HAL
open science

Élaboration d'un protocole permettant l'évaluation de plusieurs types d'imaginations motrices kinesthésiques dans la conception d'une interface cerveau-ordinateur pour la rééducation cérébrale motrice après un accident vasculaire cérébral

Maxime Backes, Julie Billon, Cédric Darrou, Elise Perrot, Sébastien Rimbert, Laurent Bougrain, Stéphanie Fleck

To cite this version:

Maxime Backes, Julie Billon, Cédric Darrou, Elise Perrot, Sébastien Rimbert, et al.. Élaboration d'un protocole permettant l'évaluation de plusieurs types d'imaginations motrices kinesthésiques dans la conception d'une interface cerveau-ordinateur pour la rééducation cérébrale motrice après un accident vasculaire cérébral. [Rapport de recherche] IDMC (Univeristé de Lorraine); LORIA (Université de Lorraine, CNRS, INRIA). 2021. hal-03752006

HAL Id: hal-03752006

https://hal.science/hal-03752006

Submitted on 16 Aug 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Projet Tutoré

2020 - 2021

IDMC et Loria

Élaboration d'un protocole permettant l'évaluation de plusieurs types d'imaginations motrices kinesthésiques dans la conception d'une interface cerveau-ordinateur pour la rééducation cérébrale motrice après un accident vasculaire cérébral

Maxime Backes, Julie Billon, Cédric Darrou, et Elise Perrot

Encadré par Sébastien Rimbert, Laurent Bougrain et Stéphanie Fleck

Remerciements

Nous souhaitons remercier nos encadrants, Sébastien Rimbert, Laurent Bougrain et Stéphanie Fleck de nous avoir permis de découvrir le monde des interfaces cerveau-ordinateur et leur enjeu crucial dans la recherche actuelle et dans la réhabilitation cérébrale motrice à la suite d'un AVC. Nous les remercions pour le temps qu'ils nous ont consacré pendant de nombreuses réunions à nous aider à examiner les articles en lien à notre sujet, mais également les conseils qu'ils ont pu nous apporter tout au long du projet. Enfin, nous les remercions également, malgré les contraintes sanitaires, d'avoir été patients et d'avoir réussi à trouver des solutions pour pouvoir conduire nos expérimentations qui étaient compromises.

Table des matières

1 Présentation du sujet **4**

2 Réalisation du projet **4**

2.1 Élaboration du protocole 4

2.2 Présentation du protocole 5

2.2.1 Définition des tâches d'imagination motrice kinesthésique (IMK) 5

2.2.2 Hypothèses générales de recherche 6

2.2.3 Critères de jugement 6

2.2.4 Mise en place de la salle et du matériel 7

2.2.5 Mise en place et instructions des sujets 8

2.2.6 Fiche de consentement et questionnaires 10

2.2.7 Déroulé de l'expérimentation 11

2.3 Expérimentation 14

2.4 Traitement des données 15

2.4.1 Extraction et intepretation des données 15

2.4.2 Matlab et la toolbox eeglab 16

2.5 Résultats 17

2.5.1 Résultats des matrices de confusion 17

2.5.2 Résultats temps-fréquence par les ERSP 20

2.5.3 Résultats topographiques 23

2.5.4 Résultats des questionnaires 25

3 Discussion **28**

3.1 Différences inter-individuelles, discrimination des conditions Grasp, Pinch et Repos et effet au cours du temps 28

3.2 Interprétation des ERSP et des topographies 29

4 Conclusion **30**

5 Annexes **34**

5.1 Protocole d'apprentissage des imaginations motrices kinesthésique destiné aux sujets de l'étude . 34

5.2 Fiche de recueil de consentement éclairé 34

5.3 Questionnaire sur les informations générales des participants 34

5.4 Questionnaire sur l'état interne du participant 34

5.5 Questionnaire sur la motivation 34

5.6 Questionnaire post-expérimentation : quel ressenti à l'issue de l'expérimentation ? 34

5.7 Document de report des problèmes techniques 34

5.8 Script eeglab 34

5.9 Topographies par seconde, moyennées sur l'ensemble des sujets sur une période de 0 secondes à 9 secondes et dans les bandes de fréquences alpha-mu et bêta pour les conditions Grasp et Pinch sans les électrodes P2 et P4 34

1 Présentation du sujet

L'objectif général du projet est l'évaluation de plusieurs types d'imaginations motrices kinesthésiques (IMK) dans la conception d'une interface cerveau-ordinateur pour la rééducation motrice cérébrale à la suite d'un accident vasculaire cérébral (AVC). À partir de l'interface visuelle Grasp'it présentée dans la partie bibliographie [Rimbert et al., 2020], le but était d'aller au-delà du geste de la fermeture de la main (grasp) en mettant au point un protocole expérimental permettant de vérifier que plusieurs types d'imaginations motrices kinesthésiques (mouvement de pince, supination/pronation et ouverture de la main) sont discriminables dans l'activité électrique cérébrale grâce à la méthode de l'électroencéphalographie (EEG). L'objectif est de discriminer les différents mouvements contre un état de repos et si possible, de les discriminer entre eux. La première partie bibliographique consacrée à l'état de l'art est venue confirmer la possibilité récente de discriminer les mouvements de la main avec un taux de reconnaissance élevé [Chu et al., 2020]. Cependant, cette première partie a également soulevé plusieurs freins à l'obtention de tels résultats. En effet, la question de l'apprentissage de la bonne réalisation des imaginations motrices kinesthésiques et leurs difficultés inhérentes paraît cruciale [Rimbert et al., 2020]. De même, la motivation paraît être un facteur important au bon déroulé des expérimentations ainsi qu'à l'obtention de résultats satisfaisants [Škola et al., 2019]. Cette dernière se définit comme quelque chose, intrinsèque ou extrinsèque, qui pousse les personnes à adopter un certain comportement. Ce type d'expérimentation amène en outre la nécessité d'avoir des connaissances assez précises sur l'état physiologique des sujets, telles que l'influence possible de psychotropes ou encore d'alcool, afin de vérifier que ceux-ci n'ont pas d'effets significatifs sur les données enregistrées. Au vu de ces éléments, l'élaboration d'un protocole expérimental robuste fait émerger d'autres objectifs sous-jacents : produire un protocole d'instruction des sujets qui leur permettra de produire des imaginations motrices kinesthésiques donnant lieu à des variations significatives dans l'activité électrique cérébrale sous forme de patterns ERD/ERS distincts, respectivement "Event-Related Desynchronisation" : désynchronisation dans une bande de fréquences donnée, et "Event-Related Synchronisation" : synchronisation dans une bande de fréquences donnée. Il sera également à la charge du protocole expérimental de contrôler autant que possible la motivation et l'état physiologique des participants afin de s'assurer que ces derniers ne constituent pas de biais dans les résultats. Enfin, le protocole devra aussi permettre de mesurer la maitrise du matériel de l'interface cerveau-ordinateur par les participants de l'étude. Ainsi, ce second dossier retracera notre réflexion sur la réalisation du protocole expérimental, du protocole d'apprentissage ainsi que des moyens de contrôler la motivation et l'état physiologique des participants. Nous viendrons également discuter des séances d'acquisitions de données et de leur traitement pour terminer par nos résultats et nos conclusions.

2 Réalisation du projet

2.1 Élaboration du protocole

L'élaboration du protocole s'est faite à la suite d'une réflexion visant à être en adéquation entre les objectifs du projet et les contraintes inhérentes à celui-ci. Ainsi, il a fallu opérer certains choix qui seront explicités dans la présentation du protocole. Le protocole expérimental de notre étude devra alors comporter les objectifs de l'étude, la définition des tâches motrices et le protocole d'apprentissage de celles-ci, les hypothèses de recherche, les critères de jugements, la mise en place de la salle et des sujets ainsi que leur instruction. Enfin, sera présenté le

déroulé exact de l'expérimentation suivi des différents questionnaires permettant d'évaluer l'état physiologique, la motivation, la maîtrise de l'interface cerveau-ordinateur ainsi que le consentement éclairé des participants.

2.2 Présentation du protocole

2.2.1 Définition des tâches d'imagination motrice kinesthésique (IMK)

Dans la première partie bibliographie, le but du projet était de pouvoir discriminer quatre mouvements : la fermeture de la main (grasp), l'ouverture de la main (anti-grasp), le mouvement de pince (pinch) et le mouvement de pronation/supination de poignet (wrist rotation). Cependant, réaliser un protocole pour ces quatre tâches induit des sessions d'expérimentations de plusieurs jours consécutifs pour chaque sujet de l'étude. D'une part, il aurait été difficile de trouver des participants disponibles plusieurs jours consécutifs. D'autre part, réaliser une expérience sur plusieurs jours pour un même sujet induit des biais puisqu'en effet, il serait impossible pour les sujets de se retrouver exactement dans le même état physiologique d'un jour à l'autre. En outre, l'installation du casque EEG pour l'acquisition des données cérébrales est l'élément le plus coûteux en termes de temps lors des sessions. De ce fait, la meilleure solution était de pouvoir réaliser un protocole expérimental qui se déroulerait idéalement sur une seule journée. La meilleure solution a donc été de ne choisir que deux mouvements parmi les quatre qui étaient initialement prévus.
Pour cette expérimentation, nous avons donc fait le choix de ne garder que le mouvement du grasp (fermeture de la main, présenté en Figure 1) et du pinch (mouvement de pince, présenté en Figure 2). Ce choix s'est opéré, car le mouvement du grasp semble le plus utile pour la rééducation post-AVC ([Cho et al., 2020], [Formaggio et al., 2010]). En effet, ce mouvement vise dans un premier temps à permettre aux personnes présentant une paralysie à la suite d'un AVC, de pouvoir décontracter leurs muscles qui demeurent le plus souvent crispés dans ce type de pathologie. Le mouvement du pinch, lui, est très utilisé dans la littérature scientifique ([Agashe et al., 2016], [Chu et al., 2020], [Ofner et al., 2017]), car il fait appel à la motricité fine. Il semble donc être plus intéressant de discriminer ces deux mouvements plutôt que l'ouverture de la main, ou encore la supination du poignet qui lui n'implique pas les mêmes articulations. En somme, l'interface actuelle Grasp'it se base sur des mouvements et des objets familiers pour faciliter l'apprentissage de la réalisation des imaginations motrices kinesthésiques. Ainsi pour le mouvement de grasp, il est déjà question dans l'interface Grasp'it de tenir une gourde pour permettre au sujet d'imaginer la sensation de la presser. Pour le mouvement de pince retenu dans notre protocole expérimental, le sujet aura en sa possession une clé (maintenue entre son pouce et son index) et devra imaginer les sensations inhérentes au fait de pincer/attraper celle-ci.

FIGURE 1 – Mouvement de fermeture (Grasp)

FIGURE 2 – Mouvement de pincement (Pinch)

2.2.2 Hypothèses générales de recherche

H1 : Il serait possible d'obtenir une bonne discrimination entre les mouvements de grasp et de pinch l'un par rapport à l'autre, mais également chacun contre une période de repos en imagination motrice kinesthésique à partir de l'activité électrique du cerveau [Chu et al., 2020].

H2 : La motivation et l'état physiologique des participants joueraient un rôle important dans l'apprentissage et la réussite d'imaginations motrices kinesthésiques [Škola et al., 2019].

H3 : Un apprentissage de la réalisation des imaginations motrices kinesthésiques est nécessaire pour l'obtention de résultats significatifs [Rimbert et al., 2016].

H4 : Concernant la maîtrise de la BCI, il apparaît que certains gestes peuvent être plus difficiles à produire en imagination motrice kinesthésique que d'autres. L'un des deux mouvements choisis pour l'expérimentation pourrait être plus difficile que l'autre à réaliser en IMK.

