



# Rapport de Stage

Flying a Drone with your Mind : FlexEEG Motor Imagery

**Thomas Bourgeois**

ENSTA Bretagne  
Spécialité : Robotique

Organisation d'accueil :  
Université Norvégienne de Science et Technologie (NTNU)  
Laboratoire d'électronique

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>4</b>
1.1	L'Université Norvégienne de Science et Technologie (NTNU) et le laboratoire d'accueil . . . . .	4
1.2	Ma tutrice : Professeure Marta Molinas . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Problématisation du stage</b>	<b>6</b>
2.1	Enjeux technologiques . . . . .	6
2.2	Enjeux humains et organisationnels . . . . .	6
2.3	Enjeux économiques et sociétaux . . . . .	6
2.4	Avant et après le stage : évolution du projet . . . . .	7
2.5	Valeur ajoutée du stage . . . . .	7
<b>3</b>	<b>État de l'art — électroencéphalographie (EEG) et applications BCI pour l'imagerie motrice</b>	<b>8</b>
3.1	Principes fondamentaux de l'électroencéphalographie (EEG) . . . . .	8
3.2	Contraintes et objectifs pour une BCI temps-réel . . . . .	9
3.3	Prétraitement : améliorer le rapport signal-bruit . . . . .	9
3.4	Méthodes d'extraction de caractéristiques . . . . .	9
3.4.1	Common Spatial Patterns (CSP) . . . . .	9
3.4.2	Spectrogrammes et représentations temps-fréquence . . . . .	10
3.4.3	Approches riemanniennes . . . . .	10
3.5	Classificateurs et protocoles d'évaluation . . . . .	10
3.6	Architecture système et modes de fonctionnement . . . . .	10
3.7	Limites et perspectives . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Description de l'activité et résultats du stage</b>	<b>12</b>
4.1	Prise en main du casque EEG à 8 canaux . . . . .	12
4.2	Objectifs techniques . . . . .	12
4.3	Méthodologie . . . . .	13
4.4	Outils utilisés . . . . .	13
4.5	Présentation des drones Crazyflie . . . . .	13
4.5.1	Architecture et composants principaux . . . . .	13
4.5.2	Principe de contrôle . . . . .	14
4.5.3	Applications en recherche et robotique . . . . .	14
4.6	Présentation du casque EEG OpenBCI . . . . .	15
4.6.1	Architecture et composants principaux . . . . .	15
4.6.2	Principe de fonctionnement . . . . .	15
4.6.3	Applications en Brain-Computer Interface . . . . .	16
4.7	Fonctionnement et architecture du système . . . . .	16
4.8	Importance de l'architecture . . . . .	17
4.9	Rôle personnel et apprentissages . . . . .	17
4.10	Résultats obtenus . . . . .	18
4.11	Limites et perspectives . . . . .	18
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>20</b>
	Annexes	21

# Résumé

Ce rapport présente le travail effectué dans le cadre de mon stage de deuxième année à l'ENSTA Bretagne, réalisé au sein de l'Université Norvégienne de Science et Technologie (NTNU). Le projet s'inscrit dans le domaine des interfaces cerveau-machine (Brain-Computer Interfaces, BCI) appliquées au contrôle de drones par l'imagerie motrice enregistrée via un casque EEG OpenBCI.

L'objectif principal a été de concevoir et d'optimiser une chaîne complète allant de l'acquisition de signaux EEG bruts jusqu'au pilotage en temps réel d'un drone Crazyflie. Pour ce faire, deux pipelines de traitement et de classification ont été mis en place : l'un basé sur la méthode *Common Spatial Patterns* (CSP) associée à des classificateurs rapides tels que LDA ou SVM, l'autre utilisant des spectrogrammes combinés à des modèles plus complexes comme Random Forest ou XGBoost.

Mon apport s'est concentré sur l'architecture logicielle et la modularité du système. J'ai notamment migré l'environnement de Windows vers Linux, implémenté une architecture client-serveur permettant de sélectionner dynamiquement les algorithmes et les sources de données, et développé un simulateur de drone pour tester les algorithmes sans nécessiter d'expérimentations réelles. J'ai également rédigé un guide d'utilisation destiné à faciliter la reprise du projet par les prochaines équipes.

Les résultats obtenus ont montré des performances satisfaisantes avec la méthode CSP (75–80 % de précision), compatibles avec un fonctionnement en temps réel. Néanmoins, des limites subsistent, en particulier liées à la constitution d'une base de données EEG robuste et généralisable. Les perspectives incluent l'amélioration de la phase d'entraînement, l'extension des capacités du système vers un contrôle tridimensionnel et le perfectionnement des pipelines existants.

Ce stage a constitué une expérience scientifique et humaine enrichissante, renforçant mes compétences en robotique, traitement du signal et collaboration pluridisciplinaire, tout en m'offrant une immersion dans un environnement de recherche international.

# Abstract

This report describes the work carried out during my second-year internship at ENSTA Bretagne, conducted at the Norwegian University of Science and Technology (NTNU). The project focused on Brain–Computer Interfaces (BCIs) applied to the control of drones using motor imagery recorded with an OpenBCI EEG headset.

The main objective was to design and optimize a complete pipeline, from the acquisition of raw EEG signals to the real-time control of a Crazyflie micro-drone. Two signal processing and classification pipelines were implemented : one based on the Common Spatial Patterns (CSP) method combined with lightweight classifiers such as LDA or SVM, and another relying on spectrograms analyzed with more complex models like Random Forest or XGBoost.

My main contribution involved the system’s software architecture and modularity. I migrated the development environment from Windows to Linux, implemented a client–server architecture to dynamically select algorithms and data sources, and developed a drone simulator to test the pipelines without requiring physical experiments. I also produced a user guide to ensure that future teams can easily set up and understand the code.

The results showed promising performances with the CSP-based pipeline, achieving an accuracy of 75–80%, suitable for real-time applications. However, several limitations remain, particularly the need for a more robust and generalizable EEG database. Future work could include improving training phases, expanding drone control to three dimensions, and refining existing pipelines.

Overall, this internship provided me with valuable scientific and human experience, strengthening my skills in robotics, signal processing, and collaborative research, while offering the opportunity to work in an international academic environment.

# 1 Introduction

Dans le cadre de ma deuxième année à l'ENSTA Bretagne, j'ai choisi d'effectuer mon stage à l'étranger afin d'élargir mes compétences techniques et de découvrir un nouvel environnement académique. J'ai ainsi intégré le laboratoire d'électronique de l'Université Norvégienne de Science et Technologie (NTNU) à Trondheim, sous la supervision de Marta Molinas (professeure et encadrante) et de Dr. Luis Alfredo Moctezuma (co-encadrant).

