de l'électrode. Lors de la survenance de l'événement et avant celui-ci, on note l'apparition d'une ERD (event-related desynchronization). Les neurones se désynchronisent alors et le

signal résultant est considérablement amenuisé. Les événements décrits précédemment (ERD et ERS) sont principalement observés dans les bandes de fréquence mu et beta. Ainsi, pour traiter un signal dont on souhaite découvrir une activité musculaire réelle ou imaginée des bras, on pourra filtrer le signal pour ne conserver que ces deux bandes de fréquence et essayer d'observer le motif cérébral décrit précédemment.

Les motifs cérébraux tels que le rythme sensorimoteur sont intéressants car ils permettent aisément de distinguer un état cérébral précis : ils sont donc utiles pour aider à la classification des signaux EEG.

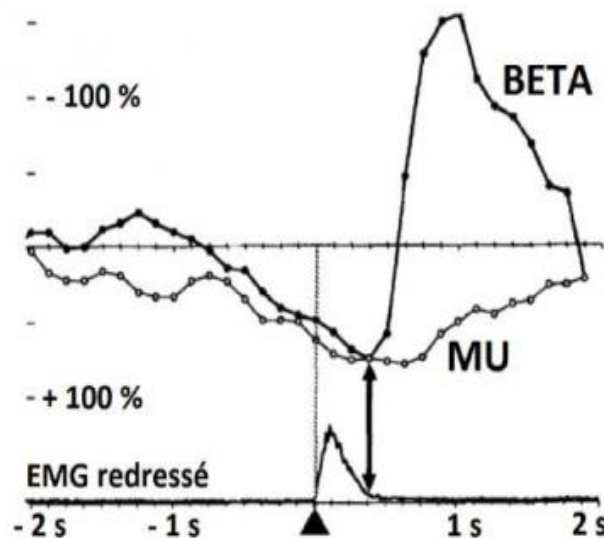


Figure 2.3.4.1 : Illustration du rythme sensorimoteur dans les bandes beta (16-24 Hz) et mu (8-12 Hz)

b. Filtrage spatial

Le filtrage spatial repose essentiellement sur des manipulations matricielles des données d'entrée. Il s'agit ici d'opérer une sélection sur les électrodes afin de cibler celles susceptibles de contenir du signal utile (par exemple, pour capter un mouvement du bras on ciblera les électrodes situées près du cortex moteur). Ces filtres permettent également de maximiser le rapport signal sur bruit.

Ce travail de filtrage dans l'espace des signaux recueillis est largement facilité par le fait que le positionnement des électrodes sur la tête d'un sujet est soumis à une nomenclature internationale nommée 10-20 dans le cas de l'OpenBCI. Il est alors possible de savoir aisément quelles électrodes sont pertinentes pour l'étude d'un état mental particulier en se référant à la littérature existante sur le sujet.

De plus, un filtre régulièrement utilisé dans les applications BCI est le filtre Laplacien. Il consiste à soustraire au signal de l'électrode souhaité la moyenne des signaux des électrodes environnantes. Il permet ainsi de considérablement débruiter le signal en provenance d'un canal en éliminant notamment l'activité mentale de fond.

Voici ci-contre [Figure 2.3.4.2] une illustration de principe du filtre Laplacien. Sur ce schéma, l'électrode C3 est soumise à un filtrage établi sur la moyenne des électrodes FC3, C5, CP3 et C1. La valeur finale de l'électrode C3 est donc $C3 = 4 \cdot C3 - FC3 - C5 - CP3 - C1$.

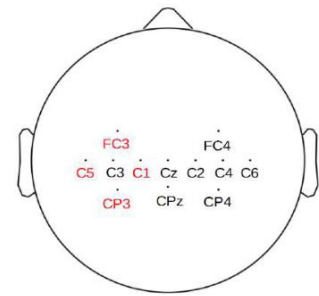


Figure 2.3.4.2 : Exemple de filtre Laplacien autour de l'électrode C3.

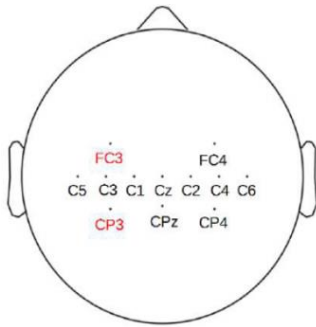


Figure 2.3.4.3 : Exemple de filtre bipolaire autour de l'électrode C3.

Il existe également une version plus rudimentaire nommée filtre bipolaire [Figure 2.3.4.3]. Il s'agit, pour une électrode donnée, de calculer une valeur de signal en s'appuyant sur le différentiel entre le signal de l'électrode suivante et de celui de l'électrode précédente.

Le schéma ci-dessous explicite le concept du filtre bipolaire. La valeur de signal calculée pour C3 est alors simplement égale à $FC3 - CP3$.

Un dernier filtre spatial très souvent utilisé dans le cadre des BCI est le filtre CSP (Common Spatial Patterns). Il s'agit d'un filtre nécessitant un apprentissage supervisé et donc des données d'entraînement EEG annotées.

Ce filtre sélectionne les zones du cerveau, et donc les électrodes, les plus adaptées pour traiter un état cérébral cible. Il s'agit alors de trouver les filtres spatiaux correspondant aux extremums de la fonction suivante :

$$J(f) = \frac{f^t S_1^t S_1 f}{f^t S_2^t S_2 f} = \frac{f^t \Sigma_1 f}{f^t \Sigma_2 f},$$

En effet, de cette manière les filtres spatiaux mis en place permettront de maximiser la variance pour une classe donnée et la minimiser pour une autre classe (dans le cas d'un problème à deux classes). Il sera donc bien plus aisé pour une intelligence artificielle ou même à l'oeil nu de distinguer les deux mouvements.

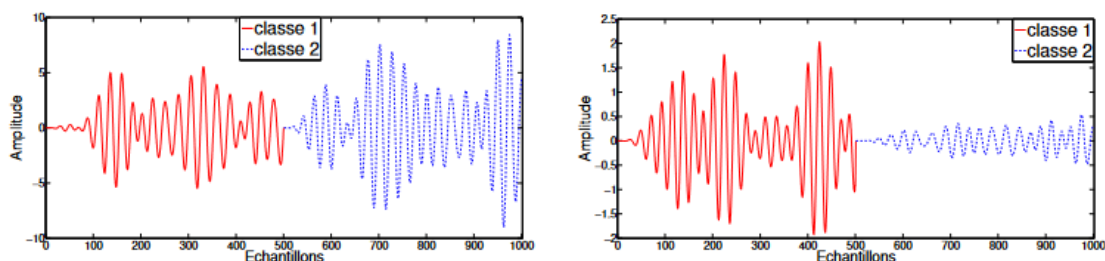


Figure 2.3.4.3 : Exemple d'application d'un filtre CSP : le signal non traité est présenté à gauche et le signal traité à droite. On observe bien que la classe 1 a une variance plus élevée que la classe 2 avec le filtre CSP.

2.3.5 Résultat obtenu

Actuellement, nous avons réussi à développer en Python plusieurs solutions de traitement du signal.

Tout d'abord, nous avons réalisé un programme permettant d'extraire les données EEG issues du dataset BCI Competition 2008 2a contenant les 288 essais de 9 sujets ayant réalisé des essais de lever de la main gauche, de la main droite, du pied et des mouvements de la langue. Ce programme permet alors de formater ces données et de les mettre à disposition de toute autre application python souhaitant les exploiter. Nous avons ainsi utilisé les données de ce jeu de données tout au long de cette partie afin d'évaluer et de tester nos algorithmes de traitement du signal.

La première solution de traitement développée est assez classique mais efficace et permet de traiter des signaux en vue de l'obtention de caractéristiques pour les mouvements imaginés de la main.

Il s'agit de la mise en place d'un filtre fréquentiel passe-bande dans les domaines de fréquence 8-12 Hz (bande bêta) et 16-24Hz (bande mu). Nous avons également mis en place des filtres spatiaux Laplaciens autour des électrodes C3 et C4 correspondant aux cortex moteurs droit et gauche.

Enfin, dans cette méthode, l'extraction de caractéristiques est réalisée par un moyennage temporel précédé par une mise au carré du signal pour estimer sa puissance.

Avec cette méthode, nous sommes désormais capables de traiter de bout en bout le signal et de fournir un vecteur de caractéristiques exploitable pour une IA.

Les graphiques ci-dessous montrent respectivement le signal EEG brut d'un essai de mouvement imaginé de la main gauche pour le sujet A05T sur l'électrode C3 et le vecteur de 100 caractéristiques issu de celui-ci.

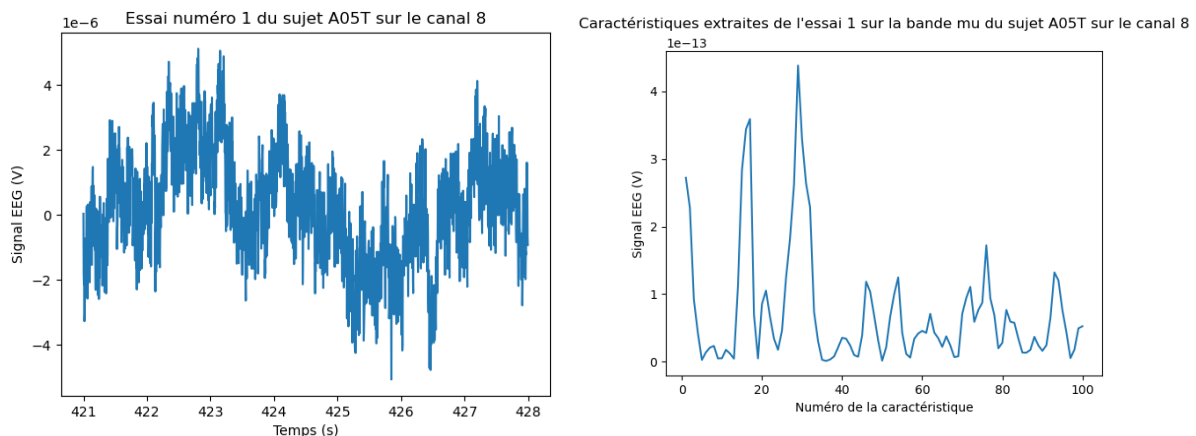


Figure 2.3.5.1 : L'un de nos premières applications de traitement obtenu

Cependant, cette première approche est, selon la littérature, loin d'être optimale vis-à-vis de l'ensemble des outils actuels de traitement du signal. Nous avons ainsi dans un second temps exploré la librairie MNE, qui est spécialisée dans le traitement des données physiologiques et notamment des EEG. Nous avons ainsi développé un programme Python permettant de filtrer les données et afficher l'état cérébral d'un sujet donné. L'image ci-dessous montre le résultat pour le sujet A01 du jeu de données.

