



CentraleSupélec

RAPPORT TL SIR COMMANDE DE ROBOT PAR INTERFACE CÉRÉBRALE

**- Rafael ELLER CRUZ, Mathieu DAVIET, Heloise HUYGHUES
DESPOINTES-**

promo 2018

Table des matières

1	Introduction	1
2	Étapes amenant à l'extraction de la commande du robot à partir des signaux cérébraux	2
2.1	Le signal d'entrée	2
2.2	Étapes pour l'extraction de la commande à partir du signal	4
2.3	Définition des objectifs de la modélisation	6
2.4	Maximisation du rapport signal sur bruit	6
2.5	Minimisation de l'erreur de prédiction	7
2.6	Définition de la fonction de commande	8
3	Contrôle du Robot	10
3.1	Choix d'architecture	10
3.2	Mise en oeuvre du système et résultats	11
4	Conclusion	14

1 Introduction

Lors de ses 11 séances de TL d'approfondissement, nous avons eu l'occasion de réaliser la commande d'un robot Khepera à partir de signaux provenant d'une interface cerveau machine (BCI). Ce projet nous a permis de mettre en pratique les connaissances que nous avons acquises lors des cours de la majeure Systèmes Interactifs et Robotiques et plus particulièrement celles des cours de Modélisation et Analyse Spectrale, Robotique autonome et Programmation C++.

Deux robots Khepera, un système d'acquisition cérébrale et 3 signaux pré-enregistrés ont été mis à notre disposition pour ce projet. Le robot ne sera commandé que par 4 ordres: rester immobile, tourner à droite, tourner à gauche et avancer.

Notre travail à travers les séances et dans ce rapport est décomposé en 2 grandes étapes: l'extraction des commandes sur les signaux BCI que nous avons effectué principalement sous Matlab et le contrôle du robot grâce au framework ROS et à Python.

2 Étapes amenant à l'extraction de la commande du robot à partir des signaux cérébraux

2.1 Le signal d'entrée

Le signal de commande que l'on va être amené à analyser en entrée du système correspond au signal en sortie de la BCI. Dans le cadre de ce TL, 3 signaux pré-enregistrés à une fréquence de 256Hz nous ont été fournis et peuvent être rejoués à volonté. Pour chaque période de temps, les signaux enregistrés possèdent deux valeurs correspondant chacune à un canal du capteur. Nous aurions pu effectuer nos propres enregistrements à l'aide d'un capteur BIOSEMI à 2048Hz mais par manque de temps, nous nous sommes concentrés sur les signaux déjà enregistrés.

Le signal en sortie de la BCI est influencé par trois plaques clignotant respectivement autour de 7.5Hz, 11Hz et 13.5Hz. Lorsque l'expérimentateur regarde l'une des plaques à une fréquence donnée, cette fréquence se répercute dans l'émission de ses signaux cérébraux et se retrouve dans le signal récupéré par la BCI. Chacune de ces plaques clignotantes correspond à un ordre particulier. L'expérimentateur doit regarder la plaque clignotant à 7.5Hz si il veut que le robot tourne à gauche, celle clignotant à 11Hz si il veut que le robot avance, celle clignotant à 13.5Hz si il veut que le robot tourne à droite et ne regarder aucune plaque si il veut que le robot s'arrête.

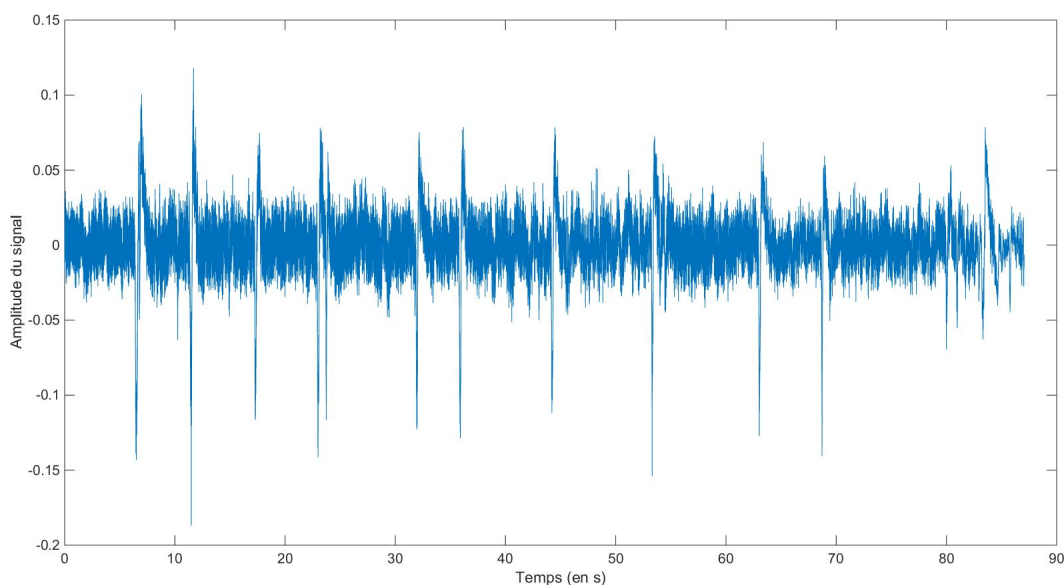


Figure 1: Signal brut en sortie de la BCI enregistré

Pour faciliter l'exploitation des résultats nous avons appliqué un pré-processing aux signaux enregistrés.

