

Contrôle gestuel de la synthèse sonore : vers une évaluation des gestes d'utilisateurs

Quentin Pyanet

Mémoire - Stage Master ATIAM

Mars - Juillet 2012

Ircam, Equipe IMTR, sous la responsabilité de Frédéric Bevilacqua



Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier mon tuteur Frédéric Bevilacqua pour m'avoir confié ce stage, pour son temps ainsi que pour ses conseils précieux.

Je souhaite également remercier l'ensemble des personnes ayant participé à l'expérience mise en place, dans laquelle mes camarades et amis du Master ATIAM sont sans aucun doute sur-représentés. Leurs gestes, tantôt précis, tantôt maladroits, m'ont rappelé qu'un humain ne l'est que de par son unicité et que vouloir le modéliser et le prévoir avec certitude est tout bonnement contraire à sa nature.

Viennent enfin mes collègues de bureau, toujours disponibles pour me donner leurs avis utiles et pertinents.

Table des matières

1	Contexte du projet	5
1.1	Le projet Legos	5
1.2	Mon stage et ses objectifs	5
1.3	Le déroulement du stage	6
2	Etat de l'art	6
2.1	Le mapping geste-son	6
2.1.1	Les différents types de mapping	6
2.1.2	Mapping et synthèse par modèles physiques	6
2.1.3	Évaluation du mapping et apprentissage	6
2.2	Expériences d'adaptations sensori-motrices	7
3	Méthodologie et dispositif expérimental	7
3.1	La méthodologie	7
3.2	Elaboration et évolution du protocole expérimental	8
3.2.1	Quel type de son générer ?	8
3.2.2	Quel geste demander ?	8
3.2.3	Quelle(s) perturbation(s) appliquer ?	12
3.3	Protocole expérimental	12
3.4	Dispositif expérimental	13
3.4.1	Solutions matérielles	13
3.4.2	Solutions logicielles	13
3.4.3	Enregistrement des données	15
4	Méthodes d'analyse	15
4.1	Les descripteurs du geste	15
4.1.1	Erreur "sonore" par rapport à la quantité de son généré	15
4.1.2	Différence et erreur par rapport au profil cible de vitesse angulaire	15
4.1.3	Moments statistiques	16
4.1.4	Vitesse maximale	17
4.1.5	Angles de départ et d'arrivée	17
4.1.6	Fluidité du geste	18
4.2	Mesures de l'adaptation	18
4.2.1	Modélisation (<i>Fitting</i>)	18
4.2.2	Comparaison début/fin	19
4.2.3	Recherche de la meilleure série	19
4.2.4	Analyse statistique : test t	19
5	Résultats et discussions	20
5.1	Le bloc Appropriation	20
5.1.1	Un geste spontané très variable	20
5.1.2	Évolution de l'erreur	21
5.2	Le bloc Expérience	22
5.2.1	Modélisation de l'erreur	22
5.2.2	Évolution de l'erreur	24
5.2.3	Évolution du moment d'ordre 1	24
5.2.4	Évolution de l'angle de départ	26
5.2.5	Évolution de l'angle d'arrivée	27

5.2.6	Début vs. fin du geste	27
5.2.7	Synthèse des évolutions	28
5.3	Synthèse du questionnaire post-expérience	32
5.3.1	Sentiment de maîtrise et difficulté	32
5.3.2	Mapping ressenti	32
5.3.3	Conditions de l'expérience	33
6	Conclusions et perspectives	33
6.1	Conclusions sur l'expérience	33
6.1.1	Une adaptation différente mais bien caractérisée	33
6.1.2	Une vitesse d'adaptation difficile à évaluer	33
6.2	Constats et recommandations pour l'expérience future	34
6.2.1	L'asymétrie du geste aller/retour	34
6.2.2	Une erreur sur la fin du geste "trompeuse"	34
6.2.3	Un geste spontané variable selon les personnes	34
6.2.4	Des conditions expérimentales satisfaisantes	35
	Annexes	36
	A Ecran de contrôle de l'application Max/MSP	36
	B Notice d'information	37
	C Erreur en début et en fin de phase pour le bloc Expérience	38
	D Résultats des tests t pour les erreurs sur la première et deuxième moitié du geste	39
D.1	Intervalles de confiance des tests t pour l'erreur sur la première moitié du geste	39
D.2	Intervalles de confiance des tests t pour l'erreur sur la seconde moitié du geste	39
	E Questionnaire post-expérience	40
	F Réponses au questionnaire post-expérience	42
	Références	44

Introduction

Mon stage se place dans le cadre d'un projet ANR Blanc nommé Legos (*evaluation of the sensori-motor LEarning in Gesture- sOund interactive Systems*). Il est le fruit d'une collaboration entre l'IRCAM et l'équipe Neuromouv du Laboratoire de Neurophysique et Physiologie de Paris 5. Dans ce projet qui en est encore à ses débuts (lancé en janvier 2012 pour une durée de 3 ans), mon stage a pour objectif de réaliser une expérience pilote sur le thème du contrôle gestuel de la synthèse sonore afin de mieux comprendre comment une personne apprend à maîtriser un système de ce type.