2.2.3 Critères de jugement

En ce qui concerne l'hypothèse H1, les critères de jugement porteront sur les résultats de classification (matrices de confusion) ainsi que l'observation des patterns ERD/ERS et les statistiques de significativités associés.

Les hypothèses H2 et H4 seront évaluées par l'intermédiaire des différents questionnaires retenus que nous avons soumis aux participants. Ces derniers seront présentés dans la partie 2.2.6.

Quant à l'hypothèse H3, il est possible de l'évaluer par le biais de l'intensité des patterns ERD/ERS. Cependant, notre étude ne compte pas assez de participants pour la vérifier. Dans cet objectif, il faudrait envisager un groupe bénéficiant de l'apprentissage et un groupe contrôle. Par manque de temps et de participants, mais aussi en raison de la crise sanitaire, ce protocole ne permettra pas de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse au moment où cette seconde partie "réalisation du projet" a lieu. Cela étant, d'autres études viennent appuyer

cette hypothèse [Rimbert et al., 2016].

2.2.4 Mise en place de la salle et du matériel

L'expérimentation nécessite une salle assez grande, bien éclairée et sans bruit pour ne pas venir perturber les sujets lors de celle-ci. Cette dernière devra disposer d'une chaise placée devant un écran (à une distance d'environ 1 mètre), ainsi que de l'interface cerveau-ordinateur opérationnelle. L'interface Grasp'it n'a pas bénéficié du temps nécessaire pour se diversifier sur le plan des feedbacks visuels proposés. Pour y pallier, les photographies des IMKs à réaliser ont été collées sur l'écran, de sorte à cacher la main et la gourde natives à l'interface Grasp'it, mais laisser apparaître le feu tricolore indiquant les débuts et fins des essais. L'interface cerveau-ordinateur fonctionne à partir de la plateforme logicielle OpenVibe. Cette plateforme libre a été conçue pour créer et utiliser facilement des BCI. Elle permet l'acquisition, le traitement et la visualisation de signaux cérébraux. Les scénarios utilisés sont inspirés d'autres travaux de recherche de l'équipe Neurorythms du LORIA, dirigée par Laurent Bougrain. Les scénarios se divisent en trois parties, la première correspond à la réduction de données par filtre "Common Spatial Pattern" (CSP), la seconde concerne la classification grâce à un Linear Discriminent Analysis (LDA) et la dernière, qui n'a été que peu utilisée dans ce projet, correspond à un retour perceptif (feedback) au travers de l'application. Les deux premiers éléments seront discutés en partie 2.4. Dans le cadre de ce protocole, les sujets n'auront donc pas accès à un feedback dynamique, la classification sera alors réalisée "offline", c'est-à-dire en dehors de la session d'expérimentation. Cette absence de feedback immédiat a été choisie pour réduire le temps de la session d'expérimentation qui aurait été trop longue avec deux mouvements. En effet, ajouter le feedback demande des essais supplémentaires dédiés à sa calibration. En somme, le retour d'information n'est pas l'élément essentiel puisque l'objectif général du projet est en premier lieu de pouvoir discriminer les mouvements, même si le feedback améliore significativement les performances dans la maîtrise de la tâche.

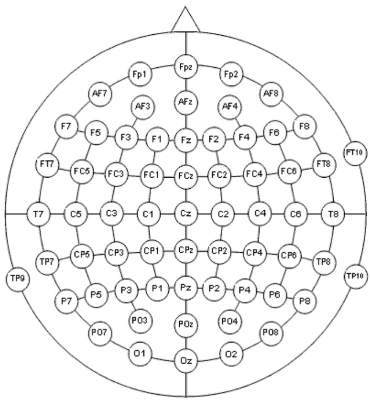

FIGURE 3 – Schéma illustrant le placement des 64 électrodes (issu de [Demin et al., 2016])

Pour l'acquisition de l'activité électrique cérébrale, le système Biosemi Active Two est utilisé. Ce dernier a la particularité d'utiliser des électrodes "actives" dont le but est d'amplifier le signal au niveau de la tête. Le

casque d'électroencéphalographie doit être composé de 64 électrodes (dont le placement est présenté en Figure 3) reliées aux boîtiers et à l'ordinateur qui composent le système Biosemi. Les différents boîtiers sont :

— L'ActiveTwo AD-box (Figure 4) : elle représente le premier relais entre le signal capté par les électrodes et l'interface cerveau-ordinateur. Son rôle est de convertir ces signaux dits analogiques en données numériques ;
— La Receiver Box (Figure 5) : comme son nom l'indique, elle reçoit les données de l'ActiveTwo AD-box. Elle permet de transférer les données EEG à l'ordinateur par le biais d'un câble USB.

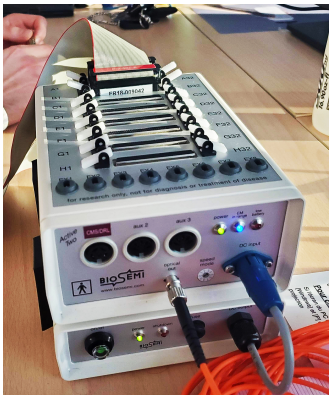

FIGURE 4 – ActiveTwo AD-box

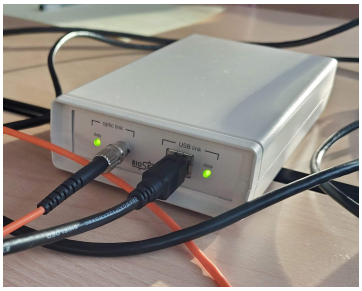

FIGURE 5 – Receiver Box

2.2.5 Mise en place et instructions des sujets

Apprentissage des imaginations motrices kinesthésiques
Quelques jours avant l'expérimentation, les sujets se verront recevoir un protocole d'apprentissage des imaginations motrices kinesthésiques. Cet entraînement pourra être mené en autonomie par le sujet. L'avant-veille ou la veille de l'expérimentation, un rendez-vous à distance (en raison de la crise sanitaire) sera prévu pour parfaire l'entraînement. Ce dernier durera tout au plus 30 minutes.

Comme nous avons pu l'évoquer, l'apprentissage est un facteur important pour permettre d'obtenir des changements significatifs dans l'activité électrique cérébrale par le biais de l'imagination motrice kinesthésique [Rimbert et al., 2016]. Même si le champ applicatif des BCI est en plein essor, il existe peu de données dans la littérature scientifique à propos de l'instruction des sujets concernant l'utilisation du dispositif. Cela constitue donc un point intéressant à approfondir. D'après nos recherches, nous avons trouvé différentes méthodes d'apprentissage. L'étude de Nikulin et al. de 2008, a montré que l'apprentissage progressif passant par la réalisation de quasi-mouvements paraît être une méthode efficace [Nikulin et al., 2008]. Cette méthode d'instruction consiste à produire le mouvement réel tout en réduisant graduellement la force du mouvement jusqu'à ce que celui-ci soit imperceptible, aussi bien à l'œil nu que sur les courbes de l'électromyogramme (EMG). Une autre étude [Vasilyev et al., 2017] demandait aux participants de réaliser un geste à amplitudes et vitesses différentes. Ils avaient pour consignes de porter attention aux sensations physiques (c'est-à-dire somesthésiques) induites par ces mouvements. Les sujets devaient dans un second temps réaliser des IMK en référence aux sensations somesthésiques retenues pendant les mouvements réels. Les IMK devaient être produites en séquence de façon

répétitive. Une dernière approche plus précise combine ces deux précédentes études, mais elle se décompose cette fois-ci en trois étapes [Rimbert et al., 2020]. Les sujets devaient porter attention aux sensations somesthésiques juste après que l'expérimentateur lui-même leur ait présenté les différentes sensations qu'ils pouvaient ressentir. Cela pourrait être par exemple la contraction de certains muscles, des sensations de chaleur ou encore de pression. On peut également trouver des sensations au niveau cutané tel que la perception de granularité des surfaces des objets tenus durant l'expérimentation. Dans un second temps, les sujets de l'étude devaient produire le mouvement demandé tout en réduisant progressivement l'intensité et la force avec lesquels ils le produisaient. Cette étape était vérifiée grâce à la méthode de l'électromyogramme (EMG). Enfin, dans la dernière étape plus spécifique à l'interface Grasp'it, les sujets devaient apprendre à réaliser l'IMK dans un temps donné (correspondant au feu tricolore de l'interface).

Le protocole d'apprentissage destiné aux sujets de l'étude que nous avons conçu est disponible en annexe. Pour le réaliser, nous nous sommes inspirés de ces trois études. Cependant, nous avions la contrainte du distanciel en raison de la Covid-19. En revanche, nous pouvons tirer un avantage à cela, s'entraîner plusieurs jours ou la veille de l'expérimentation permettra aux sujets de mieux intégrer la production d'IMK par rapport à un entraînement réalisé juste avant l'expérimentation. D'autre part, certains articles ont démontré que la vitesse de réalisation des imaginations motrices kinesthésiques avait un impact positif sur l'apparition de patterns ERD ([Gu et al., 2009], [Toriyama et al., 2018]). De ce fait, il est important d'intégrer cette information au sein du protocole d'apprentissage destiné aux sujets. Cependant, dans la littérature scientifique, l'effet d'une plus ou moins grande amplitude des mouvements n'a pas encore été démontré sur les phénomènes ERD/ERS. De ce fait, il serait intéressant de laisser la liberté aux participants de l'amplitude et de les questionner à l'issue de l'expérimentation pour savoir si celle-ci a un impact.

Mise en place de l'expérimentation

Une fois l'entraînement réalisé la veille, le jour de l'expérimentation, les participants de l'étude seront accueillis. A leur arrivée, le déroulé de l'expérience et le dispositif expérimental leur sera présenté. Ils seront invités à donner leur consentement à la participation de l'expérience et à l'enregistrement de leurs données (cette fiche de consentement est disponible en annexe). Ils devront également remplir des questionnaires de pré-expérimentation, présentés dans la partie suivante. Le sujet pourra alors prendre place sur la chaise en face de l'écran, encore éteint à ce stade. La mise en place de l'expérimentation finira par l'installation du casque EEG, qui durera environ 30 minutes (voir Figure 6).

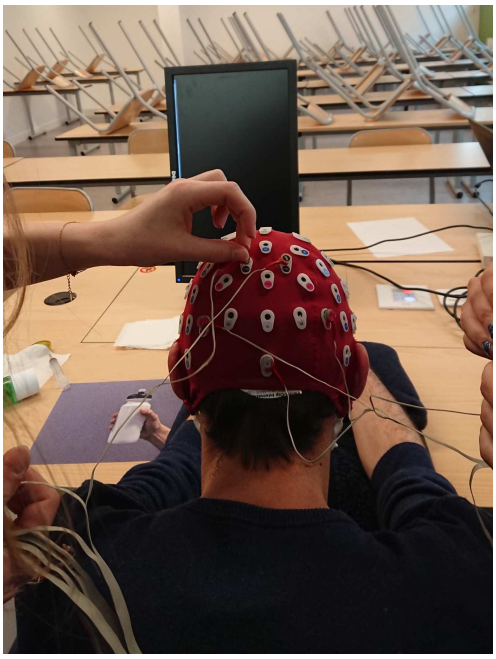

FIGURE 6 – Photographie montrant l'installation du casque et la mise en place du sujet dans la salle.

2.2.6 Fiche de consentement et questionnaires

Avant de participer à l'expérimentation, les sujets devront d'abord remplir une fiche de consentement et plusieurs questionnaires. Il y aura donc des questionnaires pré-expérimentation mais également des questionnaires post-expérimentation.

Fiche de consentement
Le formulaire de recueil de consentement éclairé retrace l'objectif de l'étude, son déroulé (procédure et durée) et la manière dont sont collectées et utilisées les données. Il présente également les risques/inconforts et bénéfices qui peuvent apparaître au cours et à l'issue de l'expérimentation. Enfin, il a pour vocation de rappeler aux participants que leur participation est volontaire et qu'ils sont libres de l'arrêter à tout moment s'ils ressentent un quelconque inconfort. Ce document doit être rempli et signé par les participants.