Tout d'abord, les signaux enregistrés sont bi-canaux. Ainsi, pour qu'ils soient plus faciles à manipuler par la suite, nous les avons transformés en signaux monocanal correspondant à la moyenne des deux canaux.

Ensuite, le problème est que les signaux enregistrés ne possèdent pour l'instant que les valeurs du capteur en fonction du temps. Les labels indiquant quels ordres ont été donné dans le temps ne sont disponibles que de manière écrite dans le sujet. Pour faciliter la modélisation et l'optimisation de la commande de robot par la suite, nous avons ajouté une deuxième colonne à chaque signal monocanal enregistré correspondant à l'ordre attendu en fonction du temps. Pour ce faire, nous avons associé un nombre à chaque ordre: 0 pour l'ordre ne rien faire, 1 pour l'ordre d'avancer, 2 pour l'ordre de tourner à droite et 3 pour l'ordre de tourner à gauche. L'ajout du label automatiquement nous permettra par la suite d'évaluer le taux d'erreur que nous commettons par rapport aux ordres attendus dans le but d'évaluer l'efficacité du traitement du signal que nous effectuerons.

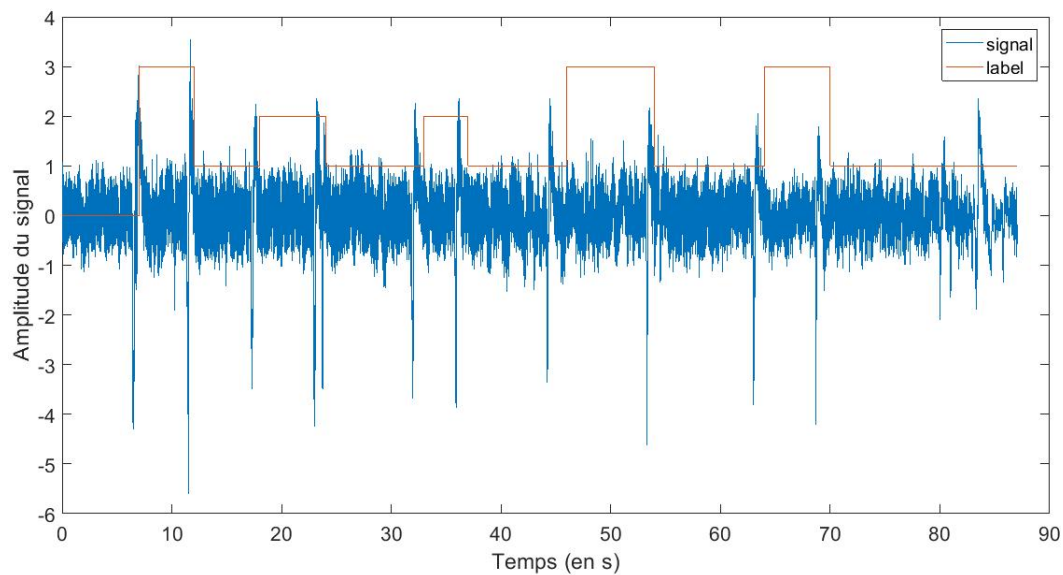


Figure 2: Signal brut monocanal labellisé

2.2 Etapes pour l'extraction de la commande à partir du signal

Comme on peut le constater sur la figure 1, le signal a besoin d'être traité pour pouvoir être exploité par la suite. La première étape va consister à extraire du signal de départ 3 signaux autour des fréquences qui nous intéressent à savoir 7.5 Hz, 11Hz et 13.5Hz. Pour effectuer cela nous utilisons 3 filtres passe-bande dont les paramètres sont la bande passante: Δf , le gain: G et la fréquence centrale: f_c . Les fréquences centrales correspondent respectivement à 7.5Hz, 11Hz et 13.5Hz pour chacun des 3 filtres. Nous verrons par la suite le moyen par lequel nous avons optimisé les autres paramètres. Comme le montre la figure 3 ci-dessous, nous constatons que ce premier filtre nous permet déjà de distinguer les ordres donnés par l'expérimentateur via la BCI.