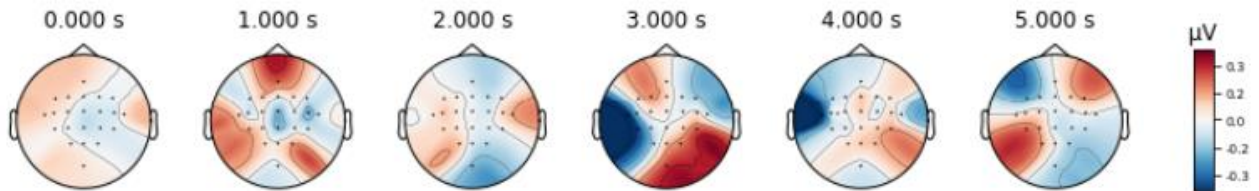


Figure 2.3.5.1 : Visualisation de l'état cérébral moyen du sujet A01 durant l'expérimentation

Cette librairie nous a également permis de mettre en place pour un sujet donné un filtre CSP (Common Spatial Patterns). Il s'agit d'un filtre spatial dit adaptatif, c'est-à-dire qu'il est calculé dynamiquement pour un sujet et permet de sélectionner les aires cérébrales les plus appropriées pour extraire des informations ciblées (dans notre cas l'imagination motrice).

Voici ci-dessous à titre d'exemple les patterns CSP calculés pour le sujet A01 du jeu de données précédemment décrit. Ils montrent les aires cérébrales décrites comme plus appropriées pour la classification de signaux issus de l'imagination motrice pour ce sujet.

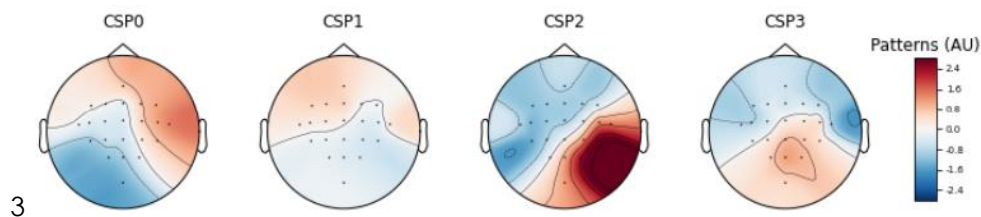


Figure 2.3.5.2 : Pattern de filtre CSP calculés pour le sujet A01 sur les données d'entraînement du dataset BCI Competition 2a

2.4 Classification de signaux

2.4.1 Les recherches qui ont déjà été menées

L'exploitation des EEG n'est pas une tâche aisée. En effet, si pour une personne un certain signal EEG correspond à une action simple comme lever le bras droit, cette même action sur une personne différente donnera un signal différent de la personne précédente, qui dépendra de l'architecture interne du cerveau de chacun. Préparer et mettre en œuvre un modèle de classification universel est donc compliqué si ce n'est pas impossible.

De nombreuses recherches ont été menées, et nombreuses sont les recherches toujours en cours, et de nombreuses techniques et méthodes ont été trouvées pour permettre une classification des signaux EEG dans un cadre "universel", qui soit compatible avec une grande partie de la population. Une de ces alternatives est de pré-étalonner le classificateur avec des données jugées communes pour la plus grande majorité de la population, qui ne varient pas trop d'utilisateur en utilisateur, et de compléter l'étalonnage avec des données propre à cette personne.

C'est le cas d'un casque neuronal orienté jeux vidéo qu'est le "NextMind" [Figure 2.4.1.1], un petit boîtier qui vient se placer derrière la tête [Figure 2.4.1.2] et qui permet de récupérer certains signaux EEG que les concepteurs ont jugé importants juste à



Figure 2.4.1.2 : Le NextMind en place

l'arrière de la tête de l'utilisateur car c'est dans cette zone du cerveau qu'on y retrouve la reconnaissance de forme et des couleurs, principalement. Ce dispositif nécessite une phase de calibration qui est exécuté une fois le logiciel PC démarré, qui va montrer des



Figure 2.4.1.1 : Le NextMind

paternes clignotants à l'écran et qui va lire la réponse du cerveau quand l'utilisateur se concentre sur ce paterne. Une fois la calibration terminée, le NextMind va afficher si la calibration est excellente ou passable et proposer de l'entraîner à nouveau.

Le principal problème du NextMind est qu'il n'est pas Open Source, il ne peut être utilisé en dehors de son utilisation prévue par ses créateurs, et il ne couvre pas l'intégralité du schéma d'acquisition des données EEG sur le crâne comme le serait un casque comme l'OpenBCI qui utilise le système 10-20 [Figure 2.2.2.4]. Il serait impossible de récupérer quelconque jeu de données avec le NextMind, et si un tel jeu de données existait, il ne serait ni normalisé, ni en quantité suffisante.

Un laboratoire de recherches militaires, le United States Army Research Laboratory (ARL) a publié un modèle d'IA utilisant un réseau de neurones convolutif (CNN) déjà entraîné et prêt à l'utilisation ainsi que des jeux de données qui vont avec. Ces données sont dans le même format que notre casque, le Système 10-20, et le modèle de l'IA inclut son propre étage de traitement du signal.

Certains modèles de classifieur ont été développés en utilisant la technologie des réseaux de neurones, tandis que d'autres ont été développés selon des technologies de classifieurs statistiques plus basiques comme le Random Forest Classifier (RFC) qui consiste à créer un arbre de décision selon certaines caractéristiques de la donnée. Cet arbre est purement statistique et ne demande pas une grande puissance de calcul, mais est beaucoup moins polyvalent

que les réseaux de neurones. En règle générale, les réseaux de neurones sont plus efficaces et modulables que les classifieurs statistiques.

2.4.2 Les datasets disponibles

Un des jeux de données les plus employés et le plus connu est le BCI Competition, et notamment le BCI Competition 2008 qui permet d'obtenir les résultats les plus fiables, même à ce jour en 2022. Le BCI Competition 2008 contient une énorme quantité de signaux EEG ou EMG pour quasiment toutes les applications possibles connues à ce jour.

Pour pouvoir entraîner et tester notre classifieur pour notre projet, nous allons devoir réaliser nos propres jeux de données. Mais le casque n'étant pas encore totalement prêt à l'exploitation, nous n'avons pas encore pu réaliser nos propres datasets dans un cadre bien défini et fixé pour uniformiser les données.

2.4.3 Nos résultats préliminaires

Dans le but de trouver le meilleur algorithme de classification des données, nous avons mis à l'épreuve des classifieurs statistiques et des réseaux de neurones. Dans un premier temps, nous avons testé le RFC pour avoir une idée de base, ce dernier étant facile à mettre en œuvre. Nous avons établi 4 sorties possibles pour le moment :

- Mouvement imaginé de la main droite
- Mouvement imaginé de la main gauche
- Mouvement imaginé du pied
- Mouvement imaginé de la langue

Dans l'évaluation d'un classifieur, le minimum acceptable est l'aléatoire, c'est à dire quand le modèle prédit un événement avec la même chance que s'il choisissait totalement aléatoirement. Dans notre cas, l'aléatoire est défini pour une précision de 25%, ou 0,25. Nous avons également décidé d'utiliser le dataset BCI Competition 2008 2a, qui regroupe des signaux EEG de 9 participants sur les classes définies précédemment.

Nous avons défini notre RFC avec une profondeur maximale de 7 (qui nous donnait les meilleurs résultats) et les signaux EEG ont été traités en amont via une analyse discriminante linéaire (ADL) et nous avons obtenu des résultats corrects, mais pas exploitables [Figure 2.4.3.1] : La moitié des sujets ont vu leurs signaux être classé comme aléatoires, tandis que les autres ne sont pas beaucoup plus précis. Seul les sujets 1 et 3 ont une précision de plus de 50%.





Nous avons donc tenté de mettre en place un modèle à base de réseaux de neurones, et nous avons choisi de combiner le modèle de l'ARL avec le BCI Competition 2008 2a. Nous n'avons pas encore de résultats bien établis, mais les premiers retours ainsi que les premières prédictions de l'IA nous montrent qu'il est possible d'obtenir de bien meilleurs résultats qu'avec le RFC. Le modèle est toujours en phase d'entraînement et nous pourrons commencer l'exploitation bientôt.

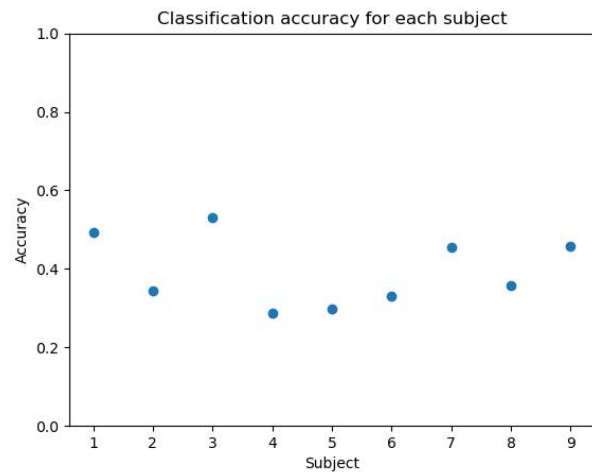


Figure 2.4.3.1 : Précision du RFC selon les sujets du BCI Competition 2008 2a

2.5 Interface Homme-Machine

2.5.1 Logiciel tiers

Nous allons dans cette première partie étudier les applications existantes permettant d'interfacer les données physiologiques récupérées à l'aide d'une interfaces cerveau-ordinateur.

a. OpenBCI GUI

Cette application permet de visualiser les données physiologiques récupérées et de les transmettre à d'autres applications et outils. Les signaux de chaque électrode s'affichent ainsi qu'une vue 2D du dessus du crâne avec les zones actives du cerveau.

Elle est gratuite, open source et disponible en version MAC, Windows et Linux. Elle est régulièrement mise à jour avec un délai moyen de 1 à 3 mois entre deux versions.

Nous avons essayé l'application OpenBCI GUI sans les électrodes. L'acquisition de la carte fonctionne et nous permet de visualiser les données reçues [Figure 2.5.1.1].

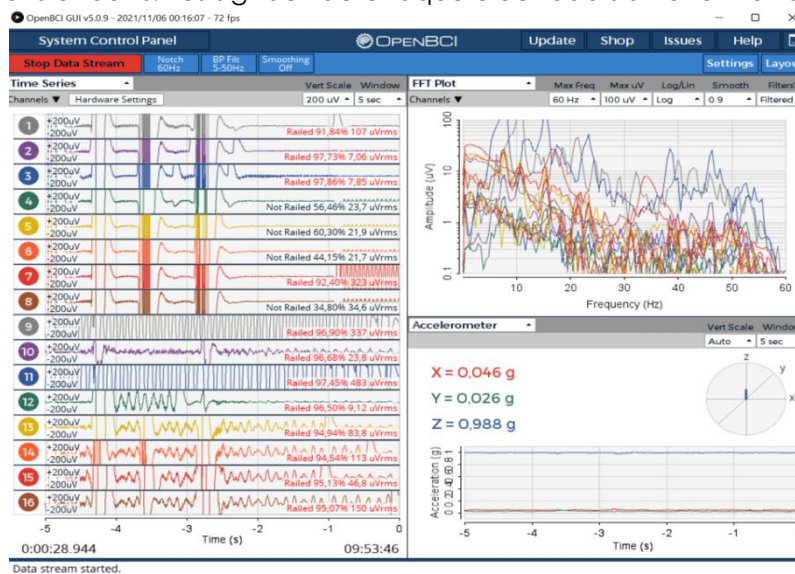


Figure 2.5.1.1 : Interface de OpenBCI GUI avec notre carte sans les électrodes

b. OpenVIBE

OpenVIBE est un logiciel dédié à la conception, au test et à l'utilisation d'interfaces cerveau-ordinateur.