Questionnaires de pré-expérimentation
Il s'agit ici des questionnaires remplis par les participants avant de débuter l'expérimentation.

Questionnaire sur les informations du participant
Ce questionnaire, présenté en amont de la phase d'enregistrement des données sert à recueillir des informations sur les participants (en dehors de l'utilisation du dispositif) qui pourraient potentiellement avoir une influence sur les résultats. Ce questionnaire est disponible en annexe. Il permet de recueillir l'âge des participants, leur sexe, leur main dominante. En outre, il permet de vérifier s'il y a eu consommation d'alcool ou de psychotropes.

Certains items du questionnaire permettent également d'estimer le niveau d'aptitudes manuelles des participants (facteurs qui peuvent conduire à de meilleurs résultats).

Questionnaire sur l'état interne du participant

Le test d'autoévaluation de l'anxiété - Traits de Spielberger a été employé afin de recueillir l'état interne des participants de l'expérimentation avant de commencer cette dernière. Les résultats de ce questionnaire reflètent l'état général du répondant. Il se compose de 20 questions avec des propositions de réponse sur une échelle de Likert allant de 1 (Non) à 4 (Oui) [Spielberger et al., 1993]. Les questions sont réalisées à partir d'énoncés souvent donnés par les personnes en général. Ce questionnaire est présenté en annexe.

Questionnaire sur la motivation

Présenté en même temps que les deux précédents, il permet de savoir le niveau de motivation des participants car, comme nous l'avons vu, celle-ci joue un rôle important pour l'obtention de résultats satisfaisants. Ce questionnaire a été repris et traduit des travaux de [Škola et al., 2019]. Ce dernier se compose de 18 questions avec des items évaluant l'intérêt, la confiance, la peur et le niveau de challenge face à l'utilisation du système d'interface cerveau-ordinateur. Toutes les questions sont évaluées sur une échelle de Lickert allant de 0 (Pas du tout) à 7 (Complètement). Tout comme les 2 précédents, ce questionnaire est présenté en annexe.

Questionnaire post-expérimentation : quel ressenti à l'issue de l'expérimentation ?

Ce dernier questionnaire, présenté à la fin de l'expérimentation, sert de feedback au bon déroulement du protocole. Il est composé d'une part d'une reprise du questionnaire d'évaluation sur la manipulation d'un dispositif technologique nommé K-USES [Baraudon et al., 2021], il correspond à l'évaluation de la maîtrise de l'interface cerveau-ordinateur par les participants. Ce questionnaire vise à mesurer cinq différents items qui sont l'efficacité du système, la facilité d'apprentissage de l'utilisation de l'interface-cerveau ordinateur, la satisfaction suite à l'utilisation de ce système ainsi que l'efficience de ce dernier. Certaines questions de ce questionnaire ont été retirées car elles n'étaient pas en adéquation avec les objectifs de la présente étude. Ainsi, le questionnaire présenté aux participants de l'étude contient 9 questions dont les réponses se situent sur une échelle de Likert allant de 1 (Pas du tout d'accord) à 5 (Tout à fait d'accord). D'autre part, il est complété par des questions demandant un retour sur les imaginations kinesthésiques demandées (difficulté de production de différents gestes, exploration des stratégies de réalisation mises en oeuvre par le sujet). Ces questions peuvent être posées sous forme d'entretien semi-directif afin de donner toute liberté au participant de l'étude de s'exprimer. Ce questionnaire est disponible en annexe.

2.2.7 Déroulé de l'expérimentation

Une fois le casque EEG installé et les questionnaires remplis, les participants seront placés devant l'interface Grasp'it, avec les photographies des mouvements collés sur l'écran (voir Figure 7). Le sujet recevra pour consigne de rester le plus immobile possible. Il sera à sa charge de caler le bras avec lequel il va réaliser les imaginations motrices kinesthésiques de sorte à être dans une position confortable tout en permettant de rester le plus stoïque possible. Nous nous chargerons d'observer (à la discrétion du sujet) quelconque mouvement pouvant entraîner un biais dans les résultats. L'expérimentation se décomposera en 6 runs de 24 essais chacun. 3 runs sont consacrés à chaque mouvement ce qui équivaut à 72 essais par mouvement.

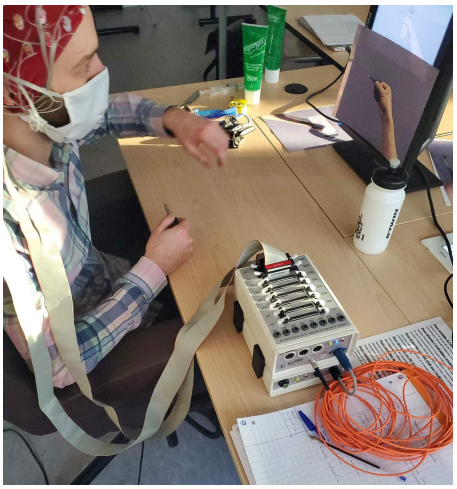

FIGURE 7 – Photographie d'un sujet installé s'apprêtant à se mettre en condition pour commencer un run de mouvement de pince (pinch)

La Figure 8, présente le déroulé pour un essai (d'une durée de 15 secondes). Chaque essai est divisé en plusieurs phases. Ainsi on retrouve une période de repos d'environ 2 secondes suivie d'une phase de préparation au mouvement de 2 secondes également. Ensuite, la phase d'imagination motrice kinesthésique commence et s'étend sur une période de 5 secondes, se terminant par une phase de repos d'environ 6 secondes avant l'essai suivant. Les phases de repos, dont la durée est générée aléatoirement, peuvent diverger d'une à trois secondes d'un essai à l'autre. En effet, il est nécessaire d'insérer une phase aléatoire pour éviter toute anticipation de départ de mouvement suite au changement de couleur du feu. La Figure 9 présente, pour plus de clarté, le déroulé d'un essai en fonction des feux de l'interface Grasp'it sur laquelle notre expérimentation est basée.

FIGURE 8 – Schéma illustrant le déroulé d'un essai

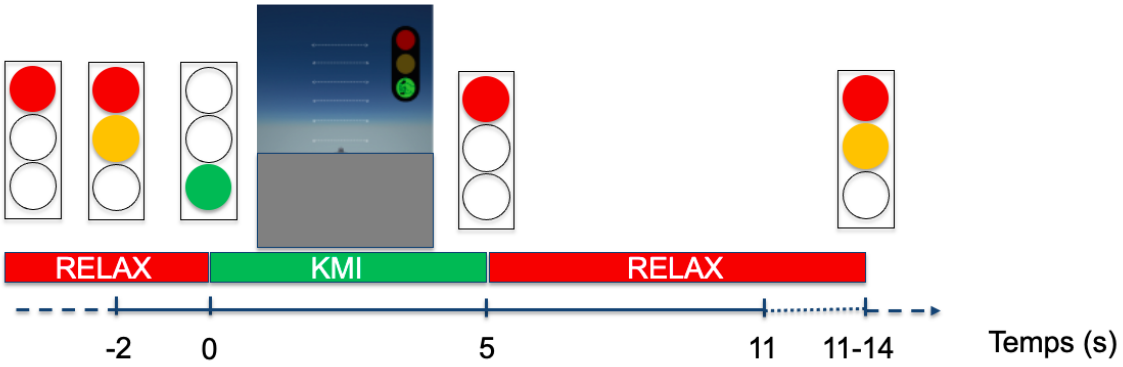

FIGURE 9 – Schéma présentant le déroulé d'un essai illustré avec l'interface Grasp'it (édité par notre encadrant Laurent Bougrain)

La Figure 10 représente la répartition des 6 runs avec les pauses comprises. Les runs des mouvements du grasp et du pinch s'opéreront de manière aléatoire, représentés par "IMK 1" et "IMK 2".

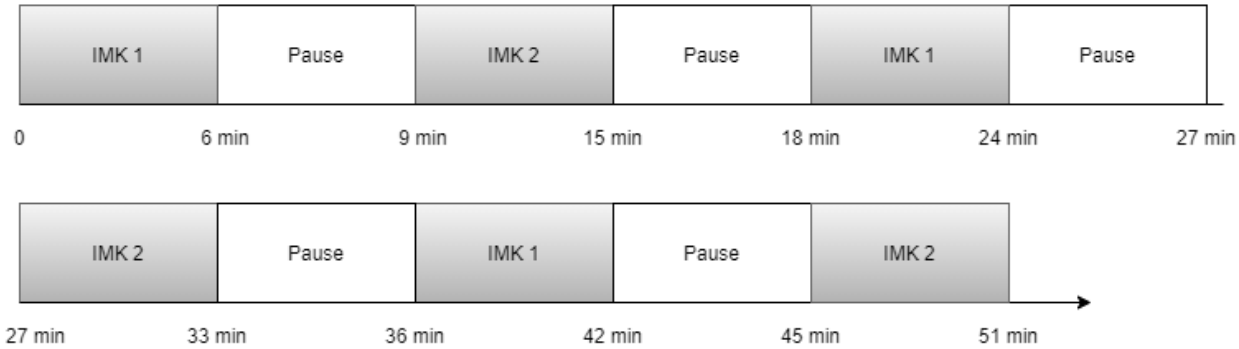

FIGURE 10 – Schéma illustrant le déroulé d'une session avec la répartition des six différents runs

La Figure 11 suivante représente, pour résumer, toutes les étapes de l'expérimentation ainsi que le temps alloué pour chacune de celles-ci. La session d'expérimentation dure alors environ 2h. Cette dernière sera réalisée en une seule session par participant.

FIGURE 11 – Schéma résumant les différentes étapes de l'expérimentation

2.3 Expérimentation

En raison de la crise sanitaire et des contraintes que celle-ci implique, nous n'avons malheureusement pas pu expérimenter notre protocole sur des sujets naïfs. D'autre part, toujours en raison des restrictions sanitaires, nos enregistrements au sein de notre groupe se sont vus également limités. Nous avons pu enregistrer 3 sujets pour notre étude.

Sujets de l'étude

Notre cohorte de sujets se compose de 2 hommes et 1 femme dont la moyenne est de 23.6 ans, allant de 22 à 25 ans. Tous les participants sont droitiers et ne possèdent pas d'expérience avec une BCI basée sur l'imagination motrice kinesthésique. La répartition de ces derniers est présentée dans le tableau suivant :

n° de sujet	Age	Sexe	Main dominante	Antécédents avec une BCI	Pratique d'activité manuelle
1	25	Homme	Droite	Non	Non
2	24	Homme	Droite	Non	Oui (quotidiennement)
3	22	Femme	Droite	Non	Oui (hebdomadairement)

TABLE 1: Tableau de synthèse des caractéristiques des participants de l'étude

Tous les participants ont signé le formulaire de recueil de consentement éclairé et ont rempli les questionnaires de pré et de post-expérimentation. Chaque expérimentation a été conduite jusqu'à son terme. Toutefois, lors de l'analyse des questionnaires, il s'est avéré que le sujet 3 a consommé de l'alcool 24 heures avant l'expérimentation, ce qui peut potentiellement entraîner des biais. Nous ferons part et discuterons de cette information dans la partie Résultats ainsi que dans la partie Discussion.

Les détails de chaque expérimentation et les différents problèmes rencontrés lors des expérimentations ont été représentés dans un document de report de problèmes techniques que nous avons élaboré. Ainsi, ce document vise à rapporter divers éléments tels que la taille du casque préconisée, l'ordre de réalisation des différents runs ou encore les potentiels dysfonctionnements des électrodes. Ce document est disponible dans les annexes.