Il me semble important de décrire en premier lieu les enjeux du projet Legos afin de mieux définir par la suite les objectifs de mon stage. Je poursuivrai par un état de l'art qui permettra de positionner le projet Legos et mon stage au sein de ce domaine de recherche. Vient ensuite une présentation de la méthodologie et du protocole expérimental proposés pour l'expérience pilote. Enfin, je présenterai les méthodes d'analyse utilisées et terminerai sur les résultats obtenus.

1 Contexte du projet

1.1 Le projet Legos

Le projet Legos est né du constat que la notion d'apprentissage sensori-moteur est très peu intégrée lors du développement de systèmes sonores interactifs. Legos propose donc d'évaluer de manière systématique la qualité du couplage geste-son dans des systèmes sonores basés sur des interfaces gestuelles, en s'intéressant notamment à l'évolution dans le temps de cet apprentissage. Plusieurs systèmes interactifs verront le jour afin de proposer à moyen terme des nouvelles interfaces gestuelles de contrôle de médias numériques (dont les jeux vidéos et le design sonore), mais également des applications médicales comme la rééducation. Dans le cadre d'interfaces couplant geste et son, trois catégories peuvent être distinguées :

- le contrôle sonore : concerne un cas d'apprentissage sensori-moteur où la finalité est de produire un son donné grâce à la manipulation d'une interface gestuelle, comme dans le cas des instruments de musique numérique. L'apprentissage sensori-moteur est généralement évalué au niveau de la qualité du son produit.
- l'apprentissage de geste avec retour sonore : concerne l'apprentissage sensori-moteur dans le cas où la finalité est d'effectuer un geste donné en s'aidant d'un retour sonore. L'apprentissage sensori-moteur est dans ce cas observé au niveau de la qualité du geste reproduit.
- le design sonore interactif : concerne l'apprentissage sensori-moteur dans le cas d'interfaces tangibles, où la finalité est la manipulation correcte d'un objet. L'apprentissage sensori-moteur est alors jugé à travers la manipulation de l'objet interactif.

1.2 Mon stage et ses objectifs

Mon stage prend l'angle de vue du "contrôle sonore" présenté en 1.1. L'objectif est de mettre en place une expérience "pilote" (en amont d'une expérience Legos plus poussée), durant laquelle il s'agit d'étudier dans quelle mesure une personne maîtrisant un système est capable de se réadapter et maîtriser à nouveau le même système ayant subi une modification.

Les contraintes suivantes, en cohérence avec le contexte Legos détaillé dans le document [6], ont été posées :

- la synthèse sonore sera basée sur des modèles physiques (Modalys) ;
- le système de captation sera un ou plusieurs Modular Musical Objects (MO) développés par l'équipe IMTR [13] ;
- les mouvements à effectuer seront dans la mesure du possible proches de ceux demandés en rééducation médicale ;

- l’appréciation par l’utilisateur du résultat sonore produit doit être aisée, sans faire appel à des notions musicales ou rythmiques.

1.3 Le déroulement du stage

La première étape consista à définir l’état de l’art présenté en 2. Par la suite, nous avons adopté une approche itérative en élaborant un système de synthèse sonore et un protocole expérimental qui n’ont cessé d’évoluer jusqu’à l’obtention d’un dispositif final. Les constats et les choix qui nous ont amenés à la solution finale seront présentés en 3.2. Cependant, les résultats présentés en 5 concernent uniquement l’expérience finale proposée à 14 sujets.

2 Etat de l’art

2.1 Le mapping geste-son

2.1.1 Les différents types de mapping

Dans le domaine des instruments de musique numériques (DMI pour *Digital Musical Instruments/Interfaces*), on parle de mapping pour signifier la relation entre les gestes du musicien (entrées) et les paramètres de synthèse et d’effets sonores (sorties) [3]. On distingue deux grands types de mapping :

- mapping direct (ou explicite) : lorsque la relation entre les paramètres de sortie est issue d’une fonction analytique des paramètres d’entrée. Le plus simple, dit *one-to-one*, associe une entrée à une sortie. Un mapping associant une entrée à plusieurs sorties (*one-to-many*) est dit divergent. L’inverse (*many-to-one*) est dit convergent.
- mapping indirect (ou implicite) : va implémenter une sorte de boîte noire entre les entrées et les sorties dont on spécifie seulement le comportement souhaité, généralement grâce à du *machine learning*. Par exemple, dans [1], une analyse des descripteurs du geste basée sur des chaînes de Markov cachées permet de définir en sortie l’alignement temporel le plus probable par rapport à un geste (ou un autre type de donnée) de référence. Cela permet alors de caractériser le geste *live* par rapport à celui de référence.

2.1.2 Mapping et synthèse par modèles physiques

En dépit de nombreux travaux portant sur l’évaluation qualitative du rendu des sons de synthèse par modèles physiques, peu s’intéressent à l’évaluation perceptive de systèmes lorsqu’ils sont contrôlés par le geste.

Gelineck [2] compare un modèle physique de flûte et un autre de frottement. Le résultat est intéressant : bien que les utilisateurs préfèrent perceptivement le modèle de frottement, ils trouvent que le modèle de flûte est plus précis et plus simple à contrôler.

Serafin [15] expérimente plusieurs contrôles d’un modèle physique de corde frottée et met notamment en avant les bénéfices des interfaces de contrôle avec retour haptique.