OpenVIBE est un logiciel pour le traitement en temps réel des signaux cérébraux. Il peut être utilisé pour acquérir, filtrer, traiter, classer et visualiser les signaux cérébraux en temps réel. Il comprend également un outil pour l'analyse hors ligne ou pour les grands ensembles de données.

Elle est gratuite, open source et disponible en version Windows et Linux. Elle est mise à jour avec un délai moyen de 2 à 5 mois entre deux versions.

c. Neuromore

Cette application permet d'afficher en temps réel des signaux électroencéphalographiques et de les traiter. Elle permet également de créer facilement des applications interactives de neuro- et bio-feedback et d'analyser des données en utilisant une interface graphique de type glisser-déposer. Elle est gratuite, open source et disponible en version Windows et Linux.

Neuromore prend en charge des interfaces neuronales telles que les cartes OpenBCI, Notion de Neurosity ou encore Muse d'Interaxon, mais aussi les moniteurs de fréquence cardiaque et d'autres dispositifs Bluetooth.

La plateforme est composée de 3 grandes parties : le Studio, le Moteur et le Cloud de Neuromore. Le Studio est l'interface graphique dans laquelle nous pouvons construire l'application. Le traitement du signal se fait par une interface graphique, de type glisser-déposer, qui permet de relier les différents blocs entre eux. Parmi ces blocs, on peut utiliser des algorithmes complexes pré conçus à paramétrer, comme la transformée de Fourier rapide. Le Studio permet également d'accéder à la partie logique de l'application en conception, en définissant les interactions avec l'utilisateur et des conditions.

Nous avons tenté d'utiliser Neuromore pour notre projet comme on peut le voir ci-dessous, cependant nous ne pouvons pas personnaliser les blocs comme nous en avons besoin ni l'exporter selon nos attentes. Dans le cadre de notre projet, il est tout de même possible d'utiliser Neuromore par exemple pour l'acquisition et le stockage de jeux de données de signaux électroencéphalographiques.

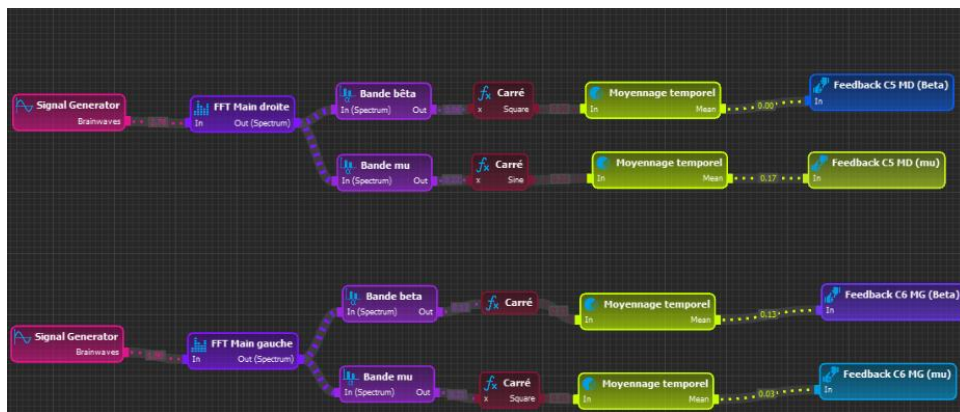


Figure 2.5.1.2 : Traitement du signal pour notre projet à l'aide des blocs proposés par l'interface Neuromore Studio

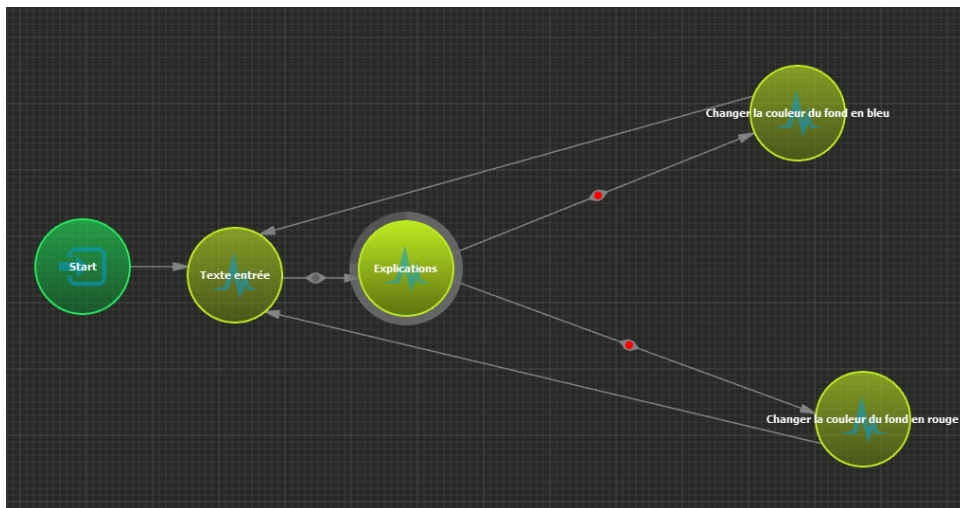


Figure 2.5.1.3 : Partie logique de Neuromore Studio pour gérer l'interface utilisateur

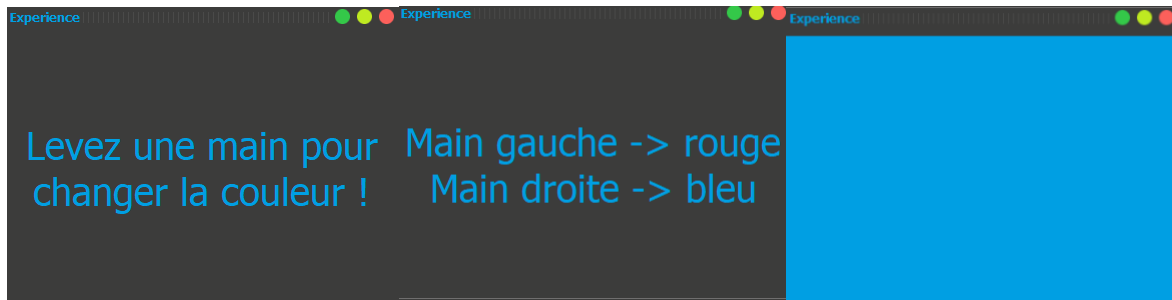


Figure 2.5.1.4 : Interface utilisateur issue de la partie logique de Neuromore Studio

2.5.2 Domaine d'application

Une application relativement récente des interfaces cerveau-ordinateur est la biométrie électroencéphalographique dans le domaine de la sécurité. Il s'agit de méthodes basées sur la récolte de signaux cérébraux afin d'authentifier une personne.

En effet, des chercheurs de l'université de Binghamton aux États-Unis ont développé un prototype d'application permettant d'identifier une personne à l'aide d'enregistrements EEG lors de l'observation d'une image et en se basant sur les ERP (event-related potentials). Selon eux, il serait possible notamment d'exploiter ce type d'application pour assurer une double authentification pour l'accès à des sites sous très haute sécurité, comme par exemple les salles de lancement d'armes nucléaires aux États-Unis.

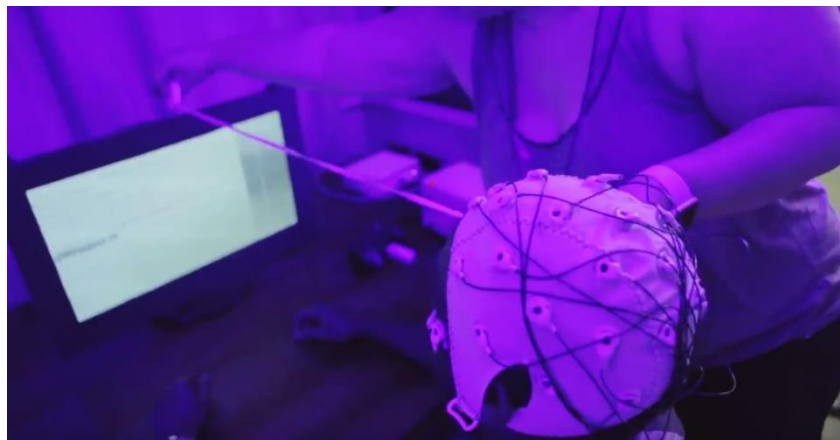


Figure 2.5.2.1 : Expérience des chercheurs de l'université de Binghamton

Il existe également des applications médicales des BCI, par exemple des éditeurs de texte fonctionnant avec une interface neuronale. En effet, des chercheurs de l'université de Stanford ont développé une application innovante visant à permettre à des personnes souffrant d'un handicap d'écrire via une interface cerveau-machine.

Pour écrire avec cette application, l'utilisateur doit penser à une lettre de la même manière que s'il l'avait écrite à la main. Le logiciel est alors capable de détecter la lettre à laquelle l'utilisateur pensait et ainsi l'écrire.

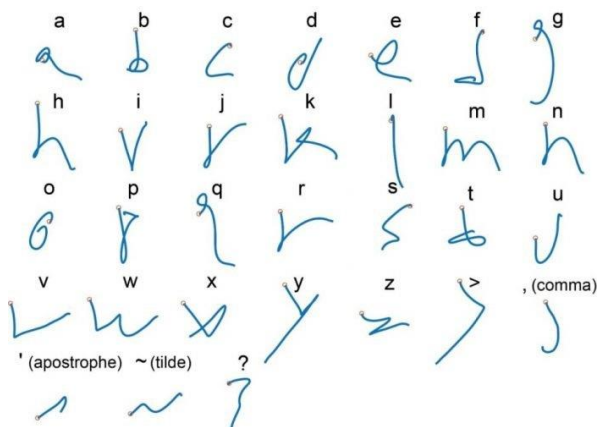


Figure 2.5.2.2 : Alphabet issu de l'imagination de l'utilisateur et correspondances

Cette application particulièrement novatrice exploite des réseaux de neurones artificiels afin de classifier les signaux en provenance d'un vaste réseau de capteurs disposés sur la tête du volontaire. L'intérêt principal de cette BCI est sa vitesse d'écriture et ses performances de classification : elle a été testée sur un homme ne pouvant utiliser sa main en raison d'une lésion à la moelle épinière. Les chercheurs ont recueilli une précision brute de 94.1% et une vitesse d'écriture de 90 caractères par minute, soit seulement 25 caractères de moins que des personnes de même âge utilisant leur smartphone pour écrire les mêmes éléments.

De telles interfaces cerveau-machine pourraient permettre à l'avenir à des personnes souffrant de handicaps moteurs majeurs de recouvrer une partie de leurs fonctions motrices et sont donc particulièrement porteuses d'espoir pour ces dernières.

2.5.3 Logiciel équivalent

Nous étudions dans cette partie les applications de jeux-vidéo existantes développées pour interfacer un casque neuronal OpenBCI. Cela nous permet de nous rendre compte de ce qu'il est possible de faire et ainsi de déterminer l'application que nous pouvons et souhaitons réaliser.

"Use-the-Force !" est un jeu-vidéo dont le but est de contrôler un vaisseau spatial à l'aide seule d'un casque neuronal. Le joueur doit imaginer un mouvement de son pied droit ou gauche, ce qui provoque une élévation du vaisseau spatial affiché à l'écran.