Le projet auquel j'ai contribué s'intitule *Flying a Drone with your Mind : FlexEEG Motor Imagery*. Il s'inscrit dans le domaine émergent des interfaces cerveau-machine (Brain-Computer Interfaces, BCI), qui permettent d'interagir avec des systèmes techniques directement à partir de l'activité cérébrale. L'objectif était de concevoir un système capable de capter et de décoder les signaux cérébraux via un casque EEG OpenBCI, afin de les traduire en commandes de vol transmises à un drone en temps réel.

Ce stage représente un apport particulièrement riche pour ma formation d'ingénieur en robotique. En effet, il m'a permis de travailler à l'interface entre plusieurs disciplines :

- le traitement du signal et l'apprentissage automatique pour la classification EEG,
- les systèmes embarqués et la communication sans fil pour le pilotage du drone,
- l'intégration logicielle d'un ensemble complexe combinant capteurs, algorithmes et actionneurs.

Cette expérience contribue ainsi à développer des compétences transversales essentielles en robotique : compréhension des systèmes complexes, rigueur dans la mise en place de protocoles expérimentaux, gestion des contraintes de temps réel, et capacité à adapter des outils existants à de nouveaux environnements matériels. Plus largement, elle m'apporte une ouverture vers des applications innovantes de la robotique dans le domaine des interfaces homme-machine et du transfert de technologies issues de la recherche.

Par ailleurs, ce stage a été mené en binôme avec un autre étudiant, ce qui a représenté un enjeu supplémentaire en termes de travail collaboratif. La répartition des tâches, la coordination régulière et l'échange d'idées ont constitué des éléments clés de la réussite du projet. Cette dimension humaine m'a permis de renforcer mes compétences en travail d'équipe et en gestion collective d'un projet technique.

Au-delà de l'intérêt scientifique et technologique, ce stage représentait enfin une opportunité unique d'évoluer dans un environnement international, de collaborer avec des chercheurs spécialisés en traitement du signal et en robotique, et de confronter mes acquis théoriques à une problématique de recherche appliquée. Ce projet constituait également une expérience formatrice pour développer mon autonomie, mon sens de l'innovation et ma capacité à travailler en équipe dans un contexte interculturel.

## 1.1 L'Université Norvégienne de Science et Technologie (NTNU) et le laboratoire d'accueil

L'Université Norvégienne de Science et Technologie (NTNU), située à Trondheim, est l'un des établissements les plus prestigieux de Norvège, reconnu pour la qualité de son enseignement et de sa recherche, notamment dans les domaines de l'ingénierie, de la robotique et des sciences appliquées. Le département d'ingénierie cybernétique (Department of Engineering Cybernetics) constitue un centre d'excellence pour la recherche en robotique autonome, en systèmes embarqués et en interfaces cerveau-machine.

Au sein de NTNU, j'ai été intégré au laboratoire **Autonomous Robots Lab (ARL)**, spécialisé dans le développement de systèmes robotiques capables d'opérer de manière

autonome dans des environnements complexes et dynamiques. Ce laboratoire offre un cadre propice à la recherche appliquée, combinant innovation technologique et mise en œuvre expérimentale, avec un accès à des plateformes robotiques avancées et à des outils de traitement de signal pour la recherche sur les BCI.

## 1.2 Ma tutrice : Professeure Marta Molinas

Ma tutrice, **Marta Molinas**, est professeure au département d'ingénierie cybernétique de NTNU. Elle est spécialisée dans le traitement du signal appliqué aux interfaces cerveau-machine et à la robotique, ainsi que dans la conception de systèmes embarqués pour le contrôle de dispositifs par signaux EEG. Ses travaux portent notamment sur le décodage de l'activité cérébrale pour la commande de drones ou d'autres systèmes robotiques, avec des applications dans la rééducation neurologique et les interfaces homme-machine.

Le suivi assuré par la professeure Molinas m'a permis de bénéficier d'un encadrement scientifique rigoureux et d'un accompagnement technique précis. Son expertise a été essentielle pour comprendre les défis liés au traitement en temps réel des signaux EEG, à l'apprentissage automatique appliqué à la classification des signaux moteurs, et à l'intégration des commandes cérébrales dans un système de vol autonome. La disponibilité et l'investissement de ma tutrice ont constitué un facteur déterminant pour la réussite du projet et pour mon apprentissage durant le stage.

## 2 Problématisation du stage

Le stage que j'ai réalisé à la NTNU s'inscrivait dans une série de projets proposés par ma tutrice, tous centrés sur l'exploitation et l'amélioration des données issues de casques EEG OpenBCI. L'objectif général de ces travaux est de développer des applications innovantes basées sur l'imagerie motrice et de progresser vers un contrôle fiable d'objets connectés ou de drones directement à partir de l'activité cérébrale.

### 2.1 Enjeux technologiques

Le thème de mon stage revêtait une importance particulière dans la mesure où il s'agissait de passer d'un casque EEG à 8 canaux à un casque 32 canaux. Ce changement matériel, loin d'être trivial, soulevait des problématiques techniques majeures. D'une part, il a fallu adapter le code existant afin de gérer un flux de données beaucoup plus important et garantir une compatibilité logicielle avec l'environnement Linux, mieux adapté au nouveau casque. D'autre part, la communication avec le drone a nécessité une refonte de l'interface de pilotage afin d'assurer une transmission stable et en temps réel des commandes. Enfin, l'enrichissement du signal EEG impliquait la mise en place d'algorithmes de décision plus robustes et capables d'exploiter pleinement la richesse des données supplémentaires.

### 2.2 Enjeux humains et organisationnels

Le travail s'est déroulé dans un bureau partagé avec mon binôme de l'ENSTA et une dizaine d'autres stagiaires ou doctorants norvégiens. Tous les sujets étaient liés à l'utilisation des casques EEG, qu'il s'agisse de développer de nouveaux algorithmes de traitement ou de proposer des applications innovantes. Cette proximité a créé un environnement très collaboratif, marqué par une entraide constante entre les étudiants. Les doctorants, plus avancés, nous ont particulièrement aidés à nous approprier les concepts et à résoudre des difficultés techniques rencontrées en cours de projet.

La tutrice, Marta Molinas, était disponible pour des réunions ponctuelles, souvent à notre demande, et les échanges fréquents par mail permettaient d'obtenir rapidement des précisions ou des orientations. L'ensemble du travail se faisait en anglais, ce qui a représenté un défi supplémentaire mais aussi une opportunité d'améliorer mes compétences linguistiques dans un contexte professionnel et scientifique international.