2.4 Traitement des données

2.4.1 Extraction et inteprétation des données

Filtrage par Common Spatial Pattern

La méthode de filtrage des Common Spatial Pattern (CSP) est une procédure mathématique permettant la combinaison linéaire des composantes d'un signal multivarié en sous composantes additives qui présentent des différences maximales de variance entre deux fenêtres. Cette méthode est souvent utilisée dans l'application des BCI basée EEG. Dans notre cas, le CSP permet de réduire les 64 signaux issus de chacune des électrodes en seulement 6 signaux. Chaque signal provenant de l'EEG est associé avec une pondération pour chacun des 6 signaux. Sur les 6 signaux obtenus, le premier va maximiser les amplitudes lors d'un grasp ou d'un pinch et minimiser les amplitudes lors du repos, et le dernier va maximiser les amplitudes lors du repos et minimiser les amplitudes lors du grasp. Ce pré-traitement correspond à la phase d'apprentissage qui a été réalisé lors du premier run de chaque sujet sur chaque mouvement.

Classement par analyse discriminante linéaire

En statistique, l'analyse linéaire discriminante (en anglais Linear Discriminante Analysis ou LDA) est utilisée pour expliquer et prédire l'appartenance d'un individu à une classe ou un groupe. Ici, nous l'utilisons pour discriminer s'il s'agit d'une phase d'IMK ou d'une phase de repos. Cependant, par manque de temps, nous n'avons pas pu réaliser ce procédé pour prédire une discrimination entre un mouvement de pinch et de grasp.

Cette méthode calcule les coefficients d'une projection linéaire qui minimise la variance des observations d'une même classe et maximise la variance des distributions entre classes. La méthode fournit une probabilité d'affiliation à chaque classe. Les résultats du classement peuvent être observés dans une matrice de confusion, utile pour l'interprétation des résultats.Ces matrices de confusions ont pour objectif d'évaluer la performance de prédiction de la LDA. Ainsi, au sein d'une matrice de confusion, les lignes représentent les classes réelles tandis que les colonnes représentent les classes prédites. En outre, cette matrice permet d'estimer les vrais et faux négatifs ainsi que les vrais et faux positifs. Ces derniers sont interprétables selon le schéma présent en Figure 12.

		Valeurs estimées	
		CONDITION 1	CONDITION 2
Valeurs réelles	CONDITION 1	Vrais Positifs	Faux Négatifs
	CONDITION 2	Faux Positifs	Vrais Négatifs

FIGURE 12 – Schéma illustrant l'interprétation d'une matrice de confusion

2.4.2 Matlab et la toolbox eeglab

Pour pouvoir analyser nos données en termes de patterns ERD/ERS, nous nous sommes servis du logiciel Matlab, une plate-forme de calcul numérique, graphique et de programmation. À partir de ce logiciel, nous avons utilisé l'extension *Eeglab*. *Eeglab* est une boîte à outils interactive pour la préparation, le traitement et l'étude de signaux EEG et/ou EMG entre autres. Nos données sont un ensemble de trois fichiers (en format gdf) par personne et par condition (dix-huit au total), comportant les mesures pour chaque run des signaux émanant des 64 électrodes au rythme de 2048 points par seconde. Dans un premier temps, nous procédons à un ré-échantillonnage sur les données pour descendre à 256 points par seconde, afin d'économiser des ressources de calcul pendant le traitement. Ce sous-échantillonnage est possible, car nous nous intéressons à des fréquences inférieures à 30 Hz donc la fréquence d'échantillonnage minimale doit être de 60 Hz. Ensuite des segments de données (*Epochs*) correspondant à la réalisation des IMK sont découpés et isolés du signal d'acquisition continu d'origine. Il a été choisi d'extraire les *Epochs* entre une seconde avant le début de la tâche d'IMK et dix secondes après, soit sur [-1 ;10] secondes en considérant l'origine comme le début de la tâche. Il est en effet nécessaire de commencer l'analyse du signal antérieurement au début de la tâche pour capter la baseline cérébrale du sujet avant chaque essai. Grâce à l'acquisition de la baseline il est possible d'élaguer les composantes indépendantes du signal cible. Il y a donc autant d'*Epochs* extraites que d'essais réalisés, qui se comptent au nombre de 72 par sujet et par condition. Ces *Epochs* sont ensuite moyennées en un seul signal représentatif (*Merge*) par condition et par sujet, pour enfin être rassemblées dans une seule interface d'étude et d'analyse (*Study*). Cette *Study* résultante permet de cibler, analyser et comparer les signaux issus d'une ou plusieurs électrodes, pour un ou plusieurs sujets sur la période d'intérêt décrite plus haut. Dans un premier temps, il est possible de produire une topographie des activations cérébrales pour chaque sujet séparément ou encore une topographie moyennant les activations pour tous les sujets, dans un intervalle de temps défini explicitement et devant être contenu dans l'intervalle [-1 ;10] secondes, qui représente les limites de notre *Study*. Les topographies se présentent comme des schémas en 2D du crâne où sont représentés le niveau d'activation de chaque électrode sur un certain temps et une certaine bande de fréquence préalablement sélectionnée, c'est-à-dire une visualisation des valeurs d'ERD/ERS pour chaque électrode. Le niveau d'activation est matérialisé par des couleurs, chaudes pour la synchronisation et froide pour la désynchronisation. Les topographies nous permettent d'isoler des électrodes ainsi que des bandes de fréquences d'intérêts pour la caractérisation d'IMK. Une fois les zones et bandes de fréquences d'intérêts déterminées, il est possible d'en étudier les *ERSP* (event-related spectrum perturbation) qui sont les changements fins de dynamique cérébrale liés à un évènement précis. Ce sont dans ces *ERSP* que nous postulons pouvoir identifier les patterns ERD/ERS bien spécifiques induits par chaque geste. Pour ce faire, nous avons la possibilité de comparer les *ERSP* d'intérêt par un test statistique, le test ANOVA, qui permet de mettre en évidence les différences significatives inter-geste et inter-sujet pour nous permettre d'identifier des patterns aussi robustes que possible.

La préparation des données s'est faite par le biais de l'interface graphique de Eeglab, mais il est également possible de produire un script automatisant la préparation. A un moment de l'étude il a été question de produire un script pour automatiser cette étape qui est coûteuse en terme de temps. Finalement le faible nombre de participants a rendu secondaire la nécessité d'automatiser cette étape. Cela étant, une ébauche de script a été produire dans cet objectif et est disponible en annexe.

2.5 Résultats

2.5.1 Résultats des matrices de confusion

Les valeurs présentées correspondent à la précision (accuracy en anglais) sur des fenêtres d'une seconde décalées de 1/16e de seconde. Sur un run entier, cela correspond à 600 fenêtres qui sont classées chacune deux fois : la première dans le mouvement imaginé et la seconde dans le repos. Ainsi, une même fenêtre peut-être à la fois classée en tant que mouvement imaginé (grasp ou pinch) et repos.

En ce qui concerne le sujet 1 (voir Table 2), sur le premier run de grasp (correspondant aux colonnes 2 et 3 du tableau), 98,7 % des fenêtres temporelles de grasp (chaque essai est segmenté en 25 fenêtres d'une seconde d'imagination mortice) étaient classifiés comme étant du grasp. En ce qui concerne les périodes de repos, 99 % des fenêtres temporelles effectives de repos ont été classifiées comme période de repos. Ces premières données sont élevées, car elles représentent les résultats de classement sur la base d'entraînement de l'algorithme. Pour le second run du mouvement de grasp, 66,5 % des fenêtres temporelles de grasp étaient classifiés comme étant du grasp. 67,5 % des périodes effectives de repos ont été classifiées comme une période de repos. En revanche, les données du dernier run de grasp du sujet 1 n'ont pas pu être exploitées pour une raison qui nous est inconnue.

	Repos 1	Grasp 1	Repos 2	Grasp 2	Repos 3	Grasp 3
Cible Repos	99.0	1.0	67.5	32.5	-	-
Cible Grasp	1.3	98.7	33.5	66.5	-	-

Table 2: Tableau des matrices de confusion du Sujet 1 sur le grasp avec comme base d'apprentissage le premier run

Pour les données des runs du pinch (voir Table 3), le premier run atteint un taux de bonne classification 93,7 % pour la condition repos et un taux de 97,5 % pour la condition de pinch. Le deuxième et le troisième run atteignent respectivement un taux de classification correct de 67,7 % et de 64,8 % pour la condition de repos et de 71,5 % et de 63 % pour la condition de pinch.

	Repos 1	Pinch 1	Repos 2	Pinch 2	Repos 3	Pinch 3
Cible Repos	93.7	6.3	67.7	32.3	64.8	36.7
Cible Pinch	2.5	97.5	28.5	71.5	37.0	63.0

Table 3: Tableau des matrices de confusion du Sujet 1 sur le pinch avec comme base d'apprentissage le premier run

Pour le sujet 2, les taux de bonne classification du classifieur des runs 1 à 3 sont respectivement égaux à 92,5 %, 66,2 % et 67,3 % pour la condition de repos. En ce qui concerne la condition du grasp ils sont égaux à 99,3 %, 98 % et 71,5 % respectivement pour les runs 1 à 3 (voir Table 4)

	Repos 1	Grasp 1	Repos 2	Grasp 2	Repos 3	Grasp 3
Cible Repos	92.5	7.5	66.2	33.8	67.3	32.5
Cible Grasp	0.7	99.3	2.0	98.0	28.5	71.5

TABLE 4: Tableau des matrices de confusion du Sujet 2 sur le grasp avec comme base d'apprentissage le premier run

Concernant les mouvements du pinch, les taux de bonne classification de l'algorithme des runs 1 à 3 sont respectivement égaux à 72,5 %, 74 % et 63 % pour la condition de repos. En ce qui concerne la condition du pinch ils sont égaux à 94,2 %, 89,2 % et 76,7 % respectivement pour les runs 1 à 3 (voir Table 5).

	Repos 1	Pinch 1	Repos 2	Pinch 2	Repos 3	Pinch 3
Cible Repos	72.5	27.5	74.0	26.0	63.0	37.0
Cible Pinch	5.8	94.2	10.8	89.2	23.3	76.7

TABLE 5: Tableau des matrices de confusion du Sujet 2 sur le pinch avec comme base d'apprentissage le premier run

Enfin, en ce qui concerne le sujet 3 (voir Table 6), sur le premier run de grasp, 79,2 % des mouvements de grasp étaient classifiés comme étant du grasp. En ce qui concerne les périodes de repos, 76,7 % des périodes effectives de repos ont été classifiées comme une période de repos. Pour le second et troisième runs du mouvement de grasp, respectivement 66,2 % et 62,2 % des mouvements de grasp étaient classifiés comme étant du grasp. 60,8 % et 71,3 % des périodes effectives de repos ont été classifiées comme une période de repos respectivement pour les runs 2 et 3.

	Repos 1	Grasp 1	Repos 2	Grasp 2	Repos 3	Grasp 3
Cible Repos	76.7	23.3	60.8	39.2	71.3	28.7
Cible Grasp	20.8	79.2	33.8	66.2	37.8	62.2

TABLE 6: Tableau des matrices de confusion du Sujet 3 sur le grasp avec comme base d'apprentissage le premier run

Pour les mouvements du pinch, les taux de bonne classification de l'algorithme des runs 1 à 3 sont respectivement égaux à 92 %, 55,2 % et 66,8 % pour la condition de repos. En ce qui concerne la condition du pinch ils sont égaux à 84 %, 72,5 % et 64,3 % respectivement pour les runs 1 à 3 (voir Table 7).