2.1.3 Évaluation du mapping et apprentissage

Lorsqu’il s’agit d’évaluer un mapping, on retrouve souvent des méthodes d’évaluation basées sur des questionnaires et sur l’analyse de discours. On trouve cependant quelques exceptions comme Hunt [3] qui propose une évaluation sur une tâche spécifique ou Wanderley [17] qui s’intéresse à l’application au domaine musical d’outils initialement utilisés en interaction homme-machine (IHM). Plus récemment, Stowell [16] propose de comparer les méthodes qualitatives aux méthodes quantitatives et émet des recommandations sur l’utilisation des unes ou des autres selon le contexte.

Dans [7], Merrill propose une interface comprenant de nombreux capteurs qui permettent de déclencher des sons et des effets sonores. Sa démarche est alors de proposer à l'utilisateur de créer son propre mapping en effectuant des gestes d'exemples. Il propose également à l'utilisateur des mappings pré-définis. Il utilise un questionnaire à la fin de l'expérience, qui met notamment en avant la plus grande expressivité d'un mapping défini par l'utilisateur. De manière analogue, Poepel dans [12] évalue plusieurs mappings à l'aide d'un questionnaire de 5 points sur l'échelle de Likert.

Plusieurs chercheurs se sont penchés sur l'évaluation de différents mappings geste-son [3] [12], et ce sous différents points de vue : facilité d'apprentissage, précision, satisfaction de l'utilisateur... Le but étant généralement d'évaluer des DMI. Récemment, O'Modhain [10] a ainsi proposé un système d'évaluation de DMI selon le point de vue des différents acteurs (le musicien, le public, le concepteur et le fabricant).

Hunt dans [3] propose de reproduire une cible sonore à partir de 3 interfaces aux mappings différents. Le son synthétisé est alors évalué par un jury expert de 2 personnes. Il conclut qu'un mapping simple (*one-to-one*) aura l'avantage d'être appris très rapidement. Cependant, il apparaît comme moins intéressant et plus limité qu'un mapping plus complexe (multi-paramétrique), qui a plus de potentiel à long terme, notamment en terme d'expressivité.

Dans le cas de notre expérience, il me semble important de noter que l'idée n'est pas vraiment d'élaborer un mapping optimisant telle ou telle qualité. Nous nous intéressons en effet à la capacité de l'utilisateur à s'adapter à une perturbation, qui se manifeste par l'altération du mapping que l'utilisateur maîtrise déjà. On peut simplement retenir que si l'on souhaite que la phase d'apprentissage initiale soit réduite, il semble préférable de mettre en place un mapping peu complexe.

2.2 Expériences d'adaptations sensori-motrices

De nombreuses personnes se sont intéressées à la capacité d'adaptation du système sensori-moteur avec retour visuel. Notre but étant d'étudier dans quelle mesure une personne est capable de réadapter son geste grâce à une cible sonore, nous nous sommes intéressés aux méthodologies mises en place dans le cas analogue d'une cible visuelle. La plupart du temps [11] [8], l'expérience est conçue en trois étapes :

- la pré-exposition : familiarisation et maîtrise d'une configuration (généralement "naturelle") ;
- l'exposition : l'utilisateur fait face à une perturbation du système et doit s'adapter ;
- la post-exposition : retour à la configuration "normale", afin d'analyser les conséquences de l'exposition ("after-effect").

Même si des personnes comme Robertson et al. [14] ont étudié l'ajout d'un retour sonore à ce type d'expériences, il n'existe pas à notre connaissance d'expérience basée uniquement sur un retour sonore comme nous aimerions le faire. Nous verrons dans la partie suivante que nous nous sommes inspirés de cette méthodologie à trois étapes pour définir la nôtre.

3 Méthodologie et dispositif expérimental

3.1 La méthodologie

La méthodologie que l'on souhaite appliquer est la suivante :

1. L'utilisateur apprend à reproduire une cible sonore à partir d'un geste (phase de pré-exposition) : même si ce n'est pas le but premier de l'expérience, on peut suivre l'évolution dans le temps de l'apprentissage, en caractérisant par exemple une erreur par rapport à la cible ;
2. Le mapping est perturbé (passage à la phase d'exposition) ;
3. On analyse comment l'utilisateur réapprend à maîtriser le système (adaptation).

On peut également envisager une dernière étape qui consiste à observer comment l'utilisateur se réapproprie la configuration initiale du système (étude de l'*after-effect*).

3.2 Elaboration et évolution du protocole expérimental

N'ayant aucune expérience passée sur laquelle nous baser, il nous a fallu définir l'un après l'autre tous les éléments de l'expérience. Voici les choix effectués pour chacun d'entre eux.

3.2.1 Quel type de son générer ?

La première étape a été d'étudier les différents sons pouvant être générés par modèle physique grâce à Modalys [4] [5] : corde frottée, tube soufflé, plaque frappée ou encore modèles d'éléments finis. Nous avons recherché des paramètres de modèle permettant des changements continus sur le résultat sonore mais clairement différents perceptivement. Cela s'est avéré assez difficile, en plus du problème suivant : en appliquant deux excitations identiques l'une après l'autre sur un même modèle physique, celui-ci peut réagir très différemment. Cela est dû à l'état initial du système qui est différent entre les deux excitations. C'était notamment le cas d'un modèle de corde frottée par un archet. Nous voulions éviter au maximum ce phénomène.