### 2.3 Enjeux économiques et sociétaux

À un niveau plus global, ce type de projet illustre les enjeux économiques et sociétaux liés aux interfaces cerveau-machine. Les casques EEG et leurs applications ouvrent des perspectives dans des domaines variés : médical (aide aux personnes en situation de handicap ou outils de rééducation), industriel (contrôle d'objets connectés et systèmes robotiques), mais aussi ludique (jeux vidéo ou réalité virtuelle). L'amélioration des algorithmes de traitement et de l'architecture logicielle contribue à rendre ces technologies plus fiables, accessibles et reproductibles, ce qui constitue une étape essentielle vers leur démocratisation.

## 2.4 Avant et après le stage : évolution du projet

Au moment de mon arrivée, le projet fonctionnait uniquement avec un casque EEG à 8 canaux, sous Windows, et les résultats obtenus étaient peu satisfaisants pour distinguer l'imagination de mouvements à gauche et à droite. Cette faible précision était en grande partie due aux limites matérielles du casque utilisé.

À l'issue du stage, le système avait évolué vers une architecture plus robuste et modulaire, fonctionnant désormais avec un casque 32 canaux sous Linux. J'ai également mis en place une architecture client–serveur permettant de fragmenter les différentes parties du code, de choisir dynamiquement l'algorithme utilisé et d'adapter les expériences en fonction de l'individu. Enfin, une simulation simple du vol d'un drone a été implémentée, permettant de tester et corriger les algorithmes sans recourir systématiquement au matériel, ce qui a considérablement facilité le développement.

## 2.5 Valeur ajoutée du stage

Mon rôle n'était donc pas seulement d'exécuter un cahier des charges technique, mais bien de renforcer la continuité d'un projet de recherche en le rendant plus robuste, reproductible et documenté. La valeur ajoutée de mon travail réside dans l'amélioration de la compatibilité matérielle, la stabilisation des interfaces logicielles, l'intégration d'outils de simulation, ainsi que la rédaction d'un guide détaillé pour les futures équipes. Ce rapport permet aux prochains étudiants de lancer rapidement le code et de comprendre l'architecture globale du projet, garantissant ainsi une véritable pérennité scientifique et technique.

## 3 État de l’art — électroencéphalographie (EEG) et applications BCI pour l’imagerie motrice

### 3.1 Principes fondamentaux de l’électroencéphalographie (EEG)

L’électroencéphalographie (EEG) est une méthode non invasive permettant d’enregistrer l’activité électrique du cerveau à l’aide d’électrodes placées sur le cuir chevelu. Ces électrodes détectent les variations de potentiel électrique générées par l’activité neuronale, en particulier les courants post-synaptiques issus des neurones pyramidaux du cortex cérébral. Ces courants résultent des processus d’excitation et d’inhibition synaptique, et lorsqu’un grand nombre de neurones s’activent de manière *synchrone*, leurs champs électriques se somment, produisant un signal mesurable à la surface du crâne.

L’un des principaux atouts de l’EEG réside dans sa **résolution temporelle extrêmement fine**, de l’ordre de la milliseconde. Cette caractéristique en fait un outil privilégié pour étudier la dynamique temporelle des processus cognitifs, sensoriels et moteurs. En revanche, sa **résolution spatiale** reste limitée, car le signal doit traverser les couches du crâne et du cuir chevelu, ce qui en atténue et en diffuse la source. Malgré cette limitation, l’EEG demeure une technique incontournable pour l’étude en temps réel de l’activité cérébrale.

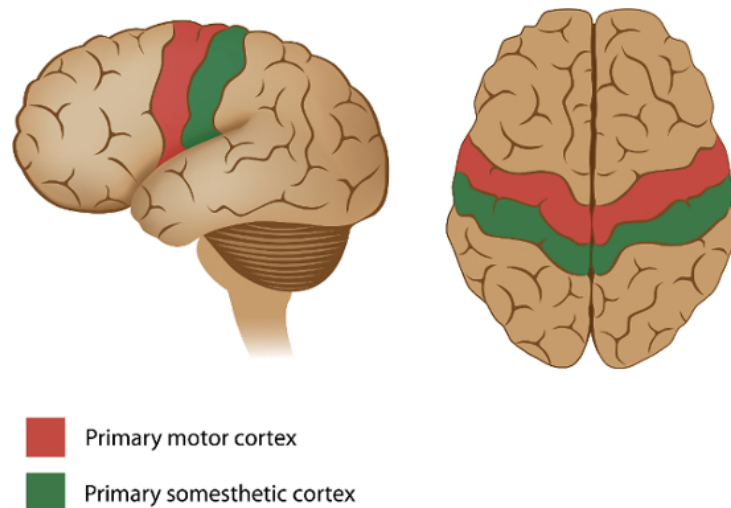


FIGURE 1 – Schéma illustrant les régions sensori-motrices du cerveau impliquées dans l’imagerie motrice.

Dans le contexte des **interfaces cerveau-machine** (*Brain-Computer Interfaces*, BCI) et plus spécifiquement de l’**imagerie motrice**, certaines bandes de fréquences jouent un rôle clé. On s’intéresse principalement aux bandes  $\mu$  (8–13 Hz) et  $\beta$  (13–30 Hz), enregistrées sur les régions sensori-motrices du cortex, typiquement situées autour des électrodes **C3** (hémisphère gauche, associé à la main droite) et **C4** (hémisphère droit, associé à la main gauche) selon le système international **10–20** de positionnement des électrodes (voir Fig. 1).

Lorsqu’un individu *exécute ou imagine* un mouvement, on observe une modulation caractéristique de la puissance dans ces bandes de fréquences :

- une **désynchronisation liée à l’événement** (*Event-Related Desynchronization*, ERD), correspondant à une diminution de la puissance des oscillations  $\mu$  et  $\beta$ ,

traduisant une activation corticale accrue pendant la préparation ou l'imagination du mouvement ;

- suivie d'une **resynchronisation liée à l'événement** (*Event-Related Synchronization*, ERS), où la puissance revient à son niveau de repos après le mouvement.

Ces variations rythmiques (ERD/ERS) constituent la base physiologique exploitée par les systèmes BCI pour **décoder les intentions motrices** de l'utilisateur à partir des signaux EEG. En analysant les fluctuations temporelles et spectrales de l'activité dans les bandes  $\mu$  et  $\beta$ , il devient ainsi possible de déterminer si le sujet imagine un mouvement, et dans certains cas, de distinguer le type de mouvement (main gauche, main droite, pied, etc.).

En résumé, l'EEG, par sa simplicité de mise en œuvre, sa haute résolution temporelle et sa sensibilité aux oscillations cérébrales, constitue un outil central pour le développement des interfaces cerveau-machine et pour la compréhension de la neurophysiologie du mouvement.