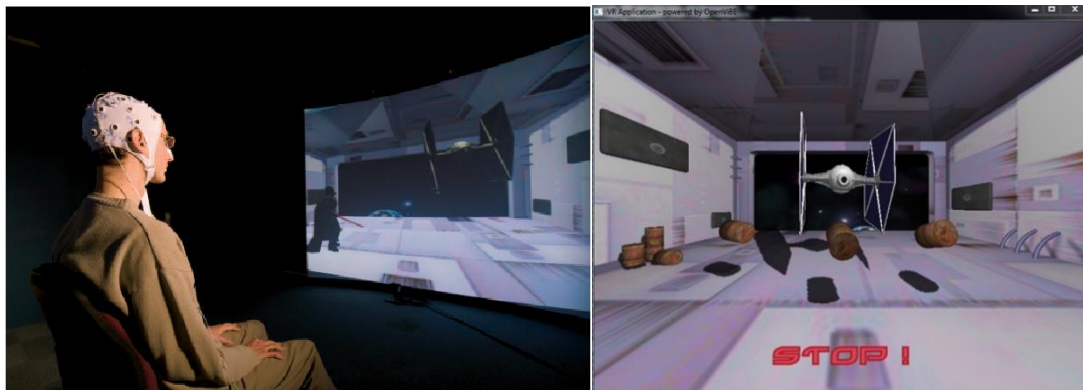


Figure 2.5.3.1 : Un utilisateur élève le vaisseau spatial du jeu "Use-the-Force !" à l'aide de mouvements imaginés du pied

Le jeu vidéo "BrainArena" utilise quant à lui les mouvements imaginés de la main droite et de la main gauche. Le but ici est de marquer des buts situés à droite et à gauche de l'écran, en imaginant un mouvement de la main droite ou de la main gauche. Ce qui est particulièrement intéressant ici est le fait que deux joueurs jouent simultanément, chacun étant équipé d'un casque neuronal. Ils peuvent ainsi jouer en coopération ou bien l'un contre l'autre.



De plus, deux expériences sur ce jeu ont été menées afin d'évaluer les performances et l'expérience utilisateurs dans les deux conditions. Dans un premier temps, le joueur joue seul, dans un second temps il joue en collaboration avec un second joueur. Cette expérience a montré que les conditions multi-joueurs sont significativement préférées, en termes de plaisir et de motivation, par rapport à un jeu solo. La performance de certains utilisateurs a même été drastiquement améliorée dans le cas de jeu en multi-joueur.

Figure 2.5.3.2 : Deux utilisateurs jouant à "BrainArena" en collaboration ou en compétition en imaginant des mouvements des mains pour marquer des buts

Les sujets les plus performants ont été impliqués dans une seconde expérience, en multi-joueur mais ici en compétition l'un contre l'autre. L'expérience a suggéré que les conditions de compétition et de collaboration peuvent conduire à des performances et des motivations similaires. Cependant, les expériences de jeu correspondantes peuvent être perçues différemment par les participants. Dans l'ensemble, les résultats suggèrent que les applications BCI multi-utilisateurs peuvent être opérationnelles, efficaces et plus engageantes pour les participants.

2.5.4 Conception de l'application

a. Principe de l'application

Nous avons déduit de nos recherches qu'il est possible d'acquérir et d'utiliser des signaux correspondants à un mouvement imaginé de la main gauche et de la main droite. Cela nous permet d'avoir un déplacement gauche droite dans l'application à développer.

Ayant deux casques à notre disposition, nous avons pensé à les faire interagir ensemble avec une même application, en compétition, pour avoir un aspect plus ludique et de meilleures performances comme nous l'avons vu précédemment. Nous avons ainsi pensé au classique jeu Pong, où les deux joueurs ont simplement à déplacer leur plateforme respective sur la droite ou la gauche pour intercepter la balle afin d'éviter de voir le score adverse s'incrémenter.

b. Développement de l'application

Nous avons décidé d'utiliser Unity pour développer notre jeu Pong en 2D. L'interface est volontairement simple pour que les joueurs aient toute leur attention sur le déplacement de leur plateforme. Le joueur de droite utilise les flèches directionnelles droite et gauche pour déplacer sa plateforme tandis que le joueur de gauche utilise la touche Q pour gauche et D pour droite. Lorsque la balle rencontre une plateforme, elle rebondit dessus vers le joueur opposé. Elle rebondit également sur les bordures en haut et en bas de l'écran. Si elle touche le bord droit ou gauche, le score du joueur opposé est incrémenté d'un point.

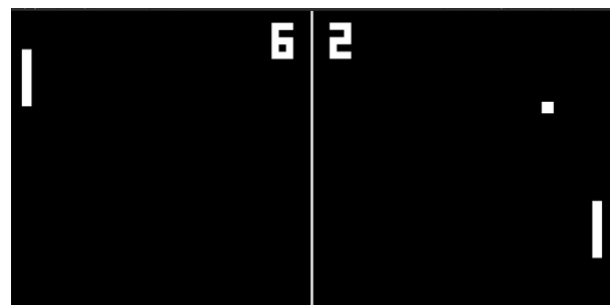


Figure 2.5.4.1 : Notre interface Pong développée sur Unity, chaque plateforme représente un joueur, chacune se déplace à l'aide de deux touches clavier respectives



c. Liaison entre l'application et le programme Python

La librairie "keyboard" de Python permet de simuler des pressions de touches de clavier. Ainsi, lorsque l'IA détecte un mouvement imaginé de la main droite pour le joueur de gauche, elle va utiliser ce module pour simuler la pression de la touche avec `keyboard.press_and_release('D')`. De même, pour un mouvement imaginé de la main gauche c'est la touche Q qui est "pressée" par `keyboard.press_and_release('Q')`. L'application Pong prendra en compte cette action et déplacera ainsi la plateforme en conséquence, comme lorsque l'on joue directement au clavier.

Cette librairie fonctionne sur les systèmes d'exploitation Windows et Linux.



Chapitre III : Prévion & avenir

3.1 Perspectives

Ce semestre nous a permis de découvrir les technologies liées aux interfaces neuronales dans les domaines des systèmes embarqués, de l'intelligence artificielle, du traitement du signal et du développement d'application. Nous avons ainsi pu approfondir nos connaissances théoriques dans des domaines largement pluridisciplinaires et avons développé plusieurs applications sous Python et Unity.

Au prochain semestre, nous devons œuvrer à mettre en commun le travail réalisé, notamment regrouper le travail de développement réalisé par les groupes de travail sur les systèmes embarqués (API d'acquisition de signaux en temps réel), sur l'intelligence artificielle (classifieur LDA et réseau de neurones convolutif) et sur le traitement du signal (traitement temps réel du signal avec le filtrage spatial et temporel). Ceci nous permettra alors de pouvoir disposer d'une chaîne de traitement complète allant de l'acquisition des signaux EEG à leur classification au niveau logiciel (instructions données à l'utilisateur, décompte...).

Au niveau de la partie systèmes embarqués, il faudra mettre en place et assembler le second casque neuronal. La partie logicielle semble cependant finalisée mais elle pourra être améliorée si des axes d'amélioration sont trouvés au fur et à mesure de l'avancement du projet.

Le traitement du signal pourra également être amélioré en essayant d'implémenter de nouveaux filtres adaptatifs et en essayant de nouvelles méthodes d'extraction de caractéristiques (par exemple en calculant la variance du signal sur une fenêtre temporelle glissante). Il sera à ces fins possible d'exploiter beaucoup plus la librairie MNE, qui est spécialisée dans le traitement des signaux électroencéphalographiques.

L'intelligence artificielle pourra se révéler plus efficace si nous menons une étude portant sur l'optimisation des hyperparamètres utilisés et sur la structure des réseaux de neurones utilisés. Il sera également possible d'utiliser plusieurs types de classifieurs en parallèle afin de réaliser plusieurs classifications sur un même signal et procéder à un vote à la majorité : cette méthode pourrait ainsi permettre de réduire considérablement le risque d'erreur. Il sera aussi nécessaire de mener une étude comparative des performances de classification de chaque solution développée grâce à des indicateurs statistiques tels que la précision, la matrice de confusion ou encore le score kappa (indiquant à quel point la précision est éloignée du hasard et évaluant donc par conséquent la qualité de la classification).

En ce qui concerne le jeu vidéo que nous développons afin d'exploiter notre interface cerveau-ordinateur, nous devons réaliser des menus permettant notamment de charger un profil utilisateur (afin de limiter les besoins en calibrage de l'application) ou encore de modifier certaines options. Nous pourrons également implémenter un système de score et retravailler l'aspect graphique du jeu. En effet, à l'heure actuelle, le jeu est similaire au jeu classique Pong et dispose d'une interface très simpliste (un curseur par joueur sur un fond noir). Si cette interface simple permet au joueur de se concentrer sur les déplacements de sa plateforme, dans le cas où les performances des joueurs sont satisfaisantes, il sera alors possible de refaire l'interface afin d'ajouter des couleurs et des textures voire même de la profondeur si le temps nous le permet.

Enfin, si nous réussissons à finaliser notre jeu vidéo basé sur la reconnaissance de l'imagination motrice, il sera intéressant d'essayer de développer une autre interface cerveau-ordinateur exploitant d'autres types de signaux électroencéphalographiques. Par exemple, il





sera possible d'exploiter le potentiel évoqué P300 par exemple. Cette nouvelle interface cerveau-ordinateur pourra également prendre la forme d'un jeu vidéo ou alors pourra se présenter sous une forme bien plus simple.

3.2 La JPO de l'ENSIM

Nous allons partager notre expérience que nous sommes venu à la journée portes ouvertes de l'ENSIM qui prendra place le 26 février 2022. Le but est de présenter notre projet aux visiteurs, son objectif et son avancement au jour de la présentation. Des affiches et une courte vidéo apporteront des informations sur le projet, des membres de l'équipe seront présents pour discuter du projet avec les visiteurs.

Nous mettrons en place un stand avec deux casques fonctionnels de taille moyenne et petite. Le jeu Pong que nous avons réalisé sera diffusé sur la table tactile Windows de l'ENSIM. Idéalement, en fonction de notre avancement, les deux joueurs pourront prendre place de part et d'autre de la table, chacun équipé d'un casque préalablement installé par des membres de l'équipe.



Conclusion

Nous avons eu l'occasion de renforcer nos compétences pluridisciplinaires et de comprendre l'architecture complète d'une interface neuronale directe. D'un point de vue global, ce projet nous a permis de progresser sur notre manière d'appréhender d'un travail de groupe orienté R&D.

Ce projet nous a également donné l'opportunité d'expérimenter la gestion de projet à l'échelle d'un groupe de 8 personnes ce qui fut enrichissant. On a pu rencontrer des difficultés mais grâce à l'investissement de chacune des personnes, nous avons réussi à surmonter sans problème en interne.