Nous avons finalement opté pour un modèle de corde que l'on viendra exciter de différentes manières, engendrant des sons aux sonorités très différentes et facilement reconnaissables :

- excitation par un bruit rose, engendrant un son de frottement et la légère résonance de la première harmonique (130.8 Hz, Do2) ;
- excitation par un signal triangulaire à la fréquence de l'harmonique 2 (261.6 Hz, Do3) de la corde, engendrant un son à hauteur déterminée à cette fréquence ;
- excitation par un signal triangulaire à la fréquence de l'harmonique 7 (915.6 Hz, entre La4 et La4#) de la corde, engendrant un son à hauteur déterminée à cette fréquence.

La relative simplicité de ce modèle a permis son exécution en temps-réel sur l'unique machine assurant également les autres fonctionnalités (voir 3.4).

3.2.2 Quel geste demander ?

Le type de geste et la valeur captée

Partant du fait que le geste à réaliser doit être simple et proche de ceux demandés en rééducation médicale, nous avons proposé le déplacement d'une zone à une autre d'un MO (voir Figure 1). Le mouvement naturellement circulaire de l'avant-bras entraînant une rotation de l'objet sur l'axe z, nous avons opté pour l'utilisation du gyroscope sur cet axe fournissant un signal de vitesse angulaire de qualité (alors que les accéléromètres requièrent la plupart du temps un filtrage).

Expériences préliminaires

Le mapping initialement proposé lors des premières expériences générait un son différent selon quatre zones de la vitesse angulaire sur l'axe z (voir Figure 2) :

- zone a : le modèle de corde n'est pas excité, aucun son n'est produit ;
- zone b : si l'utilisateur reste moins d'une certaine durée dans cette zone, aucun son n'est produit ; s'il dépasse le seuil temporel, le modèle de corde est excité par un bruit rose, et un son de frottement sur la corde est audible ;
- zone c : le modèle de corde est excité par un signal triangulaire à la fréquence de l'harmonique de rang 1 (fréquence fondamentale de la corde), un son à cette fréquence est audible ;
- zone d : le modèle de corde est excité par un signal triangulaire à la fréquence de l'harmonique de rang 4, un son (nettement plus aigu) est audible.

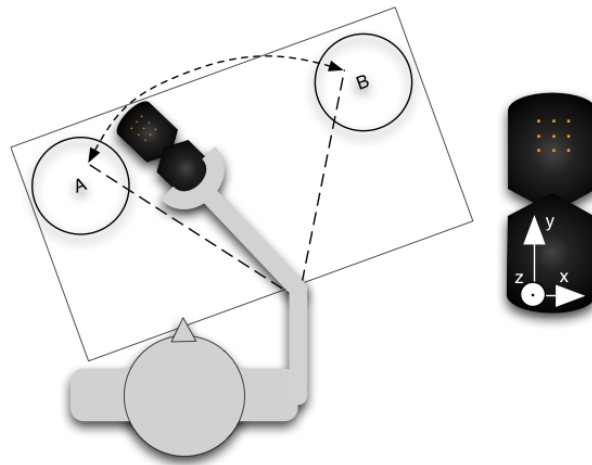


FIGURE 1 – Schéma de principe du mouvement en arc de cercle

Le son cible, correspondant à l'unique production d'un son à la fréquence fondamentale, suggérait alors un profil rectangulaire de vitesse angulaire dont le plateau se situait dans la zone c (voir Figure 3).

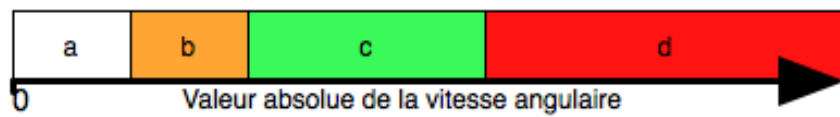


FIGURE 2 – Différentes zones de vitesse angulaire de l'ancien mapping abandonné au profit de celui présenté en figure 4

Après une première phase d'expérimentation sur quatre sujets, ce système présentait plusieurs inconvénients :

- le retour sonore de grattement de corde était difficile à interpréter comme une phase d'accélération/décélération trop longue ;
- une fois avoir compris le mouvement "mécanique", il était assez simple pour le sujet de reproduire la cible, et il n'y avait plus vraiment de possibilités d'améliorer le son donc le geste.

De plus, lors d'une réunion avec les membres du projets Legos, les personnes travaillant sur la rééducation ont fortement déconseillé d'exiger un geste robotique, et ont suggéré un profil plus naturel.