## 3.2 Contraintes et objectifs pour une BCI temps-réel

L'utilisation de l'EEG dans des applications temps réel, telles que le pilotage d'un robot ou d'un drone, impose des contraintes fortes. Pour que le système soit exploitable, il doit atteindre une précision suffisante dans la classification des signaux, typiquement supérieure à 75 % en conditions hors ligne, tout en maintenant une latence faible, inférieure à 150 ms, entre l'acquisition du signal et l'envoi de la commande. Ces contraintes orientent le choix vers des pipelines de traitement rapides et des méthodes d'extraction de caractéristiques efficaces.

## 3.3 Prétraitement : améliorer le rapport signal-bruit

Le prétraitement constitue une étape essentielle pour améliorer le rapport signal-bruit et rendre les signaux exploitables par les algorithmes de classification. Les pratiques courantes incluent un filtrage passe-bande ciblé sur la plage 8–30 Hz afin d'isoler les rythmes  $\mu$  et  $\beta$ , souvent appliqué en phase nulle pour éviter toute distorsion temporelle. Le rapport étudié utilise par exemple un filtre de type Chebyshev ordre 4 associé à une fonction de phase nulle. Un filtrage notch à 50 ou 60 Hz peut également être ajouté pour supprimer le bruit secteur, tandis que des opérations de dé-moyennage, de suppression de la composante continue et de segmentation en époques centrées sur les événements permettent de préparer le signal.

Bien que certains pipelines intègrent aussi des méthodes plus lourdes comme l'ICA ou la correction des artefacts électro-oculaires et musculaires, le choix s'oriente souvent vers une chaîne de prétraitement légère et rapide, plus adaptée aux contraintes du temps réel.

## 3.4 Méthodes d'extraction de caractéristiques

Deux grandes approches dominent pour l'extraction de caractéristiques dans l'EEG motor imagery.

### 3.4.1 Common Spatial Patterns (CSP)

La méthode CSP est la plus couramment utilisée pour la classification binaire. Elle calcule des filtres spatiaux qui maximisent la variance pour une classe et la minimisent

pour l'autre, puis utilise les log-variances des projections comme caractéristiques. Cette méthode se distingue par sa rapidité, son faible coût computationnel et son efficacité sur de petits ensembles de données. Toutefois, elle est sensible à la non-stationnarité du signal et nécessite des techniques de régularisation telles que le shrinkage ou l'estimation OAS, ainsi qu'une validation stricte pour éviter les fuites de données. Une variante appelée Filter-Bank CSP (FBCSP) applique CSP sur plusieurs sous-bandes fréquentielles afin de mieux exploiter la richesse du signal.

### 3.4.2 Spectrogrammes et représentations temps-fréquence

Les spectrogrammes, obtenus par des méthodes telles que la transformée de Fourier à court terme (STFT) ou la méthode de Welch, permettent de conserver simultanément l'information temporelle et fréquentielle, ce qui facilite l'analyse des phénomènes ERD et ERS. Ces représentations génèrent toutefois un grand nombre de caractéristiques, ce qui impose souvent une réduction de dimensionnalité (par exemple via l'analyse en composantes principales, PCA) avant d'utiliser des classificateurs plus lourds tels que les forêts aléatoires ou XGBoost. Bien que plus riches en information, ces méthodes sont moins adaptées aux contraintes du temps réel en raison de leur coût computationnel.

### 3.4.3 Approches riemanniennes

Des méthodes plus récentes exploitent la géométrie des matrices de covariance. Les pipelines riemanniens, tels que Tangent Space + LDA ou FgMDM, utilisent les propriétés des matrices symétriques définies positives et offrent une robustesse intéressante dans certaines tâches BCI. Ces approches constituent une alternative prometteuse à CSP.

## 3.5 Classificateurs et protocoles d'évaluation

Les modèles de classification utilisés incluent l'analyse discriminante linéaire (LDA), les machines à vecteurs de support (SVM), ainsi que des modèles plus complexes comme les forêts aléatoires ou le gradient boosting (XGBoost). LDA reste la référence associée à CSP en raison de sa rapidité et de sa robustesse.

L'évaluation doit impérativement respecter des protocoles rigoureux afin d'éviter les biais. Les transformations comme CSP doivent être ajustées uniquement sur les ensembles d'entraînement, et les validations s'appuient sur des techniques comme la validation croisée ou le leave-one-out. Les études montrent que CSP combiné à un classificateur linéaire permet souvent d'atteindre des performances satisfaisantes, de l'ordre de 75–80 % en moyenne.

## 3.6 Architecture système et modes de fonctionnement

Les systèmes BCI pour le contrôle de drones reposent généralement sur une architecture modulaire composée de trois étapes : prétraitement, extraction de caractéristiques et classification. Cette architecture se décline en deux modes de fonctionnement.

Le mode *offline* permet de simuler la chaîne complète sans utiliser de casque EEG ni de drone. Il est utilisé pour l'entraînement et la validation des modèles, et permet de gagner du temps tout en limitant les risques. Le mode *online*, quant à lui, consiste à traiter en continu les signaux EEG afin de générer des commandes réelles, transmises au drone via une interface de communication telle que le dongle Crazyradio USB. Ce mode impose

une gestion stricte des délais de traitement et de la communication afin de garantir un pilotage fluide.

### 3.7 Limites et perspectives

Malgré les progrès réalisés, plusieurs défis persistent. Le faible rapport signal-bruit et la variabilité interindividuelle nécessitent des calibrages spécifiques à chaque utilisateur. Les artefacts oculaires et musculaires perturbent la classification, et la robustesse en ligne est limitée par les dérives de signal ou les variations de position du casque. Les approches riches en information, comme les spectrogrammes ou l'apprentissage profond, requièrent de grandes quantités de données et des ressources de calcul importantes, ce qui limite leur utilisation immédiate en temps réel.

Les perspectives d'amélioration incluent le renforcement des étapes de prétraitement, l'utilisation de variantes CSP multi-bandes, le recours à des régularisations adaptées et le développement de recalibrages en ligne pour contrer la non-stationnarité. Au-delà du pilotage de drones, les applications des BCI basées sur l'EEG concernent la rééducation post-AVC, l'assistance aux personnes à mobilité réduite, les interfaces immersives en environnements virtuels, ainsi que la recherche fondamentale sur la cognition motrice. Ces usages illustrent le potentiel de l'EEG comme technologie accessible et prometteuse pour les interfaces cerveau-machine du futur.