	Repos 1	Pinch 1	Repos 2	Pinch 2	Repos 3	Pinch 3
Cible Repos	92.0	8.0	55.2	44.8	66.8	33.8
Cible Pinch	16.0	84.0	27.5	72.5	35.7	64.3

TABLE 7: Tableau des matrices de confusion du Sujet 3 sur le pinch avec comme base d'apprentissage le premier run

Les figures 13 et 14 représentent les résultats de classification de l'algorithme tout en permettant d'apporter un point de comparaison entre les performances des sujets. Ainsi, nous pouvons voir que selon les matrices de confusion les résultats semblent tout à fait corrects. Le discernement entre le mouvement et le repos est bon (parfois même très bon, avec une reconnaissance du grasp à plus de 99 %). Seul le run 2 de pinch du sujet 3 pose problème, au niveau de la reconnaissance du repos, avec un taux de classification d'à peine 55,2 %. Cela peut être dû à plusieurs facteurs, notamment une agitation plus forte lors de ce repos comparé aux autres, donnant ainsi du mal au classifieur à discerner le repos du mouvement.

En outre, pour l'ensemble des sujets, le classifieur a atteint un niveau de précision de 78,7 % pour le grasp, de 79,2 % pour le pinch et de 73,2 % pour la condition de repos (tous runs confondus).

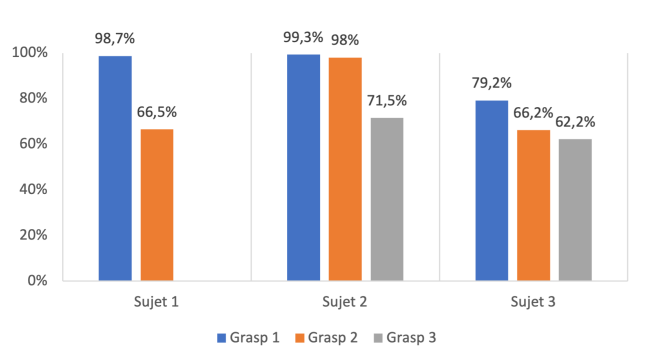

FIGURE 13 – Graphique représentant le taux de bonne classification (en %) des runs de grasp versus une période de repos pour chaque sujet. Le premier run a été utilisé pour l'apprentissage

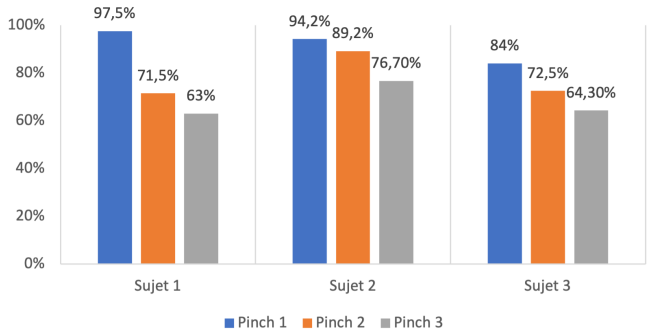

FIGURE 14 – Graphique représentant le taux de bonne classification (en %) des runs de pinch versus une période de repos pour chaque sujet. Le premier run a été utilisé pour l'apprentissage

Avec les matrices de confusion, même si la moyenne de classification des 3 sujets confondus (et même individuelle) est plus que correcte nous pouvons constater les différences inter-sujets. En effet, nous pouvons d'abord voir chez le sujet 1 pour le mouvement de grasp comme pour le mouvement de pinch des résultats très bons lors du premier run, tandis que les autres runs sont dans la moyenne. Ceci s'explique par l'apprentissage et la calibration réalisés sur ces premiers runs. Les résultats sont cependant un peu plus faibles sur le dernier run de pinch ce qui est sûrement dû à la fatigue (dernier run réalisé). Les matrices de confusion du sujet 2 sont toutes très bonnes pour le mouvement de grasp. Les résultats sont toujours bons en pinch mais moins qu'en grasp, cela peut probablement venir du fait que c'est le geste qui est le moins souvent utilisé. Au niveau du sujet 2, nous pouvons donc supposer que la baisse de la performance lors du dernier run, surtout celle du mouvement

demandé, est sûrement liée à la fatigue et à une baisse de l'attention, ainsi qu'à une augmentation du stress dû aux conditions dans lesquelles celui-ci a dû être réalisé. Nous pouvons ensuite voir la différence avec les résultats du sujet 3 : si la classification du mouvement reste acceptable et dans la moyenne pour tous les runs, les premiers runs de grasp et de pinch sont plus faibles comparés aux 2 sujets précédents. Nous pouvons de plus constater que la discrimination du repos lors du second run de pinch est faible. Cela peut venir d'une contraction musculaire pendant la période de repos, un stress ou autre perturbation donnant du mal au classifieur à discriminer du repos en tant que tel dû à l'agitation par exemple.

Cependant, une ANOVA effectuée sur le pourcentage moyen de reconnaissance du grasp, du pinch, des périodes de repos du grasp et des périodes de repos du pinch respectivement avec chaque sujet comme facteur inter-sujet n'a pas révélé de différence significative entre les performances des sujets, $F(2\,;5) = 1{,}368$, $p > 0.05$; $F(2\,;6) = 0{,}816$, $p > 0.05$; $F(2\,;6) = 0{,}183$, $p > 0.05$ et $F(2\,;6) = 0{,}274$, $p > 0.05$. De même, un test t effectué sur les pourcentages de bonnes classifications des mouvements de grasp et de pinch, tous sujets confondus, comme facteur inter-sujet ne nous permet pas de conclure d'une différence significative de reconnaissance entre les deux conditions, $t(15) = 0{,}142$, $p > 0.05$.

2.5.2 Résultats temps-fréquence par les ERSP

La Figure 15 présente les résultats obtenus au niveau des changements dynamiques moyens de l'amplitude du spectre de fréquences EEG à la suite des imaginations motrices kinesthésiques du grasp et du pinch, respectivement sur l'électrode C3. Ces résultats présentent la moyenne pour tous les sujets de l'étude. L'électrode C3 a été choisie pour présenter ces résultats puisque cette dernière correspond en théorie à la zone du contrôle moteur des membres du côté droit. Elle est également très citée dans la littérature scientifique, comme nous avons pu le voir dans la partie bibliographique ([Formaggio et al., 2010], [Gant et al., 2018] et [Suwannarat et al., 2018]). En outre, c'est l'une des électrodes pour laquelle nous avons les résultats les plus significatifs pour chacun des sujets. Les ERSP permettent de déceler des changements sur une bande de fréquence allant de 5 à 35 Hz comprenant les bandes alpha-mu (comprises entre 8 et 13 Hz) et bêta (comprises entre 13 et 30 Hz), sur lesquelles les IMK induisent des changements. Ces ERSP s'étendent sur une période de -1 seconde avant le début de l'IMK jusqu'à 10 secondes (5 secondes après la fin théorique de la production de l'IMK). La couleur bleue indique une ERD (Event-Related Desynchronisation), c'est-à-dire, une désynchronisation de l'activité des neurones. Ce phénomène se produit depuis la période de préparation de mouvement jusqu'à ce que le mouvement se termine. Vient ensuite, en général, une seconde après, un rebond ERS (Event-Related Synchronisation) en rouge qui indique une synchronisation des neurones.

Dans le cas de la Figure 15, en ce qui concerne la condition de Grasp (à gauche) à partir de l'origine 0, on observe un pattern ERD (en bleu). Dans l'interface Grasp'it, cette origine 0 correspond au moment où le feu passe au vert et que le sujet doit commencer de réaliser l'IMK. Ce pattern ERD se poursuit jusqu'à environ 7 secondes (ce qui correspond à 2 secondes après où le mouvement doit se terminer). Cette désynchronisation de l'activité des neurones se produit principalement dans la bande de fréquences alpha-mu. On observe également, environ 1 seconde après la fin de l'IMK le rebond ERS (en rouge) présent dans les bandes de fréquence alpha-mu et bêta, qui présuppose la resynchronisation des neurones.

En ce qui concerne la condition du Pinch, on observe les mêmes panels que dans la condition du Grasp

sauf à la fin des 7 secondes de la période d'IMK. En effet, il paraît subsister un pattern ERD dans un même temps qu'une resynchronisation des neurones. Toutefois, les analyses statistiques n'ont pas relevé de différence significative ($p > 0.05$) au niveau des ERSP entre les deux conditions.

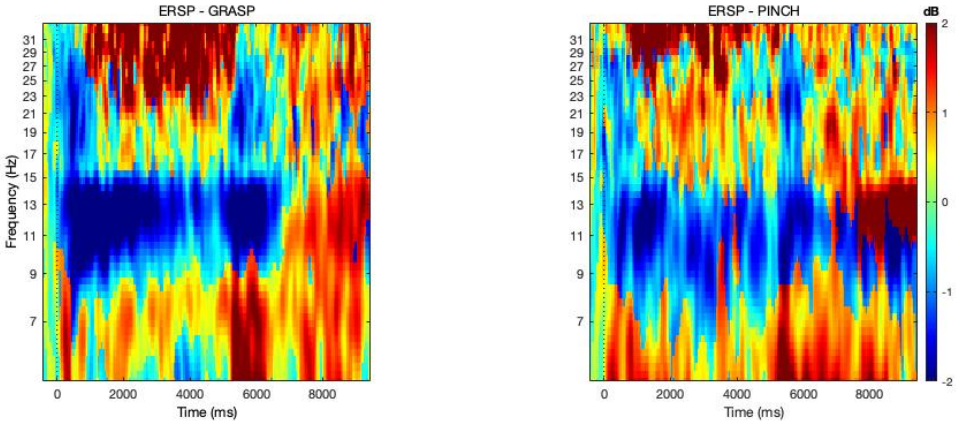

FIGURE 15 – Schéma illustrant la moyenne pour les 3 sujets des ERSP pour les conditions Pinch et Grasp sur l'électrode C3

Les résultats des sujets pris individuellement comme le montrent les Figures 16, 17 et 18 respectivement pour les sujets 1, 2 et 3, nous permettent d'observer les différences entre les sujets. En ce qui concerne le sujet 1, pour la condition du grasp, on remarque une faible désynchronisation (représentée en bleu) dans la bande bêta (13-30 Hz) comparé à la condition du pinch et aux autres sujets où la désynchronisation a lieu en majorité dans la bande alpha-mu (7-13 Hz). Pour cette même condition du grasp, on observe une resynchronisation des neurones vers environ 6 secondes dans la bande de fréquences alpha-mu, ce qui traduit que l'imagination motrice kinesthésique a été presque réalisée sur la durée totale prévue de l'essai (de 5 secondes). Pour ce qui est de la condition du pinch, on observe un pattern ERD dans la bande alpha-mu suivi d'une resynchronisation aux environ des 6 secondes. Le sujet 2 présente un pattern ERD très distinct pour la condition du grasp dans la bande de fréquence alpha-mu. Une resynchronisation des neurones apparaît vers 7 secondes, ce qui traduit que l'IMK a été correctement effectuée depuis le début du signal de commencement du mouvement, mais en dépassant les 5 secondes initialement prévues. Pour la condition du pinch, on obtient des résultats moins appuyés. Les phénomènes d'ERD sont moins distincts, mais sont présents sur les bandes de fréquences alpha-mu et bêta. La resynchronisation des neurones apparaît un peu en retard des 5 secondes de l'essai. Enfin le sujet 3, présente un pattern ERD majoritairement sur la bande de fréquences alpha-mu ainsi que sur la bande bêta pour la condition du grasp. Cependant, il est difficile d'observer la période de resynchronisation des neurones. On distingue les mêmes observations pour la condition du pinch.