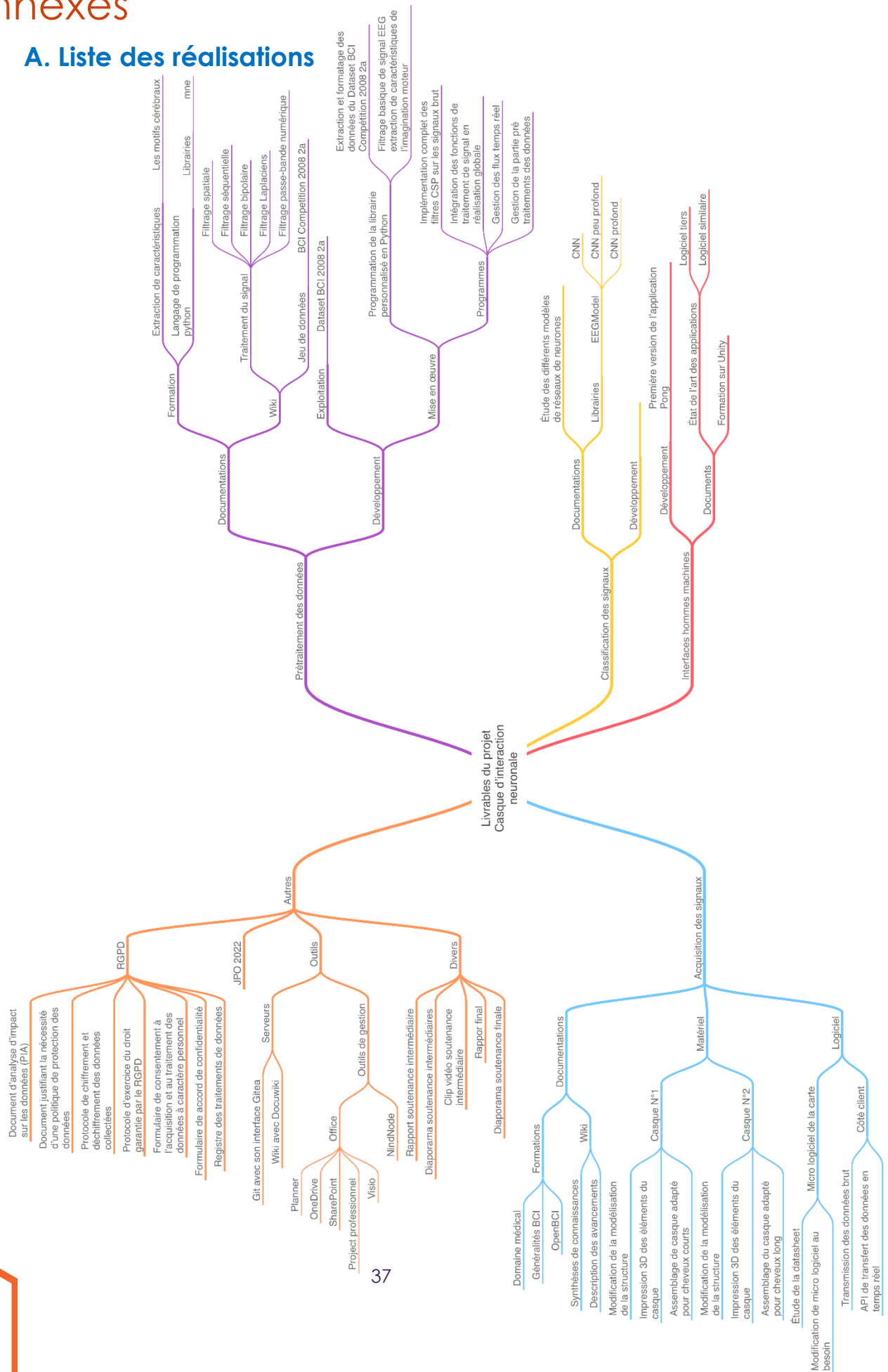
Lors de ce projet nous avons pu découvrir l'outil d'OpenBCI qui est très intéressant avec des points forts inaliénables. L'objectif du prochain semestre sera donc de finaliser notre application afin, dans l'idéal, de disposer d'une interface neuronale directe complète d'ici la fin du projet tout en proposer une documentation détaillée pour les prochaines équipes qui auront la chance de travailler sur ce type de matériel.

Néanmoins, nous avons tout de même remarqué que le casque possède pour le moment plusieurs points négatifs. Ces-derniers ne sont pas très explicités à cet état d'avancement du projet. C'est pour cela que nous vous les partagerons lors dans notre rapport final si cela est réellement le cas.

Pour conclure, ce semestre fut très intéressant car il nous a permis de découvrir, en complément des domaines abordés dans nos différentes options de cycle ingénieur en informatique, un secteur innovant et extrêmement enrichissant. Ceci nous a permis d'enrichir notre culture scientifique dans une multitude de domaines qui ne seront pas, ou peu, abordés au cours de notre formation à l'ENSIM.

Annexes

A. Liste des réalisations



B. Analyse d'impact sur la protection des données (PIA) - Projet 4A - Casque d'interaction neuronale : exploration

Cette page répertorie l'analyse d'impact sur la protection des données personnelles (ou PIA pour Privacy Impact Assessment) réalisée entièrement par notre équipe pour le projet. Nous nous sommes appuyés sur le logiciel PIA développé par la CNIL dans l'objectif de rendre accessible au plus large nombre la rédaction d'un PIA.

Contexte

Vue d'ensemble

Quel est le traitement qui fait l'objet de l'étude ? Au cours de ce projet d'assemblage et d'exploitation d'une interface neuronale, nous serons amenés à acquérir des signaux électro-encéphalographiques de collaborateurs de l'équipe projet ou de volontaires de l'ENSIM.

L'équipe projet est composée de 8 étudiants-ingénieurs de l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans (ENSIM) : Jessy Lebrun, Estelle Ganot, Alexis Nain, Tom Pouderoux, Kevin Zemsi Mbengmo, Aristide Bourry, Adrien Danis et Dylan Jacquot.

Les signaux sont acquis au moyen d'un casque OpenBCI. Celui-ci est composé d'un set de 16 électrodes réparties à la surface du cuir chevelu des volontaires. Les signaux bruts sont alors envoyés vers un ordinateur afin d'y être analysées.

Ces signaux seront ensuite utilisés pour entraîner un programme d'intelligence artificielle afin de déduire l'état mental du volontaire à un instant donné parmi ceux visés par notre application.

Les états mentaux recherchés sont définis en amont de l'acquisition et sont décrits le plus précisément possible aux volontaires.

L'ensemble constitué des signaux électro-encéphalographiques et des états mentaux prédits constitue alors un jeu de données qui sera conservé sur accord des personnes concernées.

Ce traitement va ainsi nous permettre de nous familiariser avec les technologies d'interface neuronale et donc de compléter notre formation d'ingénieurs.

De plus, elles nous permettront de développer une application innovante de type jeu vidéo implémentant une interface neuronale.

Il permettra enfin à l'école de disposer à l'avenir d'une documentation suffisante afin de permettre la réutilisabilité du matériel OpenBCI et son utilisation pour les futures générations d'élèves-ingénieurs de l'école. Quelles sont les responsabilités liées au traitement ? Lors des expérimentations menées en collaboration avec des volontaires lors de ce projet, le responsable de traitement est l'équipe projet "Casque d'interaction neuronale : exploration".

Nous avons désigné Dylan Jacquot comme responsable de la protection des données personnelles pour ce traitement. Il aura la responsabilité de rédiger, en collaboration avec l'équipe, les différents documents attendus pour être en conformité avec le RGPD.

De plus, l'équipe projet est placée sous la direction de Jessy Lebrun qui est le responsable de la bonne exécution de celui-ci sur toute l'année universitaire 2020-2021.

Tous les autres membres de l'équipe projet, à savoir Estelle Ganot, Alexis Nain, Aristide Bourry, Adrien Danis, Tom Pouderoux et Kevin Zemsi Mebengmo pourront également être amenés à interagir avec les données acquises lors du traitement.

Enfin, ce projet est réalisé sous la supervision de deux enseignants-référents de l'ENSIM : Mme Catherine Cléder et M. Kais Hassan. Ils sont nos correspondants réguliers au sein de l'école et encadrent notre projet de son début à son terme. Quels sont les référentiels applicables ?

Étant donné qu'il se déroule dans le cadre d'une formation d'ingénieurs au sein de l'ENSIM, l'ensemble des membres de l'équipe projet ont accepté de respecter le règlement des études de l'ENSIM adopté par le Conseil d'administration du 20 Avril 2021.

Ainsi, un manquement grave aux dispositions de ce règlement pourrait entraîner des sanctions disciplinaires envers les personnes responsables de ce manquement.

Évaluation : Acceptable
Commentaire d'évaluation : Toutes les informations nécessaires pour avoir une vue globale du traitement des données opéré semblent décrites de manière claire dans cette partie.

Données, processus et supports

Quelles sont les données traitées ? Les principales données collectées au cours de ce projet sont les données électro-encéphalographiques issues des 16 électrodes d'un casque OpenBCI sous la forme d'un flux de valeurs de l'ordre du microvolt numérisées et acquises à la fréquence de 250Hz.

Les signaux d'entrée sont ainsi l'ensemble des valeurs acquises par chaque électrode pendant toute la durée de l'expérimentation. Ils sont ensuite traités par un ensemble d'algorithmes de traitement du signal.

De plus, une donnée prédictive est produite au cours du processus. L'algorithme d'intelligence artificielle prédit en effet l'état mental du volontaire et le stocke afin de créer un jeu de données par volontaire.

Selon la volonté de ce-dernier, ces données pourront être stockées sous la forme d'un jeu de données. Dans le cas où il ne donne pas son accord tacite, les données ne seront conservées que le temps de l'expérience.

Enfin, des données à caractère personnel sont récoltées sur les volontaires. De manière exhaustive, ces données sont le nom, le prénom et la date de naissance du volontaire. Ces données sont récoltées lors de la signature du formulaire de consentement et ne seront utilisées que pour que les participants puissent exercer leurs droits à la rectification, à l'effacement ou encore à la portabilité.

Les données récoltées seront alors conservées jusqu'à la formulation par le volontaire d'une demande de destruction des données le concernant.

Il est à noter que les destinataires exclusifs des données récoltées sont les membres de l'équipe projet et ce uniquement à des fins de recherches dans le cadre de la formation d'ingénieurs

de l'ENSIM. Les enseignants-référents du projet seront autorisés à y accéder sur leur demande et sous certaines conditions. Comment le cycle de vie des données se déroule-t-il (description fonctionnelle) ? Les données électro-encéphalographiques sont acquises grâce aux électrodes du casque OpenBCI.

Ces données sont ensuite transmises de manière sécurisée à une machine distante qui aura pour rôle de réaliser le traitement du signal entrant ainsi que l'entraînement ou l'utilisation de l'intelligence artificielle.

Les données d'entraînement de l'intelligence artificielle sont alors couplées aux étiquettes de celles-ci (c'est-à-dire leur nature, par exemple "Mouvement imaginé de la main gauche") et sont finalement stockées en sur le serveur de données de manière sécurisée.

Elles seront ainsi archivées et pourront être réutilisées ultérieurement toujours dans un objectif pédagogique.

Un retour visuel est par ailleurs présenté à l'utilisateur selon l'état mental déterminé par notre application. Quels sont les supports des données ? Les données seront conservées sur un serveur de données. Celui-ci est couplé avec un serveur de backup afin de réaliser une sauvegarde régulière des informations enregistrées.

Après la fin du projet, une copie des données pourra être conservée par l'ENSIM sur accord de la personne volontaire ayant participé à l'enregistrement. Les données seront alors conservées uniquement à des fins pédagogiques pour former d'autres étudiants de l'école.

Évaluation : Acceptable
Commentaire d'évaluation : Les données traitées et les modalités de traitement sont clairement définies ici, cette partie semble donc acceptable en l'état.

Principes fondamentaux

Proportionnalité et nécessité

Les finalités du traitement sont-elles déterminées, explicites et légitimes ? Le traitement est réalisé dans l'unique but de permettre une montée en compétences des élèves-ingénieurs de l'ENSIM dans le domaine des interfaces cerveau-machine.