## 4 Description de l'activité et résultats du stage

Le projet dans le cadre de mon stage consistait à développer et évaluer un système de classification EEG d'imagerie motrice (gauche/droite) pour le contrôle d'un drone en temps réel. L'objectif était de concevoir une chaîne complète, allant du traitement des signaux bruts jusqu'à la prise de décision et à l'envoi de commandes au drone. Cette approche illustre concrètement l'application des interfaces cerveau-machine (Brain-Computer Interfaces, BCI) à la robotique.

### 4.1 Prise en main du casque EEG à 8 canaux

La première étape du projet a consisté à se familiariser avec le casque EEG à 8 canaux, qui avait été utilisé par les étudiants des années précédentes. Cet équipement, plus simple et plus accessible que le modèle à 32 canaux, constituait une base de travail permettant de comprendre le fonctionnement global de la chaîne d'acquisition et de traitement des signaux cérébraux.

Le casque comporte huit électrodes réparties sur des emplacements standards du système 10-20, notamment autour des régions sensori-motrices (C3, C4, Cz), qui sont particulièrement pertinentes pour l'imagerie motrice. La mise en place du casque nécessite une préparation minutieuse : il faut appliquer un gel conducteur afin d'assurer une bonne conductivité entre le cuir chevelu et les électrodes, puis vérifier individuellement la qualité du contact à l'aide des indicateurs fournis par le logiciel associé. La stabilité du signal dépend fortement de la qualité de cette installation, et il est souvent nécessaire d'ajuster plusieurs fois les électrodes avant d'obtenir un niveau de bruit acceptable.

Une fois le casque en place, les premiers essais ont consisté à enregistrer des signaux bruts et à les visualiser en temps réel. Cela a permis de se familiariser avec les rythmes cérébraux captés et d'observer directement l'impact des artefacts liés aux clignements des yeux, aux mouvements musculaires ou encore aux interférences électriques de l'environnement. L'utilisation d'un casque à 8 canaux rend particulièrement visibles ces limitations, car le faible nombre d'électrodes réduit la capacité à isoler et corriger les bruits.

Sur le plan logiciel, la communication avec le casque repose sur une interface spécifique permettant d'acquérir le flux EEG et de l'envoyer vers les scripts de traitement. Cette étape a été essentielle pour comprendre la structure des données, leur fréquence d'échantillonnage, ainsi que le format attendu par les pipelines de prétraitement et de classification. Le passage par ce casque d'entrée de gamme a aussi mis en évidence la nécessité d'une architecture logicielle claire et modulaire : une grande partie du code existant devait être adaptée, car il n'était pas toujours robuste ni compatible avec l'évolution vers un casque à 32 canaux.

L'apprentissage avec ce dispositif a donc eu une double valeur. D'une part, il a fourni une première expérience pratique d'acquisition EEG, permettant de se confronter aux défis expérimentaux liés à la mise en place du matériel et à la qualité du signal. D'autre part, il a permis de poser les bases logicielles du projet, en clarifiant les étapes d'acquisition, de prétraitement et de transmission, avant de pouvoir évoluer vers un matériel plus complexe et plus performant.

### 4.2 Objectifs techniques

L'enjeu principal était de réussir à décoder l'activité cérébrale issue de l'imagination de mouvements de la main gauche ou droite, afin de la transformer en commandes fiables

pour piloter un Crazyflie micro-drone. Pour garantir une expérience réaliste, le système devait répondre à deux contraintes fortes. La première était la précision de classification, qui devait être suffisante pour que le pilotage soit exploitable, avec un objectif fixé à 75 % de taux de reconnaissance hors ligne. La seconde concernait la latence, qui devait rester faible pour assurer un contrôle fluide, avec un délai maximal de 150 ms entre l’acquisition des signaux EEG et l’envoi des commandes au drone.

### 4.3 Méthodologie

Deux approches complémentaires de traitement du signal ont été développées. La première approche repose sur le pipeline CSP (Common Spatial Patterns), qui permet d’extraire des caractéristiques discriminantes exploitables par des classificateurs tels que LDA ou SVM. Cette méthode est rapide, robuste et adaptée aux contraintes du temps réel. La seconde approche utilise des spectrogrammes, via la transformée de Fourier à court terme (STFT), dont les dimensions sont réduites avant d’être analysées par des classificateurs plus complexes tels que Random Forest ou XGBoost. Cette approche fournit des informations plus riches mais présente un coût computationnel plus élevé.

### 4.4 Outils utilisés

- Python pour le prototypage,
- scikit-learn pour l’apprentissage,
- Crazyflie + Crazyradio dongle pour le contrôle,
- scripts de prétraitement EEG (band-pass 8–30 Hz, filtres notch, normalisation),
- modes hors ligne (simulation/validation) et en ligne (contrôle en temps réel),
- casque EEG OpenBCI 32 canaux.

### 4.5 Présentation des drones Crazyflie

Les drones **Crazyflie** sont des micro-drones quadricoptères développés par la société suédoise Bitcraze. Ils se distinguent par leur petite taille, leur légèreté (environ 27 grammes pour la version standard) et leur architecture ouverte, qui en fait des plateformes idéales pour la recherche et le prototypage de systèmes robotiques.

#### 4.5.1 Architecture et composants principaux

Un drone Crazyflie est constitué des éléments suivants :

- **Structure mécanique** : un châssis léger supportant quatre rotors, disposés en configuration quadricoptère, permettant la génération de portance et le contrôle de l’attitude.
- **Moteurs et hélices** : quatre moteurs brushless (ou micro-moteurs dans les versions plus petites) couplés à des hélices, dont la vitesse relative permet de contrôler le roulis, le tangage, le lacet et l’altitude.
- **Carte de contrôle (Flight Controller)** : un microcontrôleur embarqué (STM32) qui exécute les algorithmes de contrôle en temps réel. Il reçoit les commandes de vol, lit les capteurs et ajuste la puissance des moteurs pour stabiliser le drone.
- **Capteurs** :
  - **IMU (Inertial Measurement Unit)** : accéléromètre et gyroscope pour mesurer les mouvements linéaires et angulaires.

- **Baromètre et capteur de pression** (sur certaines versions) pour estimer l'altitude.
- **Capteurs optiques ou de position** (comme le système de motion capture) pour le positionnement précis en intérieur.
- **Communication sans fil** : radio 2,4 GHz pour la réception des commandes ou transmission de données, compatible avec les systèmes de contrôle centralisé et les interfaces BCI.

#### 4.5.2 Principe de contrôle

Le contrôle d'un Crazyflie repose sur des boucles de régulation en temps réel :

- **Stabilisation de l'attitude** : les mesures de l'IMU permettent au contrôleur de corriger en continu le roulis, le tangage et le lacet pour maintenir le drone stable.
- **Contrôle de la position** : lorsque le drone est utilisé avec un système de localisation (motion capture ou GPS), le contrôleur ajuste l'altitude et la position horizontale pour suivre des trajectoires précises.
- **Commande des moteurs** : les algorithmes PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) calculent la puissance à fournir à chaque moteur pour atteindre l'attitude et la position désirées.