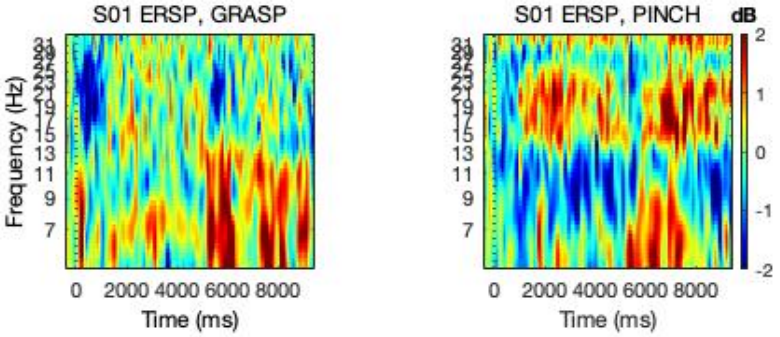

FIGURE 16 – Schéma illustrant les ERSP du sujet 1 pour les conditions Pinch et Grasp sur l'électrode C3

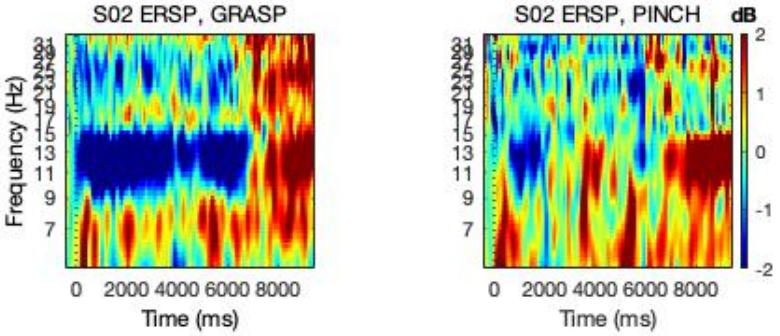

FIGURE 17 – Schéma illustrant les ERSP du sujet 2 pour les conditions Pinch et Grasp sur l'électrode C3

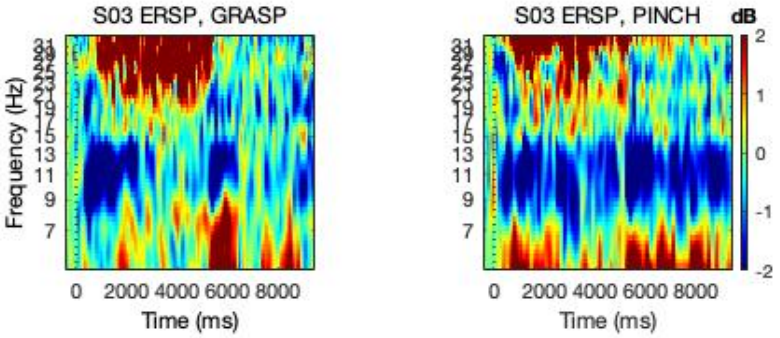

FIGURE 18 – Schéma illustrant la moyenne pour les ERSP du sujet 3 pour les conditions Pinch et Grasp sur l'électrode C3

2.5.3 Résultats topographiques

La topographie en EEG est une technique de neuroimagerie, liée au casque EEG et aux électrodes placées à la surface de la tête. Un logiciel va pouvoir tracer l'activité électrique du cerveau sur un écran en codant la quantité d'activité générée en différents tons de couleurs. Ici, nous chercherons notamment les tons de couleurs bleus et rouges représentant respectivement les ERD et les ERS générés par les participants. La topographie donne une vision plus précise et plus représentative de la localisation des altérations de rythme ou d'amplitude par exemple, par rapport à la surface du crâne. Le repérage de l'emplacement exact des modifications de l'EEG est également beaucoup plus facile avec cette technique.

Dans un premier temps des topographies des 3 sujets confondus ont été réalisées pour les conditions de Grasp et de Pinch. Ces dernières sont présentées en Figure 19. Ces topographies ont été réalisées sur une fréquence entre 8 et 15 Hertz (correspondant à la bande de fréquence alpha-mu) puisque nous devons ici identifier la désynchronisation avec les ERD chez les participants, qui se fait principalement dans cette bande de fréquence [Pfurtscheller et al., 1997]. C'est aussi dans cette bande que les résultats des topographies sont les plus significatifs. Elles ont également été réalisées sur un temps compris entre 0 et 5 secondes, correspondant à un moment où le participant est censé imaginer la sensation du mouvement (voir Figure 8).

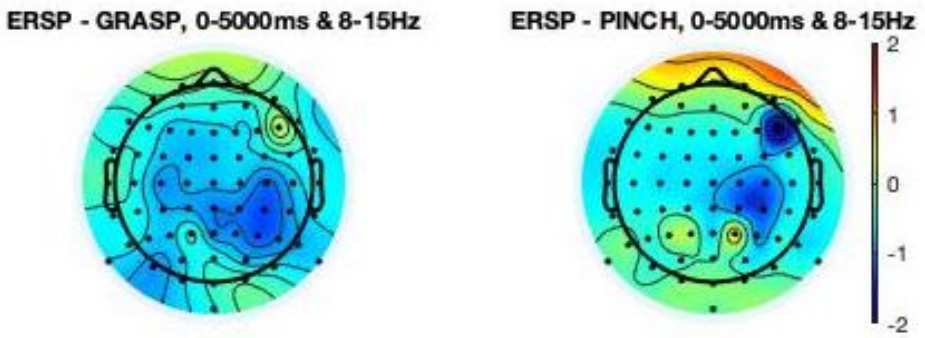

FIGURE 19 – Schéma illustrant les cartes topographiques moyennées sur l'ensemble des sujets sur la bande de fréquence alpha-mu pour les conditions grasp et pinch

Ces schémas nous permettent bien de discerner le pattern ERD intervenant lors de la réalisation d'un mouvement provoquant une désynchronisation. En effet, cela est visible selon les deux conditions Grasp ou Pinch, avec la zone représentée en bleu sur les schémas. Cependant, nous rencontrons des difficultés pour interpréter le fait que des phénomènes ERD se retrouvent également du côté ipsilatéral. En effet, tous nos sujets sont droitiers et un mouvement de la main droite correspond à une activation de la zone gauche dans le cerveau. Or ici nous pouvons constater que cette activation se fait également, par moments, du côté droit. De plus, l'activation est censée être centrale tandis qu'ici elle est plus occipitale-centrale (voir frontale pour le pinch). Si cette dernière constatation peut s'expliquer par la différence entre un mouvement réel et un mouvement imaginé, pouvant expliquer une plus large zone d'activation puisque moins précise, la première constatation, elle semble plus surprenante.

Pour comprendre ces résultats surprenants, d'autres topographies ont été réalisées, chacune sur un intervalle d'une seconde (de 0 à 9 secondes) pour les 3 sujets confondus, afin de pouvoir distinguer chaque étape de l'imagination motrice kinesthésique chez les participants. Ces résultats peuvent être visualisés en Figure 20.

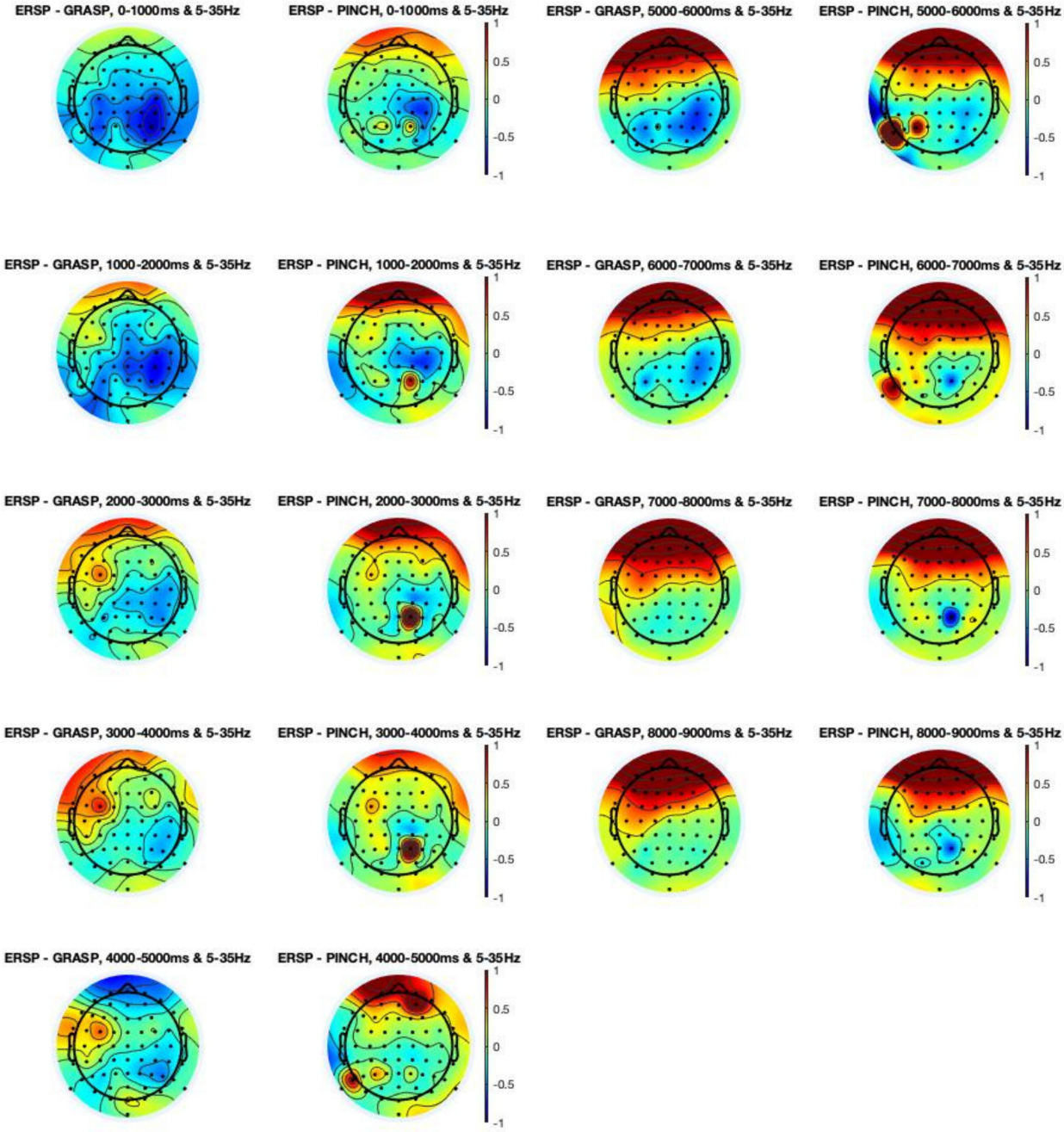

FIGURE 20 – Schéma illustrant les cartes topographiques, par seconde, moyennées sur l'ensemble des sujets sur une période de 0 secondes à 9 secondes et dans les bandes de fréquences alpha-mu et bêta pour les conditions grasp et pinch

Ces topographies montrent (particulièrement pour le Grasp) les phases d'ERD jusqu'à 5 secondes, ce qui correspond au temps durant lequel le participant doit imaginer le mouvement, ainsi que l'apparition des premiers ERS dans la zone frontale à partir de 5 secondes. Dans la condition du pinch, en revanche, il est possible d'observer que déjà à partir de 3 secondes il y a l'apparition d'ERS. L'ERD lui, même s'il devient moins fort au fil du temps, se poursuit jusqu'à la 9 seconde ; ceci peut laisser penser à un rebond tardif, ou au contraire un rebond hâtif dû à l'apparition prématurée d'ERS dans la zone frontale. Nous pouvons notamment constater un point rouge ou bleu récurrents correspondant à de l'ERS ou de l'ERD dans les topographies concernant le pinch, ce qui semble anormal (non seulement au niveau de la période sur laquelle cela apparaît, mais également par rapport à la zone d'activation). Nous avons émis l'hypothèse que cela pouvait être dû à des dysfonctionnements des électrodes. En effet, lors des expérimentations, nous avions relevé que les électrodes P2 et P4 étaient bruitées, pour tous les passages des sujets, et l'électrode P4 correspond à l'emplacement de ce point de phase d'ERS et d'ERD. Cela peut ainsi avoir perturbé et eu des conséquences sur les résultats de la topographie. De nouvelles topographies ont donc été réalisées en supprimant les électrodes P2 et P4, celles-ci sont disponibles en annexe. Néanmoins, même si les résultats paraissent plus cohérents, ces nouvelles topographies ne permettent pas d'expliquer totalement ces résultats, notamment au niveau des activations en ipsilatéral.