Choix final

Des conclusions de la première expérience est née l'idée de proposer un mapping basé sur des profils de vitesses cibles définis dans le temps. Le profil de vitesse exécuté par le sujet sera alors comparé en temps réel avec le profil cible. Le mapping sera toujours *one-to-many* agissant sur un modèle physique de corde [4] avec les conditions suivantes :

- avant départ, aucun son n'est produit ;
- lorsque le sujet soulève l'objet, le profil cible est déclenché ;

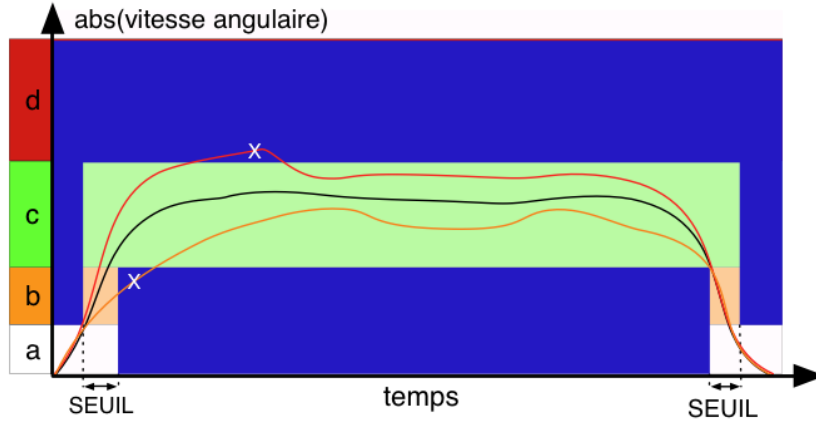


FIGURE 3 – Principe de l'ancien mapping abandonné au profit de celui présenté en figure 4. Si le sujet restait un temps supérieur au seuil dans la zone 'b', le bruit de frottement était déclenché. S'il rentrait dans la zone 'd', l'harmonique supérieure retentissait. Les zones bleues représentent donc le masque que le sujet devait éviter.

- si le sujet suit temporellement le profil de vitesse, la corde est excitée à la fréquence de l'harmonique 2 (son cible, voir Figures 4 et 5) ;
- si sa vitesse angulaire est inférieure à celle du profil à l'instant t , le modèle de corde est excité par un bruit rose, et un son de frottement sur la corde est audible (voir Figures 4 et 5) ;
- si sa vitesse angulaire est supérieure à celle du profil à l'instant t , le modèle de corde est excité à la fréquence de l'harmonique 7, et un son nettement plus aigu est audible (voir Figures 4 et 5).

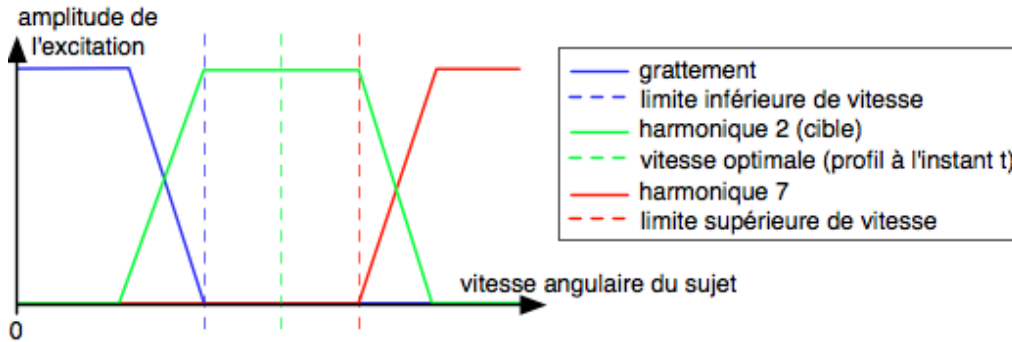


FIGURE 4 – Schéma du mapping expliquant l'amplitude des trois types d'excitations de la corde selon la vitesse angulaire du sujet comparée à celle du profil attendu à l'instant t

Dans les expériences de déplacement d'objets, il est communément observé que la vitesse angulaire décrit une forme de cloche symétrique, si bien que même les modèles comme [9] l'admettent. C'est donc ce que nous avons choisi comme profil pour le bloc Apprentissage (voir Figure 6). En définissant temporellement un profil de vitesse angulaire, on fixe également un angle de balayage. De manière empirique, nous avons choisi un balayage qui nous semblait cohérent avec un geste de la vie quotidienne : environ 80° en 1200 ms.

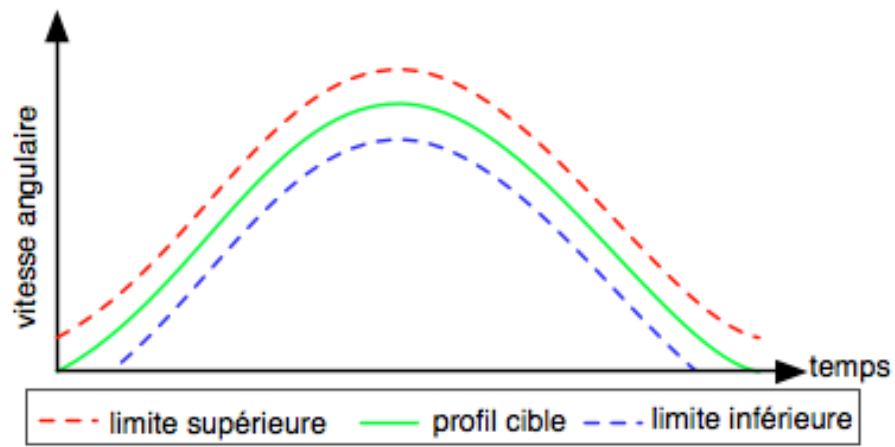


FIGURE 5 – Limites inférieur (bleu) et supérieure (rouge) autour du profil de vitesse angulaire (vert) défini dans le temps.