#### 4.5.3 Applications en recherche et robotique

Les drones Crazyflie sont largement utilisés en robotique expérimentale et dans la recherche sur les interfaces cerveau-machine (BCI) en raison de plusieurs caractéristiques importantes. Leur taille compacte et leur légèreté assurent une sécurité optimale lors d'expérimentations en intérieur. De plus, ils disposent d'une plateforme logicielle ouverte, ce qui permet d'intégrer facilement des capteurs externes et de développer des algorithmes de contrôle personnalisés. Enfin, ces drones sont compatibles avec des systèmes de contrôle en temps réel à distance, ce qui facilite leur utilisation avec des signaux EEG ou d'autres interfaces expérimentales. Grâce à ces atouts, les Crazyflie constituent un environnement idéal pour tester des interfaces cerveau-machine et des algorithmes de contrôle avancés dans le cadre de projets de robotique expérimentale.



FIGURE 2 – Drones Crazyflie utilisés.

## 4.6 Présentation du casque EEG OpenBCI

Le casque EEG **OpenBCI** est une plateforme open-source dédiée à l'acquisition de signaux électroencéphalographiques (EEG). Il permet de mesurer l'activité électrique du cerveau à travers des électrodes placées sur le cuir chevelu, offrant une interface naturelle pour les projets de Brain-Computer Interface (BCI).

### 4.6.1 Architecture et composants principaux

Le casque OpenBCI se compose de plusieurs éléments clés :

- **Électrodes EEG** : capteurs placés sur des points spécifiques du cuir chevelu, selon la configuration standard 10-20 ou des configurations personnalisées, permettant de détecter les signaux électriques générés par l'activité neuronale.
- **Amplificateurs et circuits frontaux** : amplifient les signaux EEG très faibles (de l'ordre de quelques microvolts) et filtrent le bruit électrique.
- **Convertisseur analogique-numérique (ADC)** : transforme les signaux analogiques provenant des électrodes en données numériques exploitables par un ordinateur ou un microcontrôleur.
- **Microcontrôleur et transmission sans fil** : certains modèles intègrent un microcontrôleur (par exemple Cortex-M4) et permettent la transmission des données en temps réel via Bluetooth ou USB vers un ordinateur.

### 4.6.2 Principe de fonctionnement

Le casque OpenBCI capte l'activité électrique cérébrale de manière non invasive. Les électrodes enregistrent les variations de potentiel générées par l'activité neuronale, puis les signaux bruts sont amplifiés et filtrés afin d'éliminer le bruit provenant des muscles, des yeux ou de l'environnement électrique. Les données numériques ainsi obtenues sont transmises en temps réel à un ordinateur ou à une plateforme de traitement embarquée.

Des algorithmes de traitement du signal et d'apprentissage automatique analysent ces signaux pour détecter des motifs spécifiques, comme l'imagerie motrice, qui peuvent ensuite être traduits en commandes pour piloter un drone ou un autre dispositif.

### 4.6.3 Applications en Brain–Computer Interface

Le casque OpenBCI est particulièrement adapté aux projets BCI grâce à sa compatibilité avec des logiciels open-source pour le traitement des signaux EEG, ainsi que sa modularité, qui permet de configurer le nombre et l'emplacement des électrodes selon les besoins de l'expérience. De plus, il fournit des signaux en temps réel, essentiels pour le contrôle de dispositifs tels que les drones Crazyflie. Cette plateforme offre donc la possibilité de créer des interfaces cerveau–machine expérimentales, permettant une interaction directe entre l'activité cérébrale et des systèmes robotiques autonomes.



FIGURE 3 – casque EEG OpenBCI 32 canaux utilisé.

## 4.7 Fonctionnement et architecture du système

Le système repose sur trois couches principales. La première consiste en la préparation des données, incluant le filtrage et la segmentation des signaux EEG. La deuxième étape concerne l'extraction des caractéristiques, réalisée soit via CSP, soit à l'aide de spectrogrammes. Enfin, la troisième couche effectue la prédiction à l'aide de classificateurs tels que LDA, SVM, Random Forest ou XGBoost.

Le système peut fonctionner en mode hors ligne (Offline), ce qui permet de simuler les expériences sans utiliser le casque ni le drone. Ce mode constitue une innovation clé, facilitant la validation rapide et sécurisée du pipeline. En mode en ligne (Online), les signaux EEG captés par le casque OpenBCI sont convertis en commandes transmises au drone via le dongle Crazyradio.

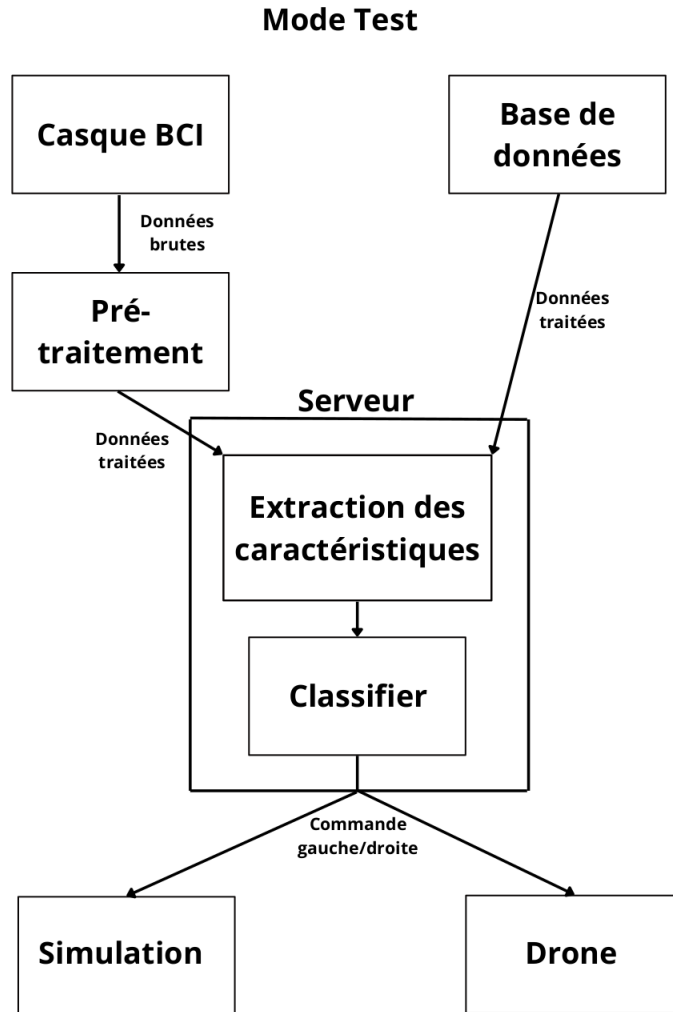


FIGURE 4 – architecture du contrôle de drone.