2.5.4 Résultats des questionnaires

Questionnaires de pré-expérimentation

Questionnaire sur l'état interne du participant

Les résultats du questionnaire sur l'état interne des sujets de l'étude (test d'autoévaluation de l'anxiété - Traits de Spielberger) montrent qu'avant de débuter l'expérimentation, ils étaient dans un état plutôt détendu (tout en sachant que l'échelle a pour extrémités un état d'anxiété "minimal" jusqu'à un état d'anxiété "très élevé" et que les scores obtenus peuvent varier entre 20 et 80). En effet, 2 sujets ont vu leur état d'anxiété qualifié comme faible et un sujet s'est vu qualifié son état d'anxiété comme minimal (voir Table 8). Nous pouvons donc considérer que le stress n'a peu ou pas influencé les résultats de notre étude.

n° de sujet	Score au test	Niveau d'anxiété déterminé
1	43	Faible
2	33	Minimal
3	40	Faible

Table 8: Tableau de synthèse des scores obtenus par les participants au test sur l'état interne du participant

Questionnaire sur la motivation

Les résultats des participants au questionnaire sur la motivation présenté avant l'expérimentation sont exposés dans la Table 9. Chaque item d'intérêt est évalué sur une échelle de 1 à 7. En ce qui concerne l'item portant sur l'intérêt de l'étude et de l'entraînement, les participants ont obtenus une moyenne de 5,53/7, le sujet 3 a montré un intérêt moindre par rapport aux deux autres sujets. Cependant, la moyenne des participants nous laisse

déduire que ces derniers portaient de l'intérêt à l'étude/entraînement avec l'interface cerveau-ordinateur. Les sujets ont obtenu des résultats très similaires à l'item évaluant la confiance en eux face à l'utilisation de l'interface cerveau-ordinateur. Ils ont obtenu une moyenne de 5,08, ce qui montre qu'en amont de l'expérimentation, ils ont une confiance tout à fait correcte dans le contrôle de l'interface cerveau-ordinateur. Au regard des résultats pour l'item évaluant la peur d'utiliser ce système, les participants n'en n'ont presque pas montré, mis à part une petite prédominance pour le sujet 3. En effet, ils ont obtenus une moyenne de 3/7 à cet item. Enfin, concernant l'item visant à mesurer l'attrait des sujets de l'étude à relever un nouveau "challenge", les participants ont obtenus des résultats tout à fait similaires entre eux. En effet, ils ont obtenus une moyenne de 5,3/7, ce qui traduit un intérêt pour la relève d'un nouveau défi.

La motivation des participants déduite de ces 4 items, nous montre que les participants sont presque à un état de motivation identique. En outre, cette dernière semble être bien présente chez l'ensemble des sujets même si elle n'est pas maximale.

n° de sujet	Intérêt	Confiance	Peur	Challenge
1	6	5,25	1,6	5,25
2	6,2	5	3	5
3	4,4	5	4,4	5,75
Moyenne	5,53	5,08	3	5,3

Table 9: Tableau de synthèse des scores obtenus par les participants au test sur la motivation pré-expérience

Questionnaire post-expérimentation : ressenti à l'issue de l'expérimentation

Questionnaire K-USES portant sur l'utilisabilité de l'interface cerveau-ordinateur

Les participants de l'étude présentent des résultats similaires en ce qui concerne le questionnaire mesurant l'utilisabilité de l'interface cerveau-ordinateur (voir Table 10). Chaque item est évalué sur une échelle de 1 à 5, les résultats sont classés comme assez élevés dés lors qu'ils dépassent le seuil de notation de 3,11/5.

En ce qui concerne l'item mesurant l'efficacité des participants à interagir avec l'interface cerveau-ordinateur, les sujets de l'étude ont obtenus une moyenne de 3,83/5. Ce résultat signifie qu'en moyenne, ils ont jugés leur performance de manière assez positive. Pour ce qui est de la facilité d'apprentissage à l'utilisation du système, les sujets ont jugés cet item de manière très positive avec une moyenne de 4,33/5. Ils ont également montré une très bonne satisfaction (en référence à son fonctionnement) suite à l'utilisation de ce système, avec un score moyen de 4,43/5 à cet item. Pour finir, l'efficience est l'item pour lequel le score moyen est le moins bon (2,8/5). Les participants l'ont donc jugée moyenne notamment à cause de la fatigue ressentie après avoir utilisé ce système. Globalement les participants n'ont pas ou peu d'appréhension quant à l'utilisation du dispositif, ce qui s'explique aisément du fait que les participants sont également les investigateurs du projet.

n° de sujet	Efficacité	Facilité d'apprentissage	Satisfaction	Efficience
1	3	5	4,3	2,7
2	4,5	4	4,7	2,7
3	4	4	4,3	3
Moyenne	3,83	4,33	4,43	2,8

TABLE 10: Tableau de synthèse des scores obtenus par les participants au test sur les ressentis à l'issue de l'expérimentation

Questions portant sur la pratique des imaginations motrices kinesthésiques

Les sujets de notre étude ont employé des stratégies différentes pour réaliser les imaginations motrices kinesthésiques. Le sujet 1 a déclaré s'être représenté l'afflux sanguin et nerveux dans les muscles concernés des mouvements du pinch (muscles de la main) et du grasp (muscles de l'avant-bras). Le sujet 2, quant à lui s'est concentré sur la pression au niveau des doigts pour le mouvement du pinch ainsi que sur la pression au niveau des doigts et du poignet pour réaliser le mouvement de grasp. Enfin, le dernier sujet s'est davantage concentré sur les sensations de pression de la main sur l'objet ainsi que sur la texture de ce dernier. Le sujet 3 a également déclaré s'être attardé sur les sensations musculaires, plus précisément, sur les sensations de la contraction des muscles.

D'autre part, le sujet 1 n'a pas eu la sensation qu'un geste soit plus difficile qu'un autre pour la réalisation des imaginations motrices kinesthésiques. En revanche, les sujets 2 et 3 ont trouvé le mouvement de pinch plus complexe. Ils invoquent un entraînement moindre pour ce mouvement par rapport à celui du grasp mais également une meilleure facilité à ressentir la sensation du poignet.

3 Discussion

Au regard de nos objectifs principaux qui étaient, pour rappel, de pouvoir discriminer les mouvements en imagination motrice kinesthésique à partir d'une période de repos et si possible, de les discriminer entre eux, nos résultats sont venus étayer en partie ceux-ci.

3.1 Différences inter-individuelles, discrimination des conditions Grasp, Pinch et Repos et effet au cours du temps

Les matrices de confusion ont apportés de très bons résultats quant à la discrimination entre des périodes d'IMK et de repos. Les résultats sont tout à fait comparables, voire même supérieurs à certaines études citées dans la première partie bibliographique ([Agashe et al., 2016], [Chu et al., 2020]). Nous pouvons de plus constater que, même si le pinch semble en moyenne plus difficile à réaliser que le grasp pour les 3 sujets ayant participé à l'étude, il n'y a pas de différence significative dans la bonne réalisation du mouvement entre l'un et l'autre. Cependant, une différence entre la phase de mouvement (grasp ou pinch) et la phase de repos est détectable et généralement bien classifié, puisque nous avons obtenu une moyenne de plus de 70% pour chacune des conditions, les 3 sujets confondus. Ces résultats positifs peuvent être mis en lien avec un bon apprentissage/entraînement à la réalisation d'imaginations motrices kinesthésiques, mais également avec un niveau de motivation assez élevé des sujets. On peut facilement postuler que, du fait que les sujets soient également investigateurs de l'étude, la motivation et la rigueur d'apprentissage des participants pourraient dénoter de celui de la population générale. Aussi, l'apprentissage ici n'était donc pas adressé à des sujets tout à fait naïfs et néophytes dans le champ des BCI, bien qu'aucun de nous n'ai déjà manipulé ou même observé directement le dispositif avant les expérimentations. Cela implique également le fait que, pendant l'élaboration de notre protocole d'expérimentation aucun de nous n'avait pu éprouver directement le dispositif d'acquisition, pourtant au cœur l'étude. L'absence de différence significative entre les résultats obtenus de classification entre périodes de repos et périodes d'IMK des différents sujets ne laisse penser qu'à une influence minime de la pratique d'activité manuelle. En effet, les sujets 2 et 3 ont déclaré pratiquer des activités manuelles (guitare, bricolage ou encore escalade) pourtant le sujet 1 a obtenu des résultats tout à fait comparables aux deux autres sujets. Le sujet 1 a d'ailleurs obtenu de meilleurs résultats que le sujet 3. On peut cependant conjecturer que cela est peut-être dû à l'agitation ou la consommation d'alcool du dernier participant, ayant altéré les résultats, puisque le sujet 2 (pratiquant des activités manuelles) a en moyenne obtenu de meilleurs résultats que les 2 autres participants. De plus, nous savons que le sujet 2 pratique des activités manuelles quotidiennes et le sujet 3 des activités manuelles hebdomadaires. Nous pouvons donc émettre l'hypothèse d'un impact négatif de l'agitation et de l'alcool sur la bonne réalisation de l'imagination motrice kinesthésique, ainsi que l'impact positif d'un apprentissage et de la pratique d'activités manuelles sur la réalisation des IMK.

La fatigabilité était un des critères d'évaluation du protocole. En accord avec les résultats du questionnaire K-USES mesurant l'utilisabilité de l'interface cerveau-ordinateur, l'efficience de cette dernière évaluée comme moyenne, dû au fait de la fatigue qu'elle provoque, paraît être reliée aux résultats obtenus par la classification. En effet, dans les résultats, on remarque que les pourcentages de classification sont de moins en moins bons au fil des essais, il est donc possible d'attribuer cette tendance à la fatigue. Cette dernière est donc à prendre en

compte dans l'évaluation du protocole que nous avons conçu. Cependant, par manque de temps, il ne nous a pas été possible de réaliser les matrices de confusion pour différencier les deux mouvements entre eux et non pas contre une période de repos. Néanmoins, les résultats de classification des périodes de réalisation de pinch et de grasp versus une période de repos ne présentent pas de différences significatives, en effet, ils sont tous deux proche des 80 % pour chacun des trois sujets confondus.

3.2 Interprétation des ERSP et des topographies

En ce qui concerne les résultats au niveau des ERSP, nous avons obtenus des résultats plutôt positifs. Il s'est d'ailleurs avéré que pour tous les sujets, nous pouvons observer des patterns ERD/ERS distincts sur les bandes de fréquences d'intérêts alpha-mu et bêta. Il s'est avéré en analysant les résultats que les sujets ont parfois eu du mal à réaliser les imaginations motrices kinesthésiques sur le temps donné (c'est-à-dire sur une période de 0 à 5 secondes, voir Figure 8). On peut constater que le début de la réalisation est généralement bien cadré, mais l'arrêt de l'IMK paraît être plus flou. En effet, pour le sujet 1 on remarque parfois un arrêt du pattern ERD avant les 5 secondes tandis que pour le sujet 3, on n'observe pas la resynchronisation des neurones attendue à la fin des 5 secondes, qui correspondent à la fin de l'IMK plus 2 secondes nécessaires au rebond ERS. Ce problème pourrait être dû, pour le dernier sujet à la consommation d'alcool, mais nous ne sommes pas en capacité de connaître les causes exactes de cette observation. Ainsi, à la suite de ces résultats, il devrait être nécessaire au sein de notre protocole d'apprentissage pour la réalisation des IMK d'insister sur l'entraînement de ces imaginations durant une période de temps donnée. Il apparaît également sur les ERSP que les deux conditions (pinch et grasp) ne produisent pas des segments ERD de la même intensité. En effet, pour le sujet 1 et le sujet 3, c'est le pinch qui apparaît produire une meilleure désynchronisation alors que pour le sujet 2, il apparaît que c'est le grasp. Ces observations ne sont pas corrélées avec le fait que le sujet 3 a déclaré que le pinch était le mouvement le plus difficile à imaginer tandis que le sujet 1 n'a pas déterminé qu'un mouvement était plus difficile à produire que l'autre. En outre, les analyses statistiques ne nous ont pas permis de trouver de différences significatives en terme d'ERS/ERD entre les conditions de grasp et de pinch.