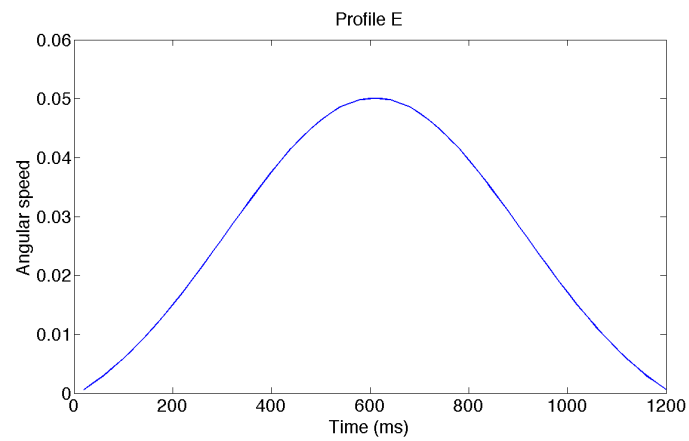


FIGURE 6 – Profil de vitesse angulaire symétrique E

3.2.3 Quelle(s) perturbation(s) appliquer ?

Au niveau du modèle physique, il était possible de modifier les limites inférieure et supérieure au-dessous et au-dessus desquelles les sons respectivement frotté et aigu étaient générés (voir Figure 5). Cependant, ce type de perturbations a été écarté car amenait clairement une notion de difficulté variable entre deux mappings. En partant du profil symétrique défini précédemment, plusieurs modifications étaient possibles :

- Garder un profil symétrique, en le dilatant ou le contractant :
 - en temps, i.e. agrandir/diminuer l'angle à balayer, mais avec la même vitesse maximale ;
 - en vitesse, i.e. augmenter/diminuer la vitesse maximale du geste, influant également sur l'angle total à balayer.
- Rendre le profil asymétrique en déplaçant le maximum de vitesse d'un côté ou d'un autre (voir Figures 7).

Nous avons opté pour l'asymétrisation du profil E car cela avait pour avantage de ne modifier ni la durée du geste, ni l'angle à balayer (les aires sous les courbes étant les mêmes). Nous avons alors créé les profils dérivés présentés Figure 7. Le profil A exigeait une phase d'accélération plus rapide puis une phase de décélération plus lente. A l'inverse, le profil B demandait une accélération plus douce, puis une décélération plus abrupte. La distance entre le profil et les limites inférieure/supérieure était constante et égale pour tous les profils.

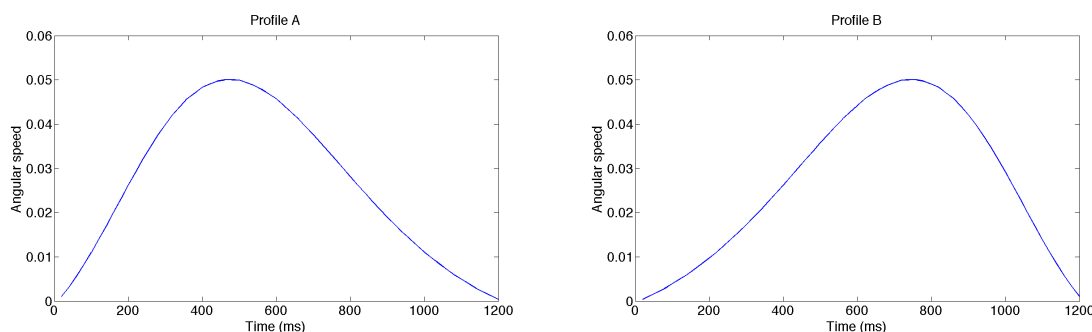


FIGURE 7 – Profils asymétriques vers la gauche (profil A), et vers la droite (profil B), retenus comme perturbations du profil E symétrique

3.3 Protocole expérimental

La première étape de l'expérience consiste à faire écouter au sujet trois exemples de sons générés par des gestes particuliers :

- le premier exemple est la cible sonore : on entend un son assez pur à l'harmonique 2 pendant 1200 ms ;
- le second exemple est le son résultant d'un geste globalement trop lent : on entend le son cible sur lequel se superpose un son de grattement pendant environ 400 ms des 1200 ms ;
- le dernier exemple est le son résultant d'un geste globalement trop rapide : on entend le son cible sur lequel se superpose un son nettement plus aigu (harmonique 7) pendant environ 400 ms des 1200 ms ;

On s'assure alors que le sujet a bien compris ce que signifie l'apparition d'un son de grattement et/ou d'un son aigu lors de son geste et que peu importe son geste, le résultat sonore durera 1200 ms.

Puis, l'expérience se découpe en deux blocs (voir Figure 8) :

- le premier bloc se compose d'une phase de découverte du système avec le profil symétrique E où l'on demande d'effectuer 60 gestes (30 aller-retour) ;

- le second bloc constitue l'expérience en elle-même, les yeux bandés : elle se compose de trois phases avec les profils asymétriques dans l'ordre A - B - A, où l'on demande d'effectuer 150 gestes (25 aller-retour pour chaque phase) sans interruption ni annonce des changements du profil attendu.