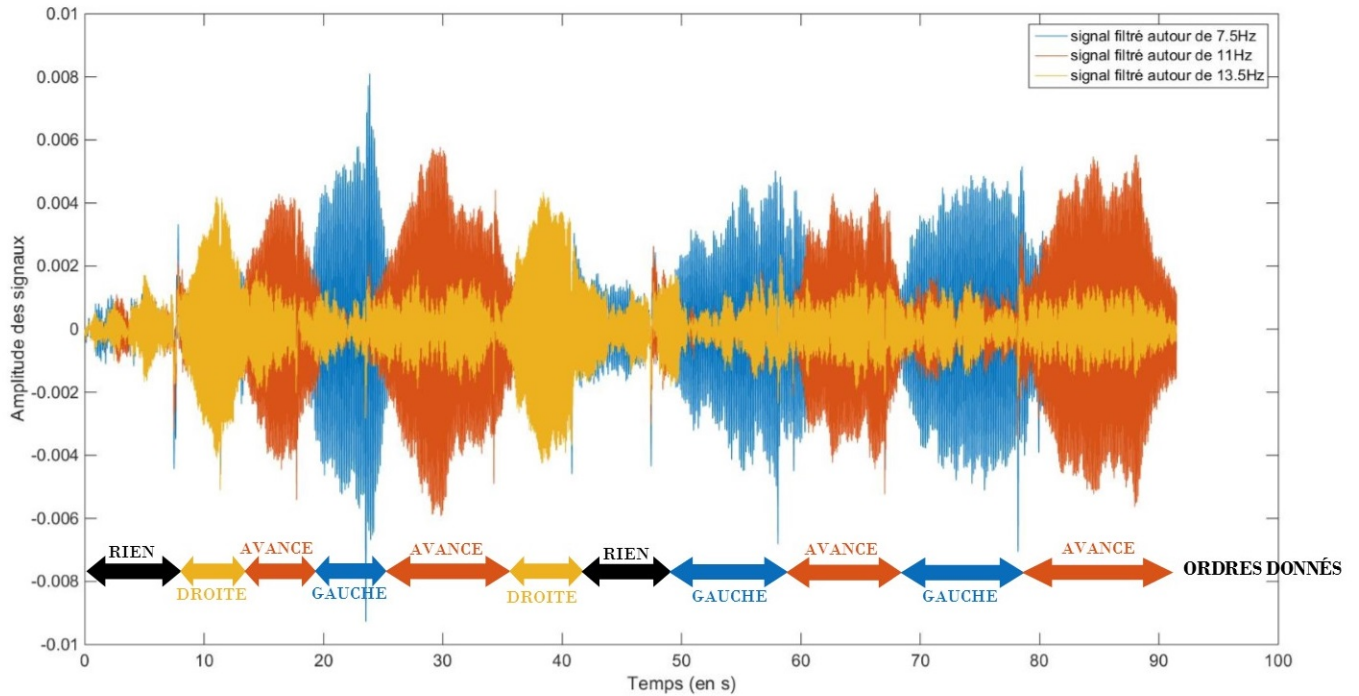


Figure 3: Trois signaux en sortie du filtre passe bande centrés respectivement en 7.5Hz, 11Hz et 13.5Hz

Malgré que le fait que l'on arrive à distinguer à l'œil nu les ordres à partir des 3 signaux en sortie des filtres passe-bande, il est nécessaire d'obtenir des signaux plus propres pour par la suite formaliser un processus de décision concernant la commande du robot. En effet, le signal est toujours sous forme sinusoïdale, ce qui n'est pas pratique pour calculer son amplitude à un moment précis. De plus, le signal est encore très sensible au bruit. Pour résoudre ces problèmes nous allons calculer la puissance lissée de chacun des 3 signaux.

Nous obtenons la puissance en mettant au carré notre signal, cela nous permet d'avoir un signal ne contenant que des valeurs positives. L'effet de lissage permet de réduire le bruit mais cela augmente l'inertie et diminue la résolution. Cet effet de lissage dispose d'un paramètre α dont nous justifierons le choix par la suite. La puissance lissée nous permet ainsi d'obtenir des signaux exploitables par la suite pour commander le robot grâce à un processus de décision qui va être détaillé dans la suite du rapport.

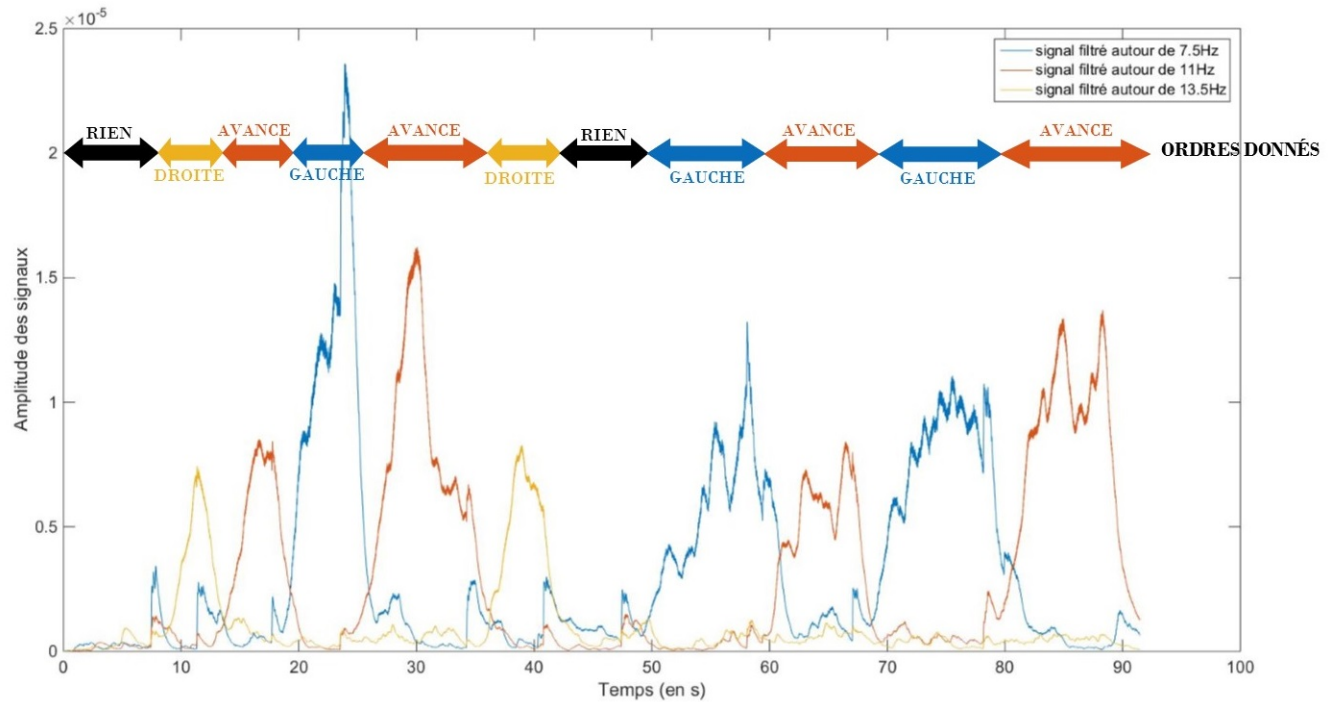


Figure 4: Trois signaux en sortie du filtre passe bande centrés respectivement en 7.5Hz, 11Hz et 13.5Hz