Dans ce cadre, l'objectif du projet est de réaliser une application ludique exploitant les signaux électro-encéphalographiques. Le traitement permet la validation de celle-ci en situation réelle.

Aucun traitement qui ne rentre pas dans le cadre strict de la prédiction des mouvements imaginés pour réaliser cette application ne sera opéré.

Quel(s) est(sont) les fondement(s) qui rend(ent) votre traitement licite ? Avant chaque enregistrement de données électro-encéphalographiques, un formulaire de consentement est soumis aux volontaires qui sont invités à en prendre connaissance. Le fondement juridique du traitement est donc le consentement de la personne concernée.

Ce formulaire de consentement décrit la finalité de récolte des données et demande au volontaire la permission de conserver ses données électro-encéphalographiques à des fins pédagogiques et de recherche uniquement.

Il informe également le volontaire de ses droits relatifs aux données à caractère personnel le concernant conformément au Règlement Général sur la Protection des Données.

De plus, les personnes en contact avec les données (membres de l'équipe projet) ont l'obligation de signer un accord de confidentialité avant toute manipulation des données électro-encéphalographiques.

Cet accord prévoit notamment l'interdiction de conserver une copie ou l'original des données électro-encéphalographiques, de partager ou vendre quelque information que ce soit relevant des mesures réalisées ou des données prédites par le système et d'utiliser les données électro-encéphalographiques à des fins ne correspondant pas exactement à la prédiction d'un mouvement imaginé dans le cadre du projet.

Il est important de savoir que ce projet s'inscrit dans un cadre pédagogique et donc dans la politique de formation d'ingénieurs de l'ENSIM. Nous nous sommes de plus engagés au travers d'un contrat pédagogique passé avec l'école à réaliser un projet de quatrième année. Ce projet nous a alors été attribué par l'école et les données récoltées sont indispensables au test et à l'évaluation de notre application finale.

Les données collectées sont-elles adéquates, pertinentes et limitées à ce qui est nécessaire au regard des finalités pour lesquelles elles sont traitées (minimisation des données) ? Les jeux de données disponibles en ligne constituent une base pour un projet tel que celui-ci mais ne sauraient être suffisants. En effet, les signaux électro-encéphalographiques sont très différents d'un individu à l'autre et d'un essai à l'autre, il est donc très important d'être en capacité de tester notre application sur de véritables signaux électro-encéphalographiques en temps réel.

Les données électro-encéphalographiques de volontaires sont donc essentielles pour notre montée en compétence dans ce domaine des interfaces homme-machine. Les jeux de données ainsi créés seront aussi très utiles dans le cadre de l'amélioration de la formation des ingénieurs futurs en cas d'accord donné par le volontaire pour leur conservation.

Nous nous assurons que seules les données pertinentes pour notre application ne soient conservées par filtrage spatial et fréquentiel des signaux électro-encéphalographiques. Effectivement, seuls les signaux issus d'électrodes pertinentes pour détecter un mouvement imaginé seront conservés. Ils seront aussi filtrés dans une bande de fréquence adaptée (par exemple 8Hz-30Hz) afin de ne conserver que de l'information qui pourrait être utile. Ainsi, les signaux finaux conservés sur accord du volontaire ne seront que celles essentielles au fonctionnement de l'application.

De plus, en ce qui concerne les autres données personnelles (nom, prénom et date de naissance), ces données sont strictement nécessaires non seulement afin de permettre l'exercice des droits des volontaires.

Les données sont-elles exactes et tenues à jour ? Les informations captées par les électrodes sont de nature numérique. Ainsi, les données ne peuvent être parfaitement exactes puisqu'elles sont numérisées avant d'être exploitées.

Cependant, nous estimons que la précision des mesures permet d'avoir une appréciation très correcte du véritable signal électro-encéphalographique du volontaire.

En ce qui concerne la prédiction de l'état mental du volontaire, il faut être conscient que les interfaces cerveau-ordinateur sont encore embryonnaires et n'atteignent parfois pas un taux de réussite satisfaisant.

Néanmoins, nous avons comme priorité de développer une application suffisamment efficace pour pouvoir prédire avec une précision fiable l'état mental du volontaire.

Dans tous les cas, une erreur dans la prédiction de l'état mental du volontaire ne lui sera en aucun cas préjudiciable puisqu'elle ne fera l'objet d'aucune prise de décision ne l'affectant ni d'un partage avec des tiers.

Sur demande du volontaire et dans la limite de la durée du projet au cours de l'année universitaire 2021-2022, tout volontaire peut demander à réitérer l'expérience afin de rectifier ou mettre à jour ses données si celles-ci ont été conservées.

Quelle est la durée de conservation des données ? Les données à caractère personnel permettant d'identifier directement le volontaire seront alors conservées jusqu'à l'expression par celui-ci d'une demande de suppression des données. Dans ce cas, les données seront définitivement supprimées sous un délai de 30 jours à compter de la réception de la demande de suppression.

En ce qui concerne les jeux de données, ceux-ci seront effacés à la fin de l'expérience à moins que le volontaire n'autorise expressément la conservation de ceux-ci à des fins pédagogiques lors de la signature du formulaire de consentement.

Dans ce cas, il pourra être envisagé que les données soient utilisées et conservées ultérieurement par l'ENSIM à des fins pédagogiques et de la manière définie dans le formulaire de consentement signé par le volontaire.

Évaluation : Acceptable
Commentaire d'évaluation : Le caractère licite du traitement a été prouvé par le recueil du consentement du volontaire et les finalités sont clairement énoncées. Cette partie est donc acceptable.

Mesures protectrices des droits

Comment les personnes concernées sont-elles informées à propos du traitement ? Les personnes concernées par le traitement sont informées à l'oral par un des membres de l'équipe projet présents pour l'expérimentation.

Ils sont également informés de leurs droits concernant leurs données personnelles ainsi que des finalités du traitement sur le formulaire de consentement qu'ils doivent remplir avant tout enregistrement des données.

Si applicable, comment le consentement des personnes concernées est-il obtenu ? Le consentement des personnes concernées est obtenu par l'intermédiaire de la signature d'un formulaire de consentement papier. Il est imprimé en deux exemplaires dont un sera conservé par l'intéressé et l'autre archivé par l'équipe projet.

Il est important de noter que les personnes volontaires sont informées par écrit et à l'oral de leur droit à retirer leur consentement à tout moment de l'expérimentation, et ce sans avoir à fournir la moindre justification, ainsi que leur droit à déposer une réclamation devant une autorité de contrôle.

Comment les personnes concernées peuvent-elles exercer leurs droits d'accès et droit à la portabilité ? Les personnes concernées par le traitement ont la possibilité d'exercer leur droit d'accès et à la portabilité en contactant par mail le délégué à la protection des données personnelles de l'équipe projet, Dylan Jacquot.

Selon la volonté de l'intéressé, les données personnelles recueillies le concernant lui seront adressées par mail dans un délai de 30 jours maximum à compter de la réception du mail par le responsable de la protection des données personnelles.

Ces données seront fournies sous la forme d'un fichier CSV, qui est lisible aisément même en utilisant un éditeur de texte standard et qui peut être utilisé pour générer, par exemple, des graphiques concernant les données électro-encéphalographiques récoltées.

Afin d'assurer la sécurité du transfert de ces données, nous assurerons le cryptage des données lors de l'envoi.

L'adresse e-mail du responsable de la protection des données personnelles est indiquée dans le formulaire de consentement rempli par les volontaires lors de l'expérimentation.

Comment les personnes concernées peuvent-elles exercer leurs droits de rectification et droit à l'effacement (droit à l'oubli) ? De la même manière que pour exercer leur droit à la rectification et à l'effacement des données, l'intéressé peut contacter par mail le responsable de la protection des données personnelles de l'équipe projet.

S'il souhaite rectifier les données électro-encéphalographiques le concernant (notamment en cas de suspicion d'une erreur d'acquisition), c'est-à-dire réitérer l'expérimentation, la demande sera traitée sous 30 jours et l'intéressé sera recontacté par le responsable de la protection des données personnelles pour convenir d'un rendez-vous afin de refaire un enregistrement dans les mêmes conditions que le premier.

Dans le cas où le volontaire souhaite l'effacement de ses données personnelles, sa demande sera traitée sous 30 jours maximum à compter de la réception du mail par le responsable de la protection des données personnelles, ce après quoi ses données seront détruites si aucune autre nouvelle n'est donnée de sa part.

Comment les personnes concernées peuvent-elles exercer leurs droits de limitation et droit d'opposition ? Les personnes volontaires ont la possibilité d'exercer leurs droits de limitation et d'opposition en contactant le responsable de la protection des données personnelles du projet par mail.

Une réponse lui sera alors fournie dans un délai maximal de 30 jours à compter de la réception du mail par le responsable de la protection des données personnelles.

Les obligations des sous-traitants sont-elles clairement définies et contractualisées ? Aucun sous-traitant n'est employé dans le cadre de ce traitement puisqu'il s'agit d'un projet étudiant.

Cependant, dans le cas où les données seraient cédées à l'ENSIM à la fin du projet, nous serons amenés à rédiger et faire signer un contrat à nos responsables de l'école afin de leur décrire les conditions dans lesquelles elles sont cédées, c'est-à-dire celles dans lesquelles les formulaires de consentement des volontaires ont été signés.

En cas de transfert de données en dehors de l'Union européenne, les données sont-elles protégées de manière équivalente ? Dans le cadre du projet, aucune donnée ne sera transférée en dehors de l'Union européenne.

Évaluation : Acceptable
Commentaire d'évaluation : Les droits garantis par le RGPD sont en mesure d'être respectés grâce au protocole défini dans cette partie. L'ensemble est donc acceptable.

Risques

Mesures existantes ou prévues

Chiffrement

Dès l'enregistrement des données électro-encéphalographiques terminé, nous sauvegarderons sur accord du volontaire les données sous la forme d'un fichier CSV.

Ce fichier sera ensuite encrypté par l'intermédiaire de la version la plus à jour possible d'OpenSSL.

Nous utiliserons ainsi l'algorithme RSA 256 bits afin de protéger les données électro-encéphalographiques des volontaires.

L'utilisation d'un moyen de chiffrement est effectivement autorisée sans déclaration préalable par la loi n°2004-575 du 21 juin 2004 pour la confiance dans l'économie numérique.

De plus, un mot de passe vérifiant des conditions spécifiques (longueur supérieure à 20 caractères, utilisation de chiffres, caractères spéciaux, lettres majuscules et minuscules) sera défini afin d'autoriser chaque déchiffrement des fichiers.

Il sera recommandé de définir un mot de passe supplémentaire sur les fichiers CSV à la lecture de ceux-ci.

Enfin, afin de permettre l'exercice des droits fondamentaux des personnes volontaires, les fichiers CSV seront nommés par une fonction de hashage basée sur le nom, prénom et la date de naissance du volontaire.

Cela permettra, sur sa demande, d'accéder au fichier correspondant à ses données personnelles afin de nous permettre l'export (conformément au droit à la portabilité), la suppression (dans le cadre du droit à l'effacement) ou encore la modification (relativement au droit à la rectification).

La clé publique de chiffrement sera accessible directement sur le serveur de données. Les clés privées et les mots de passe seront conservés sur une clé USB dont une sauvegarde sera réalisée à chaque nouvelle entrée de données électro-encéphalographiques.