Avant de commencer un geste aller ou retour, le sujet doit attendre le déclenchement d'un bip. Le temps entre deux bips (donc entre deux débuts de gestes) est tiré aléatoirement entre 3000 et 3500 ms, afin de casser l'éventuel sensation de rythme. Après avoir entendu le bip, le sujet démarre son geste quand il le souhaite. Le profil cible et la génération du son débutent dès que l'objet est soulevé. Pour plus de détails, la notice d'information distribuée à chaque sujet avant l'expérience est disponible en Annexe B.

	Bloc Appropriation 4 min environ		Bloc Expérience 8-10 min environ		
	Phase 1	Pause	Phase 2	Phase 3	Phase 4
Profil cible	E	bandage des yeux	A	B	A
Nombre de gestes	60		50	50	50

FIGURE 8 – Tableau détaillant le déroulement de l'expérience scindée en deux blocs

3.4 Dispositif expérimental

En parallèle du protocole expérimental, nous avons développé au fur et à mesure le dispositif expérimental associé. Il a permis ainsi d'effectuer plusieurs expériences *alpha* avec des membres de l'équipe IMTR, avant d'aboutir à l'expérience pilote proposée à quatorze sujets.

3.4.1 Solutions matérielles

Les capteurs utilisés sont les MO [13]. Nous avons d'abord utilisé un Mini-MO, au format "porte-clé" (voir Figure 9). Cependant, la prise en main s'est avérée difficile, et ses faces bombées causaient des mouvements parasites lors de la pose de l'objet. Par la suite, nous avons donc opté pour un MO Chromosome, plus stable lors de la pose et plus naturel à saisir (voir Figure 9).

Le récepteur radio pour MO était relié en Ethernet à un MacBook Pro 15" dont l'écran avait été déporté pour permettre le contrôle de l'expérience tout en utilisant la caméra intégrée (voir Figure 10). L'écran face au participant était alors désactivé.

La résultat sonore, à volume égal pour tous les sujets, était restitué sur deux casques AKG K-271 identiques équipant à la fois le sujet et l'expérimentateur.

Enfin, nous avons recouvert de mousse une plaque en Plexiglas sur laquelle nous avons dessiné deux zones circulaires, donnant à titre indicatif l'amplitude du geste attendu. Ce plateau pouvait pivoter dans un sens ou dans l'autre, selon la main utilisée pour saisir l'objet, afin de proposer le mouvement le plus confortable aux sujets droitiers comme gauchers.

3.4.2 Solutions logicielles

Les données du capteur sont converties au format OSC (*OpenSoundControl*) par le boîtier radio et envoyées en UDP/IP sur la liaison Ethernet. Le système les réceptionnant, développé sous Max/MSP, se charge également de la synthèse sonore par modèle physique avec l'objet Modalys, la visualisation



FIGURE 9 – Le Mini-MO (à gauche) utilisé pour les premières expériences et le MO Chromosome (à droite) finalement choisi l'expérience finale

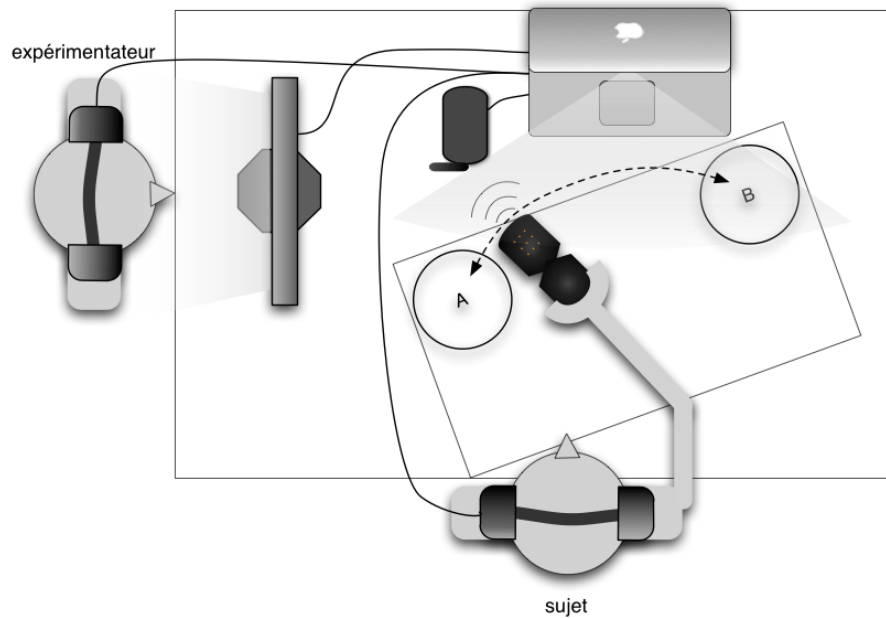


FIGURE 10 – Schéma de l'expérience : l'expérimentateur visualise en temps réel les profils de vitesse angulaire produits par le sujet et le profil cible en cours, lui permettant ainsi de s'assurer du bon déroulement de l'expérience

des données et des profils de vitesse, ainsi que l'enregistrement des données présentées en 3.4.3. L'écran de contrôle de l'expérimentateur est présenté en annexe A.