Ensuite, dans la partie dédiée à la mise en pratique avec ROS, nous allons voir qu'il est nécessaire de mettre en place un buffer pour réduire la fréquence du système. Pour coller le plus possible à la réalité nous allons donc simuler ce buffer grâce à un filtre passe-bas appliqué à la puissance lissée. Cela nous permettra d'effectuer des simulations plus pertinentes. Les filtres passe-bas ont les mêmes effets que le lissage de la puissance: diminution du bruit et augmentation de l'inertie.

Pour récapituler cette partie, un diagramme se trouve ci-dessous retraçant les différentes étapes par lesquelles passent le signal pour que l'on puisse en extraire un ordre.

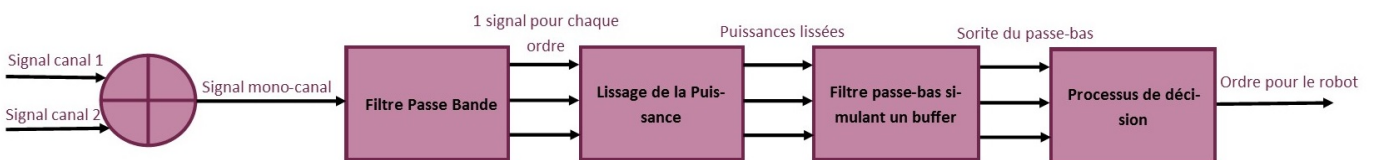


Figure 5: Récapitulatif de l'architecture nous permettant de prendre une décision quant à l'ordre à donner au robot

2.3 Définition des objectifs de la modélisation

La modélisation consiste à déterminer les paramètres de la fonction de commande qui, à partir des signaux BCI, prédit la suite d'ordres donnés au robot. Ces ordres peuvent être donnés pour des durées différentes (environ 5s dans les signaux fournis) et peuvent être les suivants :

- avancer
- aller à droite
- aller à gauche
- rester immobile/s'immobiliser

Après le traitement du signal par les filtres et le calcul de la puissance lissée pour chacun des signaux correspondant à une fréquence et donc à un ordre, nous avons, dans un premier temps, considéré que l'ordre donné était celui associé au signal de plus grande amplitude et que si les signaux étaient tous inférieurs à un certain seuil, cela caractérisait l'absence d'ordre. Nous avons cherché à optimiser les paramètres de la fonction de commande relativement à deux grandeurs : le rapport signal sur bruit global l'erreur de prédiction des ordres

Pour calculer le rapport signal sur bruit global, nous avons commencé par distinguer, pour chaque signal y_i :

- les échantillons pendant lesquels un ordre correspondant à la fréquence du signal y_i était donné
- les échantillons pendant lesquels l'ordre correspondant à la fréquence y_i n'était pas donné

Puis, pour chacun des trois signaux y_i , nous avons calculé la puissance moyenne du signal sur les échantillons correspondant à l'ordre associé à y_i (cela constitue le « signal ») ainsi que la puissance moyenne du signal sur les échantillons correspondant à un ordre autre que celui associé à y_i (cela constitue le « bruit »). Ensuite, nous avons calculé la moyenne de ces 3 rapports signal/bruit pour avoir un rapport signal sur bruit global, qu'on cherchera à maximiser dans le choix des paramètres (fonction SNR dans Matlab).

Afin de juger de la qualité de la fonction de commande, nous avons également défini la fonction « erreurprédiction » qui compare, pour chaque échantillon d'un enregistrement, l'ordre réel, donné dans l'énoncé, et l'ordre prédit par la fonction « commande ». La fonction « erreurprédiction » donne en sortie le pourcentage d'échantillons pour lesquels l'ordre prédit ne correspond pas à l'ordre réel.

2.4 Maximisation du rapport signal sur bruit

La première étape de l'optimisation des paramètres de commande est celle des paramètres des filtres passe-bande utilisés. Nous avons cherché à trouver le gain (G) et la bande passante (Δf) maximisant le rapport signal sur bruit pour le signal en sortie des filtres. Pour cela, nous avons réutilisé la fonction de calcul du rapport signal sur bruit décrite précédemment (SNR) et nous avons procédé par grid-search sur les paramètres G et Δf . Cette étape d'optimisation est donnée par « choixDfGain ». Nous avons obtenu la figure suivante, avec un arc (jaune clair) de couples (Δf , G) optimaux.