Dans la mesure du possible, la communication entre le casque neuronal OpenBCI et la machine distante sera également cryptée si la mesure est jugée nécessaire (notamment s'il est jugé que les mesures mises en œuvre d'origine sur le casque ne sont pas suffisantes pour garantir la protection des données personnelles).

Protection des sites web





Les sites web utilisés de manière collaborative par les membres de l'équipe projet seront passés en https dès que possible afin de sécuriser au mieux la connexion.

Il est aussi nécessaire de s'authentifier afin d'accéder à certaines fonctionnalités réservées aux membres de l'équipe projet ou de modifier certaines parties des sites web.

Gestion des tiers accédant aux données.

Tout tiers souhaitant accéder aux données n'y sera autorisé que si son accès est clairement motivé et nécessaire pour les finalités de notre projet et sous réserve de la signature d'un accord de confidentialité.

Cet accord de confidentialité engage le tiers souhaitant accéder aux données à ne pas vendre, partager ou encore modifier les données électro-encéphalographiques et de ne les exploiter que dans le cadre strict de l'avancée du projet.

De plus, les clés de chiffrement ne seront accessibles qu'à l'équipe projet qui est la seule habilitée à accéder aux données.

Backups locaux

Le serveur de base de données contenant les signaux électro-encéphalographiques traités verra ses informations régulièrement sauvegardées sur un serveur de backup.

Minimisation des données

Les données seront traitées avant d'être enregistrées afin de ne garder que les données pertinentes pour l'expérience et non l'intégralité des données recueillies lors de la collecte.

Deux traitements principaux seront opérés : les filtres spatiaux et fréquentiels. Ils permettront de ne garder que l'information utile pour identifier un état mental bien défini dans le signal.

En ce qui concerne les données personnelles directement identifiantes (nom, prénom et date de naissance) sont uniquement celles nécessaires pour identifier un participant et permettre l'exercice de ses droits.

Journalisation

Chaque traitement sera minutieusement documenté afin de conserver une trace sur les conditions d'enregistrement de celui-ci.

Ainsi, chaque enregistrement de données électro-encéphalographiques donnera lieu à un compte-rendu écrit qui sera conservé, indiquant notamment les personnes de l'équipe projet présentes, les remarques formulées par le volontaire et les heures de début et de fin de l'expérimentation.

Sauvegarde des données

Les données seront sauvegardées régulièrement sur un serveur de backup et les clés seront régulièrement sauvegardées sur une clé USB.



En effet, une sauvegarde sera réalisée chaque semaine à minima et une mise à jour des données du serveur de backup sera opérée pour chaque traitement réalisé.

Maintenance

Le matériel utilisé lors du traitement (casques d'interaction neuronale, serveurs et supports de communication) seront maintenus en cas d'imprévu technique.

Effectivement, l'école peut prendre en charge tout ou partie des frais de remplacement en cas de panne.

Il sera toutefois difficile de remplacer certaines parties coûteuses du casque d'interaction neuronale.

Sécurité physique

Les traitements seront hébergés par le chef de projet. L'accès physique aux serveurs ne sera possible qu'accompagné de lui ou par lui-même.

Pour ce qui est de l'étape d'acquisition des signaux électro-encéphalographiques, elle se déroulera dans une salle de l'école dont l'accès est conditionné à la possession d'une carte d'étudiant de l'école.

L'accès à cette salle sera contrôlé par les membres de l'équipe projet présents sur place pour l'expérimentation.

Traçabilité

Il sera possible de mettre en place un serveur de log (possiblement virtualisé sur le serveur central de base de données) afin de pouvoir tracer un accident et fournir des éléments en cas de problème.

Contrôle des accès logiques

Les données du serveur contenant les données ne seront accessibles que par une connexion par un identifiant et un mot de passe. Il faudra en outre disposer des clés de déchiffrement afin de pouvoir accéder au contenu des fichiers.

Nous nous assurerons de sélectionner un mot de passe offrant une protection face au piratage maximale.

Sécurisation de l'exploitation

Le serveur sera hébergé par l'équipe projet et non en externe ce qui favorise la confidentialité des données et atténue les risques liés à la sous-traitance du matériel informatique.

Sécurisation des canaux informatiques

Un pare-feu pourra être déployé sur le serveur afin de prévenir une cyber-attaque.



De plus, nous pourrions mettre en place un système IDS en entrée du serveur de base de données afin de pouvoir détecter une intrusion. Ainsi, nous pourrions être informés rapidement d'une attaque sur un serveur pour essayer d'y répondre dans les plus brefs délais et minimiser les pertes.

Eloignement des sources de risques

Toutes les personnes n'étant pas sollicitées dans le cadre du projet seront incapables d'accéder aux données.

De plus, le traitement des données ne se fera qu'au sein de l'école et par des personnes (élèves ou enseignants) internes à celle-ci limitant ainsi grandement les risques humains.

Protection contre les sources de risques non humaines

Au sein de l'ENSIM un système d'alarme incendie efficace est en place de manière permanente. Il peut ainsi permettre une intervention rapide des services de secours en cas de problème.

Également, les risques liés aux phénomènes météorologiques et les inondations sont très peu probables en Sarthe, limitant d'autant plus les risques de perte ou de détérioration de données.

Gérer la politique de protection de la vie privée

Le responsable de la protection des données personnelles veillera tout au long du projet au respect des règles et du respect des droits définis par le RGPD. Ainsi, il sera possible de mettre à jour au fur et à mesure notre plan d'action et notre politique "Informatique et libertés" au fur et à mesure de l'avancement du projet.

En effet, il est possible qu'à mesure de l'avancement du projet il soit nécessaire de collecter d'autres données personnelles.

Il sera alors nécessaire de mettre en place toutes les mesures possibles dans le cadre de ce projet et dans la limite du temps imparti pour celui-ci afin de mettre en œuvre une protection des données personnelle maximale.

Intégrer la protection de la vie privée dans les projets

Le projet inclut la protection de la vie privée et des données personnelle parmi les axes de réflexion et d'attention du projet.

Un responsable de la protection des données personnelles a été nommé et une analyse d'impact sur la protection des données a été réalisée avant le début des traitements.

Gestion des personnels

Au cours du projet, le responsable de la protection des données personnelles se chargera de communiquer à tous les membres de l'équipe les bonnes pratiques en termes de protection de la vie privée et de protection des données à caractère personnel.



De plus, les membres de l'équipe auront signé un accord de confidentialité dans lequel ils s'engagent à ne pas conserver l'original ou une copie des données.

Cette clause est valable même après la fin du projet ce qui renforce la sécurité et la confidentialité des données récoltées.

Archivage

Sur accord du volontaire, les données électro-encéphalographiques le concernant seront conservées sur nos serveurs.

L'ENSIM pourra également être amenée à conserver ces données à la fin du projet à des fins pédagogiques pour les promotions futures d'élèves-ingénieurs.

Cette utilisation sera uniquement possible selon des modalités à définir avec l'équipe projet et uniquement dans le cadre strict d'un usage pédagogique et selon les conditions soumises aux volontaires lors de la complétion du formulaire de consentement.

Sécurisation des documents papier

Les documents produits au cours de l'expérimentation (formulaires de consentement et accords de confidentialité complétés) seront conservés dans un coffre sécurisé par un code.

Ils seront également numérisés et sécurisés par la mise en place d'un mot de passe afin de les ouvrir en lecture seule.

Ceci permettra de conserver ces documents sur le long terme tout en minimisant le risque de perte de ceux-ci et en permettant de garder confidentiel les documents attestant de la participation à l'expérimentation.

Organisation de la politique de protection de la vie privée

Au cours de ce projet, une équipe a été constituée afin de veiller au respect de la vie privée et à la protection des données personnelles.

De plus, Dylan Jacquot a été nommé responsable de la protection des données personnelles.

De cette manière, il sera considéré comme le DPD de l'équipe projet au regard du traitement des données personnelles réalisé.

Commentaire d'évaluation : Les mesures définies dans cette partie semblent être suffisantes à l'échelle du projet pour garantir la protection des données personnelles des volontaires et est donc acceptable en l'état. Elle pourra cependant faire l'objet d'ajouts par la suite au cours de l'avancée du projet.

Accès illégitime à des données

Quels pourraient être les principaux impacts sur les personnes concernées si le risque se produisait ? Revente ou partage illicite des données, extraction d'informations sur les personnes (préférences, opinions...) des signaux électroencéphalographiques, acquisition de connaissances sur l'état de santé de la personne concernée



Quelles sont les principales menaces qui pourraient permettre la réalisation du risque ?
Cyber-attaque du serveur de base de données, usurpation d'identité.

Quelles sources de risques pourraient en être à l'origine ?
Équipe projet, proches des membres de l'équipe, personnel de l'ENSIM.

Quelles sont les mesures initiales, parmi celles identifiées, qui contribuent à traiter le risque ?
Chiffrement, protection des sites web, gestion des tiers accédant aux données, minimisation des données, sécurité physique, traçabilité, gestion des personnels, éloignement des sources de risques, sécurisation de l'exploitation, contrôle des accès logiques, sécurisation des canaux informatiques, sécurisation des documents papier.

Comment estimez-vous la gravité du risque, notamment en fonction des impacts potentiels et des mesures prévues ? Limitée, L'accès aux données électroencéphalographiques serait grave pour les personnes concernées puisqu'il serait possible, du moins théoriquement, d'en extraire des informations cruciales sur celle-ci.

Elles peuvent également être considérées comme des données médicales sensibles qui pourraient être utilisées à mauvais escient.

Cependant, les mesures prises au cours du projet, surtout le filtrage des données et leur cryptage, limitent fortement les possibilités d'extraction de telles informations des signaux.

Le risque existe donc, mais est toutefois circonscrit par les mesures de protection prises au cours du projet.

Comment estimez-vous la vraisemblance du risque, notamment au regard des menaces, des sources de risques et des mesures prévues ?
Négligeable : La signature par l'ensemble des personnes accédant aux données d'un accord de confidentialité réduit considérablement le risque qu'une personne interne au projet n'accède de manière illégitime aux données ou en use sans respecter les finalités du projet.

De plus, étant donné l'ampleur très modeste du projet (cantoné au cadre universitaire), il semble peu probable que des personnes malintentionnées aient l'intention de dérober les données.

Modifications non désirées de données

Quels pourraient être les principaux impacts sur les personnes concernées si le risque se produisait ?
Impact limité.

Quelles sont les principales menaces qui pourraient permettre la réalisation du risque ?
Modification des résultats de l'expérimentation, cyber-attaque du serveur de base de données, problèmes techniques divers (fiabilité de la transmission, qualité du support de stockage des données...).

Quelles sources de risques pourraient en être à l'origine ?
Équipe projet, personnel de l'ENSIM, proches des membres de l'équipe.

Quelles sont les mesures, parmi celles identifiées, qui contribuent à traiter le risque ? Backup locaux, gestion des tiers accédant aux données, sécurité physique, sauvegarde des données,

archivage, gestion des personnels, sécurisation de l'exploitation, traçabilité, sécurisation des canaux informatiques, contrôle des accès logiques, éloignement des sources de risques.

Comment estimez-vous la gravité du risque, notamment en fonction des impacts potentiels et des mesures prévues ?
Négligeable : Une modification non désirée des données électroencéphalographiques serait uniquement susceptible d'engendrer des erreurs dans la prédiction réalisée par l'intelligence artificielle et provoquerait ainsi une erreur de jugement sur l'intention initiale du volontaire.