## 4.8 Importance de l'architecture

L'architecture modulaire développée garantit plusieurs avantages. Elle assure une robustesse scientifique, permettant de reproduire les expériences de manière fiable. Elle offre également un niveau de sécurité important, grâce à la possibilité de tester les protocoles dans un environnement virtuel avant les essais réels. Enfin, cette modularité permet une grande souplesse, autorisant l'ajout futur de nouveaux pipelines ou modèles pour enrichir et améliorer le système existant.

## 4.9 Rôle personnel et apprentissages

Mon rôle principal a concerné l'architecture logicielle du projet. Dans un premier temps, j'ai assuré la migration de l'environnement de développement de Windows vers Linux, ce dernier étant plus adapté à l'utilisation du casque OpenBCI à 32 canaux. Cette transition a permis de stabiliser l'acquisition des signaux et d'améliorer la compatibilité avec les outils de traitement.

J'ai ensuite conçu et implémenté une architecture de type client–serveur afin de rendre le code plus modulable et mieux structuré. Cette nouvelle organisation permet de fragmen-

ter les différentes parties du projet, de sélectionner dynamiquement l'algorithme à utiliser et de décider si les données traitées proviennent d'une base de données préexistante ou directement du casque EEG. Une fonctionnalité supplémentaire a été développée pour individualiser les expérimentations, car les performances des algorithmes varient selon les utilisateurs et il est important de pouvoir adapter le pipeline à chaque profil.

Un autre apport majeur a été la création d'un simulateur de drone. Cette simulation simple, mais fonctionnelle, reproduit le déplacement latéral d'un drone virtuel, allant à gauche ou à droite toutes les 1,5 secondes selon les commandes reçues du serveur. Elle a permis de tester les algorithmes sans avoir besoin d'utiliser le drone physique ni de porter le casque EEG, réduisant ainsi le temps de mise en place des expériences et facilitant la correction des bugs. J'ai également commencé à implémenter des fonctionnalités supplémentaires, comme le décollage et l'atterrissage contrôlés par la pensée. Bien que cette extension ne soit pas encore fonctionnelle, faute de base de données adéquate et de temps pour en construire une, elle constitue une piste prometteuse pour la suite du projet.

Dans une optique de continuité, j'ai également rédigé un guide d'installation et d'utilisation détaillé. Ce document a pour objectif d'aider les prochaines personnes qui travailleront sur le projet à lancer rapidement le code et à comprendre son fonctionnement global. Il constitue un support essentiel pour assurer la pérennité du travail réalisé et faciliter la transmission des connaissances.

Mon binôme, quant à lui, s'est concentré sur le cœur algorithmique du système. Il a amélioré les modèles existants et en a implémenté de nouveaux, renforçant ainsi la robustesse et la diversité des méthodes de classification disponibles.

Ce stage m'a permis de développer des compétences essentielles pour un ingénieur en robotique. J'ai acquis de l'expérience dans la conception de code modulaire et évolutif, ainsi que dans l'intégration de capteurs et d'actionneurs sous contraintes temps réel. Le travail collaboratif avec mon binôme a également renforcé ma capacité à coordonner des tâches techniques complexes et à partager efficacement les responsabilités au sein d'un projet de recherche appliquée. Enfin, la validation expérimentale des pipelines, que ce soit en simulation ou sur système réel, m'a donné une meilleure maîtrise des protocoles scientifiques et des contraintes liées aux environnements de test.

## 4.10 Résultats obtenus

L'évaluation du système a montré que le pipeline CSP combiné à LDA ou SVM atteignait une précision de 75 à 80 %, compatible avec un fonctionnement en temps réel. En revanche, le pipeline basé sur les spectrogrammes s'est révélé trop lourd en calcul et moins performant lorsque les données disponibles étaient limitées.

Certaines limites ont été identifiées au cours du projet. Le prétraitement des données pouvait encore être amélioré, un calibrage spécifique était nécessaire pour chaque utilisateur, et la robustesse du système restait sensible aux variations du signal EEG.

## 4.11 Limites et perspectives

L'un des principaux défis rencontrés au cours de ce projet a été la constitution d'une base de données EEG exploitable. Bien que nous ayons réussi à en créer une première version, ce travail s'est avéré particulièrement chronophage et reste encore incomplet. En l'état actuel, la base est individuelle et ne permet pas une généralisation robuste des résultats à différents utilisateurs. Ce caractère spécifique limite la portée des algorithmes,

qui doivent être recalibrés pour chaque personne. De plus, certaines fonctionnalités envisagées, comme le décollage et l’atterrissage du drone par la pensée, n’ont pas pu être mises en place faute de temps et de données adaptées.

Pour les équipes futures qui poursuivront ce projet, il sera essentiel d’améliorer la phase d’entraînement des algorithmes, notamment en enrichissant et en diversifiant la base de données. Un travail particulier pourrait être consacré à la mutualisation des données afin de rendre les modèles plus généralisables et moins dépendants d’un utilisateur unique. L’exploration de méthodes d’apprentissage plus avancées, comme les réseaux de neurones profonds, pourrait également constituer une piste intéressante pour améliorer les performances de classification et la robustesse en conditions réelles.

Enfin, une perspective ambitieuse mais particulièrement prometteuse serait de développer le projet vers un contrôle du drone dans les trois dimensions. À l’heure actuelle, le système est limité à des commandes latérales simples (droite ou gauche), mais un contrôle plus complet ouvrirait la voie à des applications beaucoup plus riches, que ce soit en recherche scientifique, en assistance médicale ou encore dans le domaine des interactions homme–machine.

## 5 Conclusion

Ce stage m'a offert une expérience formatrice à la croisée de la robotique, du traitement du signal et des interfaces cerveau-machine. J'ai pu contribuer à la conception d'un système complet permettant de décoder des signaux EEG d'imagerie motrice et de les traduire en commandes pour piloter un drone. Ce travail m'a confronté à des problématiques variées, allant de la mise en place d'architectures logicielles modulaires à l'intégration de pipelines de classification et à la gestion des contraintes de temps réel.

Au-delà des résultats techniques obtenus, ce projet m'a permis de développer des compétences essentielles pour ma future carrière d'ingénieur : capacité à structurer un code robuste et évolutif, mise en place de protocoles expérimentaux fiables, gestion des contraintes liées au matériel, et collaboration au sein d'une équipe pluridisciplinaire. L'élaboration d'outils complémentaires, comme le simulateur de drone ou le guide utilisateur, a également contribué à renforcer la continuité et la pérennité du projet.