Pour la suite, nous avons choisi :

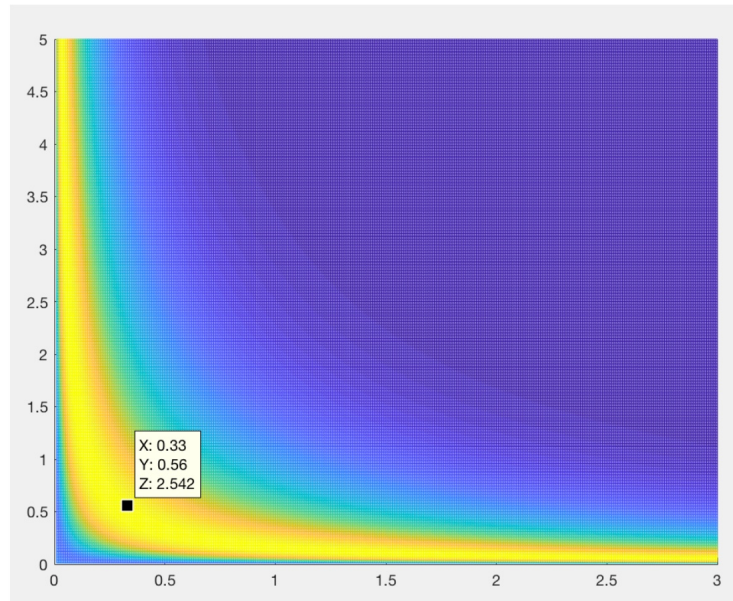


Figure 6: Couples (δ_f, G) minimisant le SNR

- $\delta_f = 0,33$
- $G = 0,56$

2.5 Minimisation de l'erreur de prédiction

Après avoir maximisé le rapport SNR relativement à δ_f et G , nous avons cherché à minimiser l'erreur entre la prédiction d'ordre et les ordres réels.

Pour ce faire, nous avons jugé qu'il serait plus pertinent d'associer à chaque signal un seuil, au delà duquel on considérerait que l'ordre est donné, différent plutôt qu'un seuil global. Nous avons donc cherché à optimiser 3 seuils différents, un associé à chaque signal y_i . De plus, le paramètre de lissage α , lui aussi, été optimisé de façon à minimiser l'erreur de prédiction.

Nous avons procédé de façon itérative par optimisation successive des seuils optimaux et du paramètre α relativement à l'erreur de prédiction. Nous avons commencé par fixer α , le paramètre d'estimation lissée de la puissance de chacun des signaux. Plus α s'approche de 1 par valeurs inférieures, plus l'estimation est lissée. Initialement, nous avons fixé $\alpha = 0,99$ pour pouvoir effectuer un premier calcul des ordres prédits.

Sachant que, pour les trois enregistrements donnés dans l'énoncé, les 5 premières secondes correspondent à chaque fois à une absence d'ordre, nous avons calculé, pour chaque signal, la puissance moyenne pendant cet intervalle, correspondant à la puissance moyenne du bruit. Puis, nous avons déterminé la puissance maximale de chaque signal sur la totalité des échantillons et nous avons défini le seuil pour un signal comme étant la somme de la puissance moyenne du bruit et d'une fraction de la puissance maximale du signal. Nous avons ensuite incrémenté le seuil de chacun des signaux, le seuil allant de la puissance moyenne du bruit à la puissance maximale du signal. Nous avons choisi d'incrémenter les seuils d'un dixième de la puissance totale du signal. A chaque nouvelle valeur de seuil, nous calculons la prédiction de l'ordre correspondante à ce seuil et l'erreur correspondante. Nous choisissons, pour chacun des trois signaux, le seuil minimisant l'erreur entre la prédiction des ordres et les ordres réellement donnés. La fonction `optim_3seuils` calcule ces seuils

optimaux et nous retenons l'erreur associée à ces seuils et ce alpha.

Ensuite, nous avons fixé les seuils obtenus précédemment et effectué un « grid search » sur le paramètre alpha de façon à ce qu'il minimise l'erreur de prédiction avec les seuils calculés précédemment fixés. Nous utilisons le nouvel alpha optimal pour déterminer de nouveaux seuils optimaux et une nouvelle erreur de prédiction. Nous avons réalisé ces optimisations successives sur l'enregistrement 2 et avons obtenus les paramètres suivants :

- $\alpha = 0,96$
- $\text{seuil_1 (aller à gauche)} = 2.88\text{e-}06$
- $\text{seuil_2 (avancer)} = 1.73\text{e-}06$
- $\text{seuil_3 (aller à droite)} = 1.36\text{e-}06$

2.6 Définition de la fonction de commande

Nous avons conservé les seuils et la paramètre alpha minimisant l'erreur de prédiction sur les 3 signaux et nous avons défini la fonction de commande comme étant dépendante de ces seuils. Si chaque signal est inférieur à son seuil, la prédiction est l'absence d'ordre. Sinon, l'ordre prédit est celui correspondant au rapport signal sur seuil le plus grand.

Avec les paramètres déterminés précédemment, nous obtenus les résultats suivants :

- $\text{erreur_enregistrement_1} = 55,8\%$
- $\text{erreur_enregistrement_2} = 11,1\%$
- $\text{erreur_enregistrement_3} = 13,0\%$

Nous constatons qu'il y a un problème pour l'enregistrement 1. En effet, l'erreur de prédiction reste supérieure à 55% en dépit des optimisations. Nous avons donc tenté de comprendre pourquoi nous obtenons de si mauvais résultats pour le premier enregistrement. Nous avons fait plusieurs hypothèses et nous avons trouvés deux explications.

L'image Figure 7 résume les deux explications à ce mauvais résultat. La première explication est que le signal mesuré semble décalé d'environ 4 secondes par rapport à ce qui est attendu. La figure illustre cela uniquement avec la commande "tourner à droite", mais le même constat peut être fait sur les autres commandes. La seconde explication est qu'à la toute fin de l'enregistrements, nous attendons la commande "tourner à droite", or l'expérimentateur semble avoir arrêté de regarder la LED clignotante pendant les quinze dernières secondes avant de terminer l'enregistrement.