Cependant, ceci aurait essentiellement un impact sur les résultats de l'expérience puisque le résultat de celle-ci n'impactera en aucune façon les participants.

Le risque est donc relativement négligeable pour les participants de l'expérimentation.

Comment estimez-vous la vraisemblance du risque, notamment au regard des menaces, des sources de risques et des mesures prévues ?
Négligeable : Au regard des clauses de l'accord de confidentialité signé par les personnes en contact direct avec les données, il est peu probable qu'une personne ne modifie sciemment celles-ci.

De plus, des problèmes techniques pourraient éventuellement survenir bien que ce soit rare. En effet, les protocoles sécurisés employés opèrent une vérification de l'intégrité des données et le matériel est régulièrement maintenu à jour.

Ce risque apparaît donc plutôt négligeable.

Évaluation : Acceptable
Commentaire d'évaluation : Au regard des mesures présentées (au niveau organisationnel et sécuritaire) pour assurer la protection des données, le risque de modification des données personnelles est acceptable.

Disparition de données

Quelles pourraient être les principales conséquences sur les personnes concernées si le risque se produisait ?
Impact limité.

Quelles sont les principales menaces qui pourraient permettre la réalisation du risque ?
Problème d'ordre technique grave sur les serveurs, cyber-attaque du serveur de base de données.

Quelles sources de risques pourraient-elles en être à l'origine ? Incendie, inondation, équipe projet, personnel de l'ENSIM, proches des membres de l'équipe.

Quelles sont les mesures, parmi celles identifiées, qui contribuent à traiter le risque ? Backup locaux, gestion des tiers accédant aux données, gestion des personnels, archivage, sauvegarde des données, maintenance, sécurité physique, protection contre les sources de risques non humaines, contrôle des accès logiques, sécurisation de l'exploitation, éloignement des sources de risques, sécurisation des canaux informatiques, traçabilité, sécurisation des documents papier.



Comment estimez-vous la gravité du risque, notamment en fonction des impacts potentiels et des mesures prévues ?

Négligeable : La disparition des données pose essentiellement des problèmes pour les organisateurs de l'expérimentation en causant des retards importants. Pour la personne volontaire, cela n'a que peu d'impact.

Comment estimez-vous la vraisemblance du risque, notamment au regard des menaces, des sources de risques et des mesures prévues ?

Négligeable : Le risque d'inondation est relativement faible au Mans donc ce facteur a peu de chances de provoquer une disparition des données.

Les incendies, quant à eux, sont bien plus fréquents et sont susceptibles de survenir dans une salle de serveur bien que cela reste peu probable.

En effet, le serveur de données est maintenu à une température convenable grâce à un système de climatisation approprié, cela limite donc les risques d'incendie.

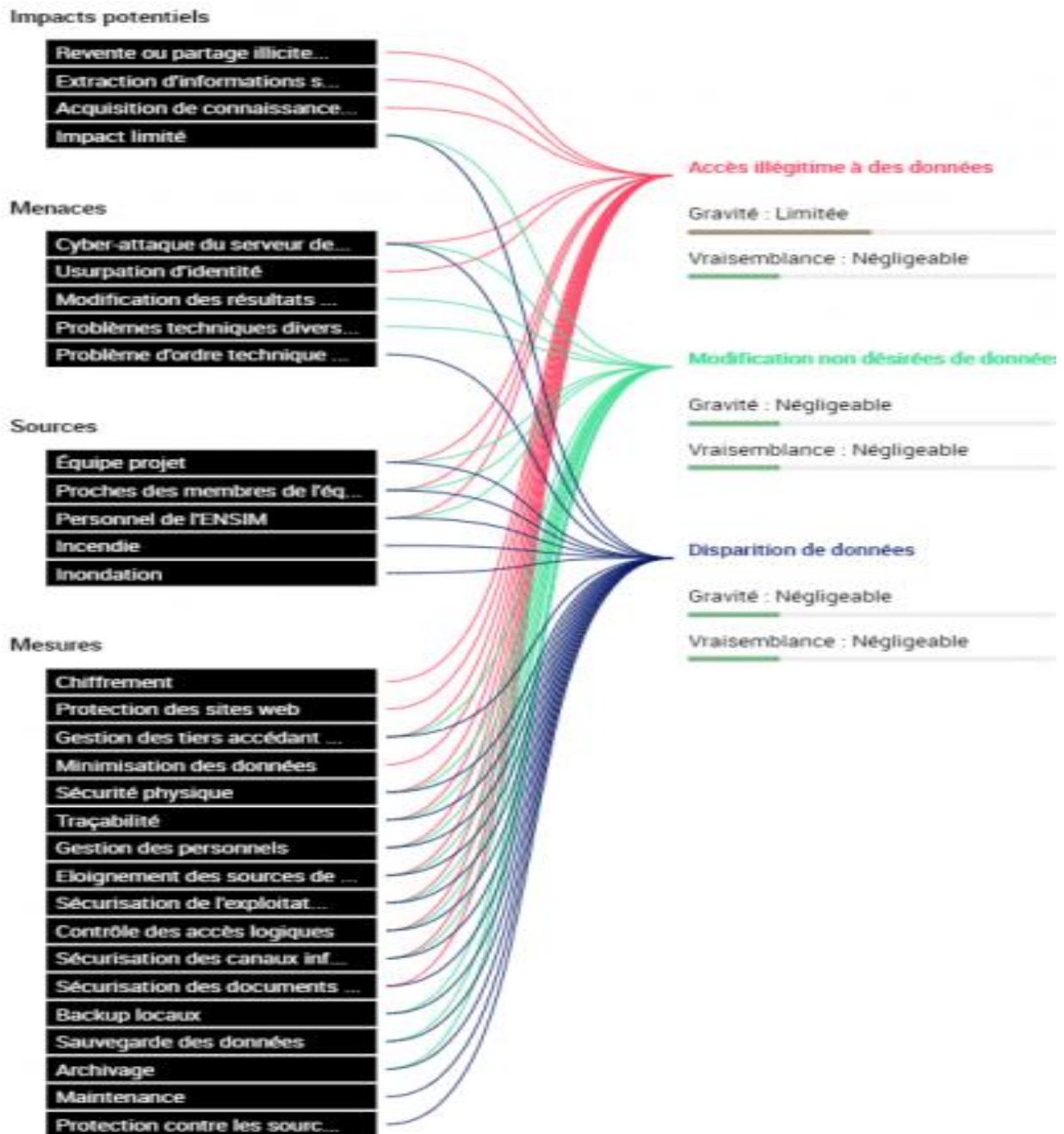
Enfin, les clauses de l'accord de confidentialité signé par tous les individus en contact avec les données minimisent le risque en interdisant une destruction des données non demandée par la personne volontaire pour l'expérimentation.

Évaluation : Acceptable

Commentaire d'évaluation : Au regard des mesures présentées (au niveau organisationnel et sécuritaire) pour assurer la protection des données, le risque de disparition des données personnelles est acceptable.



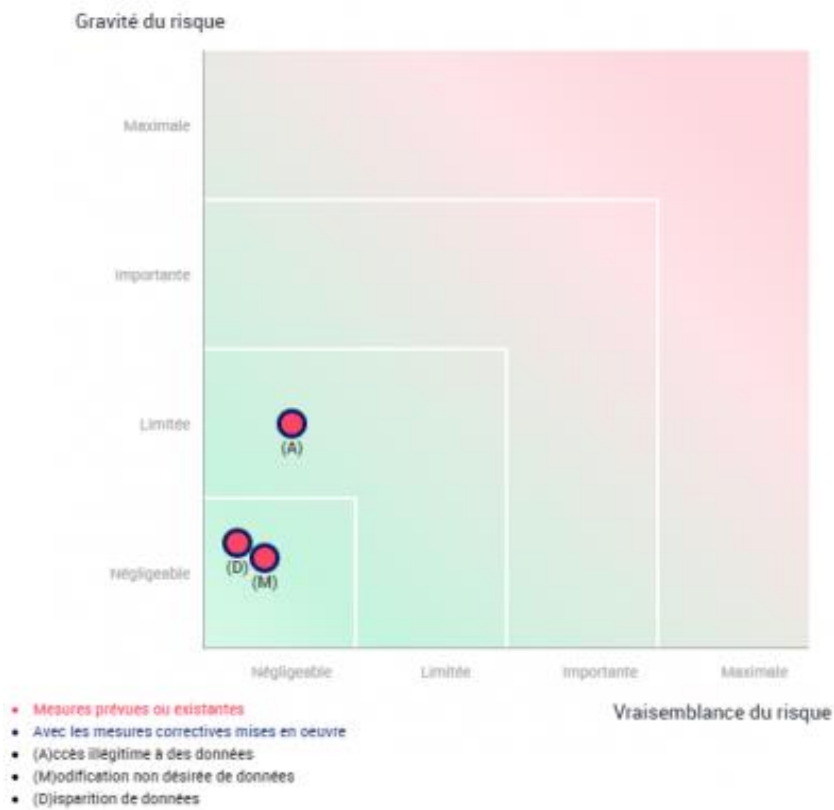
Vue d'ensemble des risques



Graphique reliant les risques liés aux données personnelles à leur gravité

Validation

Cartographie des risques



Graphique présentant les différents risques liés aux données personnelles

Plan d'action

Principes fondamentaux	Mesures existantes ou prévues
Finalités	Chiffrement
Fondement	Protection des sites web
Données adéquates	Gestion des tiers accédant aux données
Données exactes	Backup locaux
Durée de conservation	Minimisation des données
Information des personnes	Journalisation
Recueil du consentement	Sauvegarde des données
Droit d'accès et à la portabilité	Maintenance
Droit de rectification et d'effacement	Sécurité physique
Droit de limitation et d'opposition	Traçabilité
Sous-traitance	Contrôle des accès logiques
Transferts	Sécurisation de l'exploitation
	Sécurisation des canaux informatiques
	Eloignement des sources de risques
	Protection contre les sources de risques non humaines
	Gérer la politique de protection de la vie privée
	Intégrer la protection de la vie privée dans les projets
	Gestion des personnels
	Archivage
	Sécurisation des documents papier
	Organisation de la politique de protection de la vie privée
	Risques
	Accès illégitime à des données
	Modification non désirée de données
	Disparition de données

Plan d'action présentant les mesures prévues en termes de protection des données personnelles

Avis du DPD

Nom du DPD : Dylan Jacquot

Le traitement pourrait être mis en œuvre.

Opinion du DPD :

L'analyse d'impact sur la protection des données personnelles conduite par l'équipe chargée de la protection des données est acceptable en l'état. En effet, elle décrit le traitement, la manière dont les droits et principes fondamentaux du RGPD et de la législation française seront respectés et fourni un ensemble de mesures cohérentes pour permettre la protection des données. Cependant, cette analyse devra être mise à jour au cours du projet en cas d'imprévu ou d'une modification sur l'organisation du traitement des données personnelles.

Recherche de l'avis des personnes concernées : L'avis des personnes concernées n'a pas été demandé.

Raison pour laquelle l'avis des personnes concernées n'a pas été demandé : Le traitement aura lieu beaucoup plus tard dans l'année universitaire. Il n'est pas possible à l'heure actuelle de demander l'avis des personnes concernées.