Les limites rencontrées, en particulier la difficulté à constituer une base de données EEG suffisamment riche et généralisable, mettent en évidence l'importance d'un travail collaboratif sur le long terme. Les perspectives de développement, qu'il s'agisse de perfectionner les algorithmes, d'étendre les capacités du système à un contrôle tridimensionnel ou de mutualiser les données entre utilisateurs, ouvrent la voie à des avancées significatives pour les futures équipes.

Enfin, ce stage a constitué une véritable immersion dans un environnement de recherche international, où j'ai eu l'opportunité de collaborer avec des chercheurs spécialisés et de découvrir la richesse scientifique et humaine d'un tel contexte. Il a confirmé mon intérêt pour les domaines mêlant robotique, intelligence artificielle et interaction homme-machine, tout en renforçant mon autonomie, ma créativité et mon sens de l'innovation. Ce projet représente ainsi une étape importante de ma formation d'ingénieur et un point de départ vers de nouvelles explorations technologiques et scientifiques.

## Références

- [1] Sumit Kumar Ram, *Experience designing a BCI for flying a drone based on the use of Empirical Mode Decomposition*, Tech. rep., Trondheim : Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Information Technology, Mathematics, and Electrical Engineering, Department of Engineering Cybernetics, Nov. 2016. <https://www.researchgate.net/publication/317579079>. doi : 10.13140/RG.2.2.16858.13761.
- [2] Kjersti Brynstad and Erlend Vatsvåg, *An Asynchronous Motor Imagery-based Brain-Computer Interface for Two-Dimensional Drone Control*, Master's Thesis, Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, 2021.
- [3] Helene Tørlen Lønvik and Pauline Mørch Jonassen, *An Exploration of Techniques for Electroencephalography-Based Motor Imagery Classification for Real-Time Drone Control*, Master's Thesis, Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, 2023.
- [4] Ma, X., Li, Y., Chen, Z., *Motor imagery-based brain-computer interfaces for upper limb rehabilitation : A clinical study*, *Frontiers in Neuroscience*, vol. 18, pp. 11134735, 2024. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11134735/>. doi : 10.3389/fnins.2024.11134735.
- [5] Yang, H., Zhang, W., Liu, Y., *High-quality EEG motor imagery dataset for brain-computer interface research*, *Scientific Data*, vol. 12, pp. 4826, 2025. <https://www.nature.com/articles/s41597-025-04826-y>. doi : 10.1038/s41597-025-04826-y.

Merci de retourner ce rapport par courrier ou par voie électronique en fin du stage à :  
At the end of the internship, please return this report via mail or email to:

ENSTA Bretagne – Bureau des stages - 2 rue François Verny - 29806 BREST cedex 9 – FRANCE  
☎ 00.33 (0) 2.98.34.87.70 / [stages@ensta-bretagne.fr](mailto:stages@ensta-bretagne.fr)

## I - ORGANISME / HOST ORGANISATION

NOM / Name \_\_\_\_\_

Adresse / Address \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Tél / Phone (including country and area code) \_\_\_\_\_

Nom du superviseur / Name of internship supervisor \_\_\_\_\_

Fonction / Function \_\_\_\_\_

Adresse e-mail / E-mail address \_\_\_\_\_

Nom du stagiaire accueilli / Name of intern \_\_\_\_\_

## II - EVALUATION / ASSESSMENT

Veillez attribuer une note, en encerclant la lettre appropriée, pour chacune des caractéristiques suivantes. Cette note devra se situer entre **A (très bien)** et **F (très faible)**  
Please attribute a mark from **A (excellent)** to **F (very weak)**.

### MISSION / TASK

❖ La mission de départ a-t-elle été remplie ? A B C D E F  
Was the initial contract carried out to your satisfaction?

❖ Manquait-il au stagiaire des connaissances ?  oui/yes  non/no  
Was the intern lacking skills?

Si oui, lesquelles ? / If so, which skills? \_\_\_\_\_

### ESPRIT D'ÉQUIPE / TEAM SPIRIT

❖ Le stagiaire s'est-il bien intégré dans l'organisme d'accueil (disponible, sérieux, s'est adapté au travail en groupe) / Did the intern easily integrate the host organisation? (flexible, conscientious, adapted to team work)  
A B C D E F

Souhaitez-vous nous faire part d'observations ou suggestions ? / If you wish to comment or make a suggestion, please do so here \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

### COMPORTEMENT AU TRAVAIL / BEHAVIOUR TOWARDS WORK

Le comportement du stagiaire était-il conforme à vos attentes (Ponctuel, ordonné, respectueux, soucieux de participer et d'acquérir de nouvelles connaissances) ?

Did the intern live up to expectations? (Punctual, methodical, responsive to management instructions, attentive to quality, concerned with acquiring new skills)?

A B C D E F

Souhaitez-vous nous faire part d'observations ou suggestions ? / If you wish to comment or make a suggestion, please do so here \_\_\_\_\_

### INITIATIVE – AUTONOMIE / INITIATIVE – AUTONOMY

Le stagiaire s'est-il rapidement adapté à de nouvelles situations ? A B C D E F  
(Proposition de solutions aux problèmes rencontrés, autonomie dans le travail, etc.)

Did the intern adapt well to new situations? A B C D E F  
(eg. suggested solutions to problems encountered, demonstrated autonomy in his/her job, etc.)

Souhaitez-vous nous faire part d'observations ou suggestions ? / If you wish to comment or make a suggestion, please do so here \_\_\_\_\_

### CULTUREL – COMMUNICATION / CULTURAL – COMMUNICATION

Le stagiaire était-il ouvert, d'une manière générale, à la communication ? A B C D E F  
Was the intern open to listening and expressing himself /herself?

Souhaitez-vous nous faire part d'observations ou suggestions ? / If you wish to comment or make a suggestion, please do so here \_\_\_\_\_

### OPINION GLOBALE / OVERALL ASSESSMENT

❖ La valeur technique du stagiaire était : A B C D E F  
Please evaluate the technical skills of the intern:

### III - PARTENARIAT FUTUR / FUTURE PARTNERSHIP

❖ Etes-vous prêt à accueillir un autre stagiaire l'an prochain ?

Would you be willing to host another intern next year?  oui/yes  non/no

Fait à \_\_\_\_\_, le \_\_\_\_\_  
In \_\_\_\_\_, on \_\_\_\_\_

Signature Entreprise Moli Signature stagiaire  
Company stamp \_\_\_\_\_ Intern's signature

**Merci pour votre coopération**  
**We thank you very much for your cooperation**