Ce que nous avons donc fait, c'est que nous avons décalé les labels de 4s et tronqué les 15 dernières secondes du signal. Nous avons ensuite recalculé l'erreur pour ce nouveau signal et le résultat est bien meilleur. En effet, nous avons une erreur auparavant d'environ 55% et avec le signal modifié, nous avons diminué l'erreur de 28% pour atteindre les 27% d'erreur.

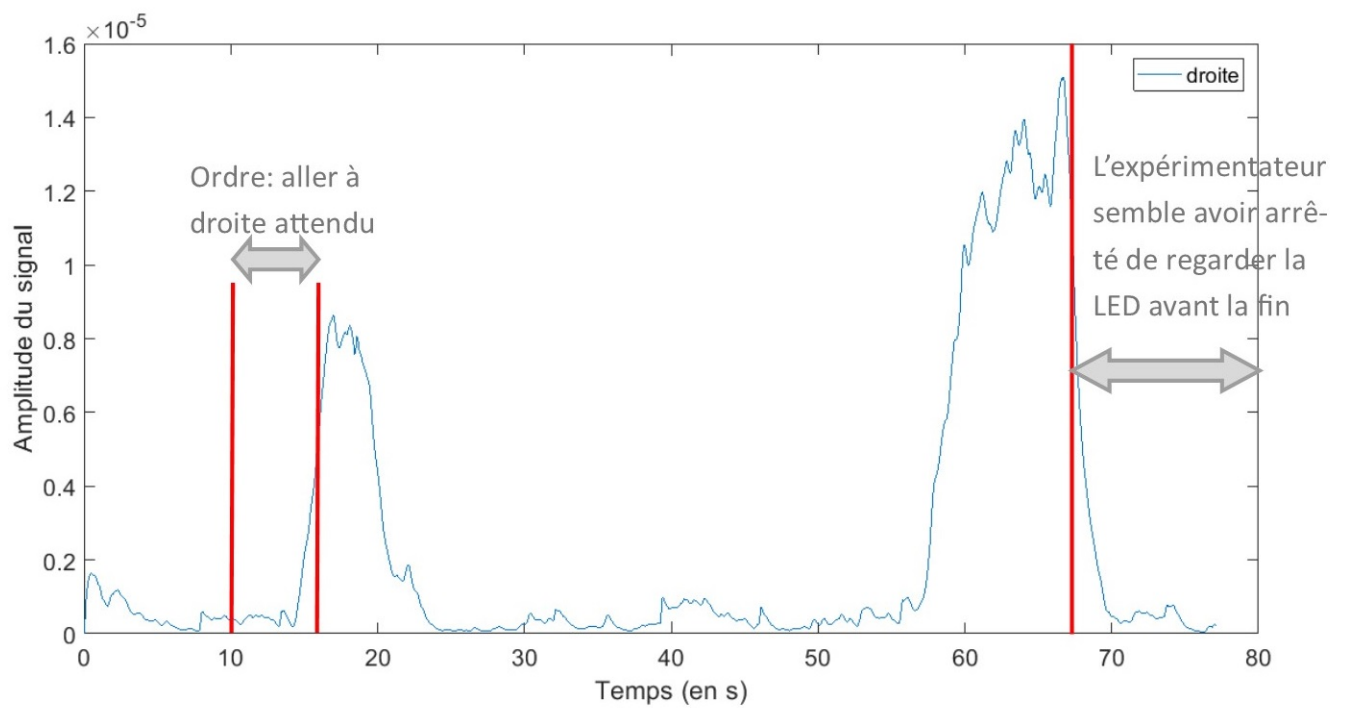


Figure 7: Explications quant aux mauvaises performances du premier enregistrement

3 Contrôle du Robot

Dans cette section nous discuterons des choix d'architecture, de la mise en œuvre des packages ROS que nous ferons tourner sur le robot et des résultats obtenus. Les indications de comment exécuter le code se trouvent dans la subsection 3.2

3.1 Choix d'architecture

Nous avons choisi de travailler avec ROS (Robot Operating System), un middleware de robotique conçu pour aider à abstraire les détails de hardware, pour qu'on puisse accéder aux fonctionnalités de haut niveau des robots d'une forme simple. Le fonctionnement de ROS est basé sur l'exposition des ressources du système comme des **noeuds** qui peuvent communiquer entre eux et des **messages** qui sont envoyés à des **topiques**. Les topiques sont responsables de recevoir les messages des noeuds appelés **publishers** et les envoyer aux noeuds appelés **subscribers**. Les ressources incluent les moteurs et les capteurs, bien que les ressources de computation. Avec ces concepts basiques de ROS, nous allons présenter l'architecture du système, qui est résumé dans la figure suivante.

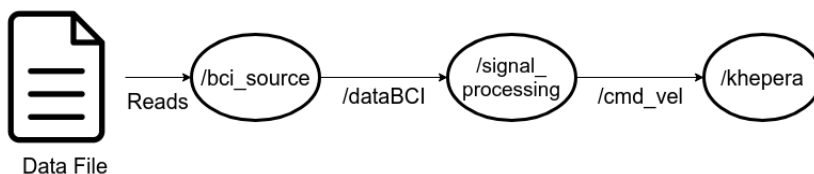


Figure 8: Diagramme conceptuel du système, où les ellipses représentent des noeuds et les flèches représentent des topiques (sauf la flèche 'Reads')

Pour simuler l'acquisition en temps réel des signaux BCI on a décidé de faire tourner un noeud appelé `/bci_source` qui au moment de l'initialisation lit un fichier contenant un vrai signal pré-enregistré (fourni au début du projet) et après il rentre dans une boucle d'exécution, publiant un message sur le topique `/dataBCI` à la fois. Chaque message s'agit d'un float qui correspond à un échantillon du signal. Pour garantir que la simulation soit bien adaptée, ce noeud tourne à une fréquence égale à la fréquence d'échantillonnage du signal, dans ce cas 256 Hz. Le fichier contient aussi les labels des commandes correspondantes qui sont affichés dans l'écran lors de l'exécution du noeud pour que l'utilisateur puisse avoir au moins une idée du comportement du système. Le fichier correspondant à ce noeud se trouve sur `'/projectRoot/ros_ws/bci_robot/scripts/bci_source.py'`.