Pour les résultats topographiques, ils paraissent en accord avec les ERSP. En effet, on remarque que sur les topographies moyennées sur tous les sujets, il a été difficile pour les sujets de tenir les imaginations motrices kinesthésiques du début jusqu'à la fin des 5 secondes. En somme, on remarque également, tout comme dans les ERSP, que les patterns ERD sont davantage discrets pour la condition de pinch que pour la condition de grasp bien que la toolbox eeglab n'ai pas admis de différences significatives entre les topographies des deux conditions. Ces résultats peuvent donc être en lien avec le fait que deux sujets de l'étude ont exprimé une plus grande difficulté à réaliser les IMK du pinch que du grasp. De plus, par rapport à la littérature scientifique étudiée dans la partie bibliographique, ces résultats paraissent mitigés et inférieurs à d'autres études identiques à celle-ci ([Formaggio et al., 2010], [Ofner et al., 2019]). Enfin, les zones d'activation du cerveau lors de l'IMK semblent différer de la littérature et sont donc différents des résultats attendus. Si nous avons pu émettre quelques hypothèses sur les problèmes rencontrés pour les électrodes, nous n'avons cependant pas su en identifier l'origine et déterminer d'où venait cette activation ipsilatérale.

4 Conclusion

À l'issue de ce travail, les résultats obtenus nous permettent de répondre à nos problématiques initiales. Nous pouvons notamment distinguer une discrimination qui est significative pour les conditions de Grasp et de Repos ainsi que pour les conditions de Pinch et de Repos, sans cependant distinguer une différence significative entre les deux mouvements de Grasp et de Pinch. Nous pouvons également postuler une diminution de la performance dans le temps suite aux résultats obtenus des participants qui est plus faible, ainsi qu'un impact physiologique de l'état du participant sur les résultats d'IMK.

Ce projet nous a amenés à découvrir le champ, en plein essor, des interfaces cerveau-ordinateur contrôlées à partir des imaginations motrices kinesthésiques pour la rééducation post-AVC. Grâce à celui-ci, nous avons également pu prendre conscience des enjeux et des possibilités que l'évolution des interfaces cerveau-ordinateur pourra apporter aux personnes souffrant de paralysie. D'autre part, nous avons pu être confrontés aux difficultés que ce type d'étude rencontre, notamment les problèmes de motivation mais surtout la question de l'apprentissage des IMK. En effet, cette dernière question, au sein de la littérature scientifique reste encore vague et peu garnie. C'est un point que nous aurions aimé creuser davantage au sein de ce projet. En effet, la crise sanitaire, le manque de temps, notre petite expérience et le manque d'interactions avec des sujets naïfs n'ont pas joué en notre faveur. Ce projet nous a également permis de réfléchir et à conclure sur ce que nous avons réalisé et mis en place.

Lors de l'élaboration du protocole, nous avons dû faire face à différentes contraintes dont plusieurs facteurs étaient en cause. D'une part, au moment de réfléchir au déroulé "type" d'une session d'expérimentation, nous avons été contraints de réduire notre objectif principal. En effet, ce dernier était initialement d'élaborer un protocole permettant de pouvoir discriminer quatre mouvements entre eux ainsi que parallèlement à une période de repos. Notre nouvel objectif était donc de pouvoir discriminer seulement deux mouvements, notamment à cause des contraintes de temps pour l'expérimentation comme pour les participants. En effet, nous avons également dû composer avec le fait que l'expérimentation devait tenir en une seule session, ne devant pas dépasser 2 h 30 pour des raisons de fatigabilité des sujets induisant des baisses de performances à long terme. Une durée plus longue aurait d'autre part, possiblement contraint les participants à se rendre plusieurs fois au laboratoire et les investigateurs, à réaliser plusieurs installations. Ces évènements auraient certainement pu biaiser nos résultats. Nous avons alors dû faire des concessions quant à l'élaboration du protocole et ce qui était le plus important pour nous à réaliser.

Les contraintes sanitaires liées à la Covid-19, qui nous ont accompagnés durant tout ce projet, nous ont également mis en difficulté pour mettre en place et tester notre protocole. En effet, étant donné les contraintes pour accéder au laboratoire durant ces temps de restrictions lié à la situation sanitaire, nous n'avons pas pu réaliser l'expérimentation sur des personnes naïves extérieures au projet. Cette situation peut possiblement poser un problème d'objectivité, car les résultats pourraient être tout à fait différents qu'ils ne le sont actuellement. Cependant, nous pouvons avoir en deçà, une autre condition plus positive, puisque les sujets actuels de notre étude étaient alors déjà bien informés sur l'expérimentation et le déroulé de celle-ci, d'autant plus qu'ils avaient les connaissances nécessaires pour réaliser un entraînement efficace à la réalisation des imaginations motrices kinesthésiques.

Ce projet nous a cependant permis à mettre au point un protocole se basant sur une revue de la littérature récente réalisée en début de semestre, tout en respectant les différentes contraintes inhérentes lors de la réalisation d'un projet de ce type. Nous avons également pu mettre en place et apprendre à utiliser le dispositif d'interface cerveau-ordinateur ainsi que l'acquisition d'électroencéphalogrammes. Nous avons aussi pu entrevoir la maîtrise d'un logiciel et d'une toolbox associée (Matlab et eeglab respectivement) pour le traitement de ce type de données complexes, ce qui peut présenter un avantage à notre égard pour les années à venir et nos futurs projets. Enfin, nous avons su nous adapter aux situations et constater la réelle différence entre la théorie et la pratique, liée aux enseignements que nous avons pu avoir sur les interfaces cerveau-ordinateur.

Références

[Agashe et al., 2016] Agashe, H., Paek, A., and Contreras-Vidal, J. (2016). *Multisession, noninvasive closed-loop neuroprosthetic control of grasping by upper limb amputees*, volume 228.

[Baraudon et al., 2021] Baraudon, C., Lanfranchi, J.-B., Bastien, J. M. C., and Fleck, S. (2021). Conception d'une échelle française d'évaluation de l'utilisabilité des nouvelles technologies éducatives par l'enfant. *Médiations et médiatisations - Revue internationale sur le numérique en éducation et communication*, (5) :44–67.

[Cho et al., 2020] Cho, J.-H., Jeong, J.-H., and Lee, S.-W. (2020). Decoding of grasp motions from eeg signals based on a novel data augmentation strategy. pages 3015–3018.

[Chu et al., 2020] Chu, Y., Zhao, X., Zou, Y., Xu, P., Song, G., Han, J., and Zhao, Y. (2020). Decoding multiclass motor imagery eeg from the same upper limb by combining riemannian geometry features and partial least squares regression. *Journal of Neural Engineering*, 17.

[Demin et al., 2016] Demin, S., Panischev, O., and Demina, N. (2016). Cross mff—analysis in studying the obsessive-compulsive disorder. *Journal of Physics : Conference Series*, 741 :012073.

[Formaggio et al., 2010] Formaggio, E., Storti, S., Cerini, R., Fiaschi, A., and Manganotti, P. (2010). Brain oscillatory activity during motor imagery in eeg-fmri coregistration. *Magnetic resonance imaging*, 28 :1403–12.

[Gant et al., 2018] Gant, K., Guerra, S., Zimmerman, L., Parks, B., Prins, N., and Prasad, A. (2018). Eeg-controlled functional electrical stimulation for hand opening and closing in chronic complete cervical spinal cord injury. *Biomedical Physics Engineering Express*, 4.

[Gu et al., 2009] Gu, Y., Dremstrup, K., and Farina, D. (2009). Single-trial discrimination of type and speed of wrist movements from eeg recordings. *Clinical neurophysiology : official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 120 :1596–600.

[Nikulin et al., 2008] Nikulin, V., Hohlefeld, F., Jacobs, A., and Curio, G. (2008). Quasi-movements : A novel motor-cognitive phenomenon. *Neuropsychologia*, 46 :727–42.

[Ofner et al., 2017] Ofner, P., Schwarz, A., Pereira, J., and Müller-Putz, G. (2017). Upper limb movements can be decoded from the time-domain of low-frequency eeg. *PLOS ONE*, 12 :e0182578.

[Ofner et al., 2019] Ofner, P., Schwarz, A., Pereira, J., Wyss, D., Wildburger, R., and Müller-Putz, G. (2019). Attempted arm and hand movements can be decoded from low-frequency eeg from persons with spinal cord injury. *Scientific Reports*, 9 :7134.

[Pfurtscheller et al., 1997] Pfurtscheller, G., Neuper, C., Flotzinger, D., and Pregenzer, M. (1997). Eeg-based discrimination between imagination of right and left hand movement. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 103(6) :642 – 651.

[Rimbert et al., 2020] Rimbert, S., Bougrain, L., and Fleck, S. (2020). Learning how to generate kinesthetic motor imagery using a bci-based learning environment : a comparative study based on guided or trial-and-error approaches. pages 2483–2498.

[Rimbert et al., 2016] Rimbert, S., Fleck, S., Nex, J., and Bougrain, L. (2016). Nécessité d'un protocole d'apprentissage progressif pour la maîtrise d'une imagination motrice après un avc.

[Spielberger et al., 1993] Spielberger, C.-D., Gorsuch, R.-L., Lushene, R., Vagg, P.-R., and Jacob, G.-A. (1993). Inventaire d'anxiété état-trait forme y (stai-y).

[Suwannarat et al., 2018] Suwannarat, A., Pan-ngum, S., and Israsena, P. (2018). Comparison of eeg measurement of upper limb movement in motor imagery training system. *BioMedical Engineering OnLine*, 17.

[Toriyama et al., 2018] Toriyama, H., Ushiba, J., and Ushiyama, J. (2018). Subjective vividness of kinesthetic motor imagery is associated with the similarity in magnitude of sensorimotor event-related desynchronization between motor execution and motor imagery. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12 :295.

[Vasilyev et al., 2017] Vasilyev, A., Liburkina, S., Yakovlev, L., Perepelkina, O., and Kaplan, A. (2017). Assessing motor imagery in brain-computer interface training : Psychological and neurophysiological correlates. *Neuropsychologia*, 97 :56–65.

[Škola et al., 2019] Škola, F., Tinková, S., and Liarokapis, F. (2019). Progressive training for motor imagery brain-computer interfaces using gamification and virtual reality embodiment. *Front Hum Neurosci*.

5 Annexes

5.1 Protocole d'apprentissage des imaginations motrices kinesthésique destiné aux sujets de l'étude

5.2 Fiche de recueil de consentement éclairé

5.3 Questionnaire sur les informations générales des participants

5.4 Questionnaire sur l'état interne du participant

5.5 Questionnaire sur la motivation

5.6 Questionnaire post-expérimentation : quel ressenti à l'issue de l'expérimentation ?

5.7 Document de report des problèmes techniques

5.8 Script eeglab

5.9 Topographies par seconde, moyennées sur l'ensemble des sujets sur une période de 0 secondes à 9 secondes et dans les bandes de fréquences alpha-mu et bêta pour les conditions Grasp et Pinch sans les électrodes P2 et P4