Le noeud `/signal_processing` est un *subscriber* du topique `/dataBCI`, il reçoit des échantillons à 256 Hz. Contrairement à l'approche que l'on a pu tenir dans les sections précédentes, ici nous sommes obligés de traiter les échantillons au fur et à mesure qu'ils viennent, et pas d'un seul coup du début à la fin. Après quelques discussions dans le groupe et avec les encadrant nous avons décidé filtrer le signal au fur et à mesure et stocker les estimations de puissance en chaque fréquence centrale dans un buffer de taille fixe. Une fois que ce buffer est rempli nous publions un message de commande au robot correspondant à la moyenne des signaux dans ce buffer pour chaque fréquence. Les calculs effectués lors du traitement du signal sont les mêmes que ceux décrits précédemment, c'est à dire, on passe le signal $x[n]$ par trois filtres passe-bandes de fréquences centrales 7.5, 11 et 13.5 Hz, obtenant ainsi trois signaux $y_i[n]$. À partir de ces signaux on estime la puissance présente en chaque bande de fréquence pour obtenir trois autres signaux $z_i[n]$, et ces z seront, donc, stockés dans le buffer. La stratégie pour choisir une commande à partir de ces signaux $z_i[n]$ a été déjà exploré dans la section précédente, mais nous y reviendrons dans la subsection suivante. Finalement, après avoir choisi la bonne commande le noeud `/signal_processing` publie un message du type *Twist* au

robot parmi le topique `/cmd_vel`. La fréquence de publication de ce noeud est directement liée à celle du noeud d'avant, et si f_e est la fréquence d'échantillonnage du signal original et N la taille du buffer, la fréquence de publication sera de f_e/N . Le fichier correspondant à ce noeud se trouve sur `'/projectRoot/ros_ws/bci_robot/scripts/signal_pro.py'`.

Finalement, le noeud du robot khepera sera un *subscriber* du topique `/cmd_vel`, d'où il va recevoir les consignes de vitesse correspondantes. Passons maintenant aux détails de mise en oeuvre.

3.2 Mise en oeuvre du système et résultats

Nous avons choisi python comme langage pour implémenter ces deux nœuds, dont les fichiers se trouvent dans le répertoire `'/projectRoot/ros_ws/bci_robot/scripts'`. Pour faciliter le débogage et permettre de tester le programme même sans le robot, on a ajouté une option pour envoyer les messages à un noeud turtlesim au lieu du khepera. On décrira pas à pas comment faire tourner le système tant que nous expliquons les détails de sa mise en oeuvre.

D'abord, il faut *builder* les packages ros. On va faire référence à la racine du projet comme **projet**, donc allez sur `projet/ros_ws` et tapez:

```
$ catkin_make
$ source devel/setup.bash
```

Ouvrez un terminal et faites tourner le roscore:

\$ roscore

Maintenant passons au noeud `/bci_source`. Si vous allez sur *projet/obj* vous verrez tous les enregistrements qui peuvent être utilisés avec ce noeud. Alors, tapez:

```
$ rosrun bci_robot bci_source.py [path to file]
```

Où [path_to_file] est le chemin complet pour un de ces fichiers sur projet/obj. Ouvrons 'herve002_labeled.txt' par exemple:

```
rafael@rafael-Aspire-E5-575G:~/dev/sir/TL-Approf.-BCI/ros_ws$ rosrunc bci_robot bci_source
e.py '/home/rafael/dev/sir/TL-Approf.-BCI/obj/herve002_labeled.txt'
Initializing /bci_source
This node feeds a 256 Hz stream of samples from the BCI measurements, to a topic called dataBCI. The current version simulates the real-time acquisition of the signal by reading a text file containing real measurements.
Stop
Stop
Stop
Stop
Stop
Stop
Stop
Stop
Stop
Stop
Stop
```

Figure 9: Fonctionnement du noeud /bci source

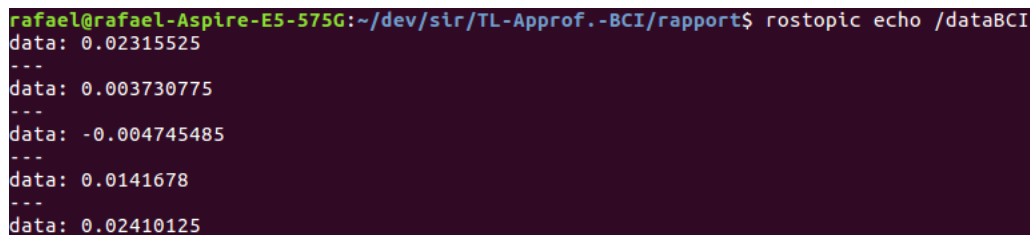
Vous verrez que ce nœud est en train de publier des messages sur le topique `/dataBCI`, tapez:

```
$ rostopic echo /dataBCI
```

Et vous verrez quelque chose similaire à ce qu'on a dans la figure 10

Le nœud est un simple publisher et il continue à publier les échantillons jusqu'à la fin du fichier, et là il s'arrête et termine le programme.

Passons au noeud `/signal` processing. Ouvrez un nouveau terminal et tapez:

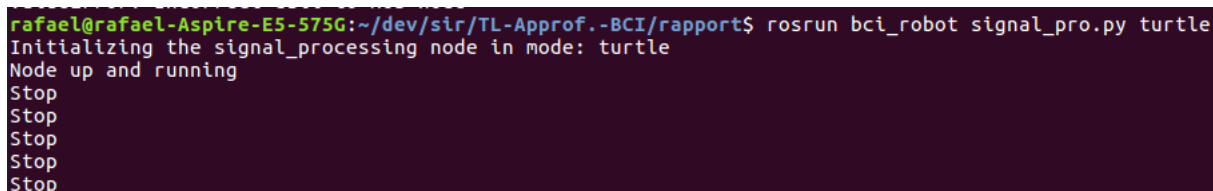


```
rafael@rafael-Aspire-E5-575G:~/dev/sir/TL-Approf.-BCI/rapport$ rostopic echo /dataBCI
data: 0.02315525
---
data: 0.003730775
---
data: -0.004745485
---
data: 0.0141678
---
data: 0.02410125
```

Figure 10: Publication des échantillons sur /dataBCI

```
$ rosrun bci_robot signal_pro.py turtle
```

Ici nous utilisons l'option 'turtle', parce que nous publierons les commandes dans le topique du turtlesim, pour le faire publier sur le topique du khepera il suffit de changer 'turtle' pour 'khepera'. Si jamais votre noeud /bci_source a fini de publier tout le signal et a affiché 'Finished publishing the data from file' relancez-le. Vous aurez quelque chose comme la figure 11



```
rafael@rafael-Aspire-E5-575G:~/dev/sir/TL-Approf.-BCI/rapport$ rosrun bci_robot signal_pro.py turtle
Initializing the signal_processing node in mode: turtle
Node up and running
Stop
Stop
Stop
Stop
Stop
```

Figure 11: Initialisation et affichage du noeud /signal_processing.

Contrairement au /bci_source, ce noeud est implémenté comme une classe appelée **Signal_processor** (l'autre est défini comme une simple fonction), afin de stocker les paramètres et avoir un accès facile à ces variables. L'initialisation de la classe est faite de façon paramétrable, on peut choisir la taille du buffer, les vitesses du robot, le mode d'opération et les paramètres optimaux obtenus auparavant. Ce noeud est à la fois un subscriber et un publisher. Il possède une fonction **callback_data_listen()** (cf. signal_pro.py) qui est appelée à chaque fois qu'il reçoit un message du topique /dataBCI, et qui traite les échantillons, un la fois. Cette fonction est appelée à une fréquence de 256 Hz. Elle a un comportement cyclique dans lequel elle va remplir le buffer à chaque nouvel appel en bougeant un compteur pas à pas. Quand le buffer est plein, cette fonction fait appel à une autre fonction **callback_pub()** et mets le compteur à zéro. Cette fonction callback_pub, par contre, correspond au côté publisher du noeud, et elle va donc utiliser toute l'information présente dans le buffer pour choisir la bonne commande et la publier sur le topique choisi. La fonction responsable pour trouver cette bonne commande est **get_command()**. D'abord cette fonction doit utiliser toute l'information dans le buffer. La façon la plus simple de le faire, c'est de faire la moyenne de chacun des 3 signaux dans le buffer. Une approche plus intéressante serait de normaliser ce buffer par une fenêtre (Hamming, Blackman etc) pour diminuer l'effet de bord introduit par la fenêtre rectangulaire du buffer, mais faire juste la moyenne nous rends déjà des résultats intéressants. Après, comme décrit précédemment, la fonction va utiliser 3 seuils obtenus parmi une optimisation en grid search, et va diviser chacun des 3 signaux par le seuil correspondant. De cette façon, quand tous les signaux sont inférieurs à 1, tous les signaux originaux sont en dessous des seuils et ainsi on choisira la commande 'Rien'. L'effet de normaliser les 3 signaux par ces seuils c'est que, une fois que au moins un de ces signaux est au dessus du seuil, il suffit juste de choisir entre eux le plus grand et appliquer la commande correspondante. Les vitesses appliqués par les commandes sont définis par les paramètres de la classe Signal_processor.

Pour voir le fonctionnement des deux nœuds ensemble, faites-les tourner après lancer le nœud turtlesim, en tapant:

```
$ rosrun turtlesim turtlesim_node
```

ou en lançant le nœud du khepera.

4 Conclusion

Pour conclure, ce travail de laboratoire sur la commande de robot par interface cérébrale, nous avons réussi à implémenter un programme permettant donner des ordres au robot par BCI. Le taux d'erreurs de nos prédictions par rapport aux labels prédéfinis oscille entre 11 et 27% selon les enregistrements. Nous pensons que c'est un bon résultat compte tenu du fait qu'il y certainement des décalages entre les labels et ce que l'expérimentateur a effectivement effectué. Si nous avions eu plus de temps nous aurions tout de même pu effectuer quelques améliorations comme régler le fait qu'aux frontières d'un changement d'ordre, il y a un changement d'ordre très régulier dû au bruit jusqu'à ce que l'ordre se stabilise.

En plus des connaissances techniques que cela nous a apporté, cela nous a permis de travailler en groupe et d'apprendre à utiliser des outils collaboratifs comme git pour le versionning de code et Trello pour le management de projet.