L'exploitation des résultats s'est faite sous Matlab.

3.4.3 Enregistrement des données

Les données, enregistrées d'abord dans un *buffer* puis dans un fichier texte, sont échantillonnées à 50 Hz. On y trouve pour chaque échantillon :

- le temps t en millisecondes depuis le début de l'enregistrement ;
- les valeurs des accéléromètres : accélérations sur les 3 axes à l'instant t ;
- les valeurs des gyroscopes : vitesses angulaires sur les 3 axes à l'instant t ;
- la valeur de vitesse angulaire du profil cible en cours de lecture à l'instant t ;
- les niveaux en dB des trois types de son générés à l'instant t .

En parallèle, on enregistre le flux vidéo issu de la caméra intégrée à l'écran de l'ordinateur portable, ainsi que le son généré par le modèle physique.

4 Méthodes d'analyse

4.1 Les descripteurs du geste

4.1.1 Erreur "sonore" par rapport à la quantité de son généré

L'idée qui semblait la plus légitime était de se baser sur le son afin de définir une erreur. Ayant enregistré le niveau en dB du son de grattement et de l'harmonique supérieure, nous avons défini une erreur basée sur ces niveaux afin de représenter la quantité de "mauvais son" généré. Cependant, en voulant cumuler la contribution du son de frottement à celle de l'harmonique supérieure, nous avons fait face à un problème de perception : les deux sons étant à hauteurs et à timbres différents, leur perception à niveau égal risquait elle aussi d'être différente, et il n'était pas correct de sommer directement les deux contributions. De plus, la particularité de cette erreur est qu'elle sera nulle dès que le sujet reste dans la zone de tolérance autour du profil durant tout son geste. Cela peut être un avantage, par exemple pour savoir si le sujet a reproduit parfaitement le son, mais cela ne donne pas d'information sur la distance entre le profil de vitesse cible et celui du sujet lorsqu'il est à l'intérieur de cette zone de tolérance. C'est pourquoi nous avons préféré utiliser par la suite l'erreur définie par rapport à la distance au profil cible de vitesse angulaire (voir équation 2), très corrélée avec l'erreur sonore, mais ne valant zéro que dans le cas où le profil de vitesse angulaire du sujet correspond parfaitement au profil cible.

4.1.2 Différence et erreur par rapport au profil cible de vitesse angulaire

La différence par rapport au profil

Nous définissons la différence par rapport au profil comme la moyenne sur tous les échantillons d'un geste de la différence entre la vitesse angulaire du sujet et le profil cible. Cela donne une information sur le positionnement global par rapport au profil. Si la différence est positive, le sujet a été globalement trop rapide. Si elle est négative, le sujet a été globalement trop lent.

$$D = \sum_{i=1}^n (\text{geste}[i] - \text{profil}[i]) \quad (1)$$

L'erreur par rapport au profil

Nous avons défini l'erreur entre la vitesse angulaire du sujet et le profil cible comme la distance

euclidienne entre ces deux vecteurs. Ainsi, l'erreur pour un geste est :

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^n (geste[i] - profil[i])^2} \quad (2)$$

L'erreur nous informe sur la ressemblance entre le geste exécuté et le profil, et étant très corrélée à l'erreur sonore au vu du mapping direct, nous donne une bonne idée de la quantité globale de frottement ou d'harmonique qui a pu être générée durant le geste. Pour avoir une idée, une erreur au-dessous de 0.04 correspond à une reproduction fidèle de la cible (frottement et harmonique supérieure inaudibles ou quasi-inaudibles), entre 0.04 et 0.08 une reproduction moyennement fidèle (frottement et/ou harmonique supérieure audibles de manière légère et brève), et au-dessus de 0.08 une mauvaise reproduction (frottement et/ou harmonique supérieure audibles de manière prolongée durant le geste).

Découpage en zones

La différence et l'erreur présentées précédemment ont pour inconvénient de ne pas nous fournir d'information temporelle, ce qui peut les rendre difficilement interprétables. Pour pallier cet inconvénient, nous avons proposé de découper le geste en plusieurs segments temporels et de considérer l'erreur ou la différence à l'intérieur de chacune de ces zones. Nous avons effectué un découpage simple en deux zones (pour une comparaison début/fin) et un plus précis en cinq zones égales en temps.

L'erreur sur la dérivée

Un sujet ayant la bonne dynamique mais avec un décalage constant en vitesse sera discriminé par le calcul d'erreur précédemment défini. C'est pourquoi nous nous sommes également intéressés à l'erreur sur la dérivée de la vitesse, i.e. l'accélération.

4.1.3 Moments statistiques

La forme en cloche du geste nous a amenés à le considérer comme une distribution afin de calculer différents moments statistiques.

Moment d'ordre 1 et demi-parcours

Le moment d'ordre 1 correspond au centre de masse d'une distribution (voir Figure 11). Dans notre cas, cela correspond à l'instant où le sujet a effectué la moitié de son déplacement. Cette valeur variant d'un profil cible à l'autre (voir tableau 1), il semble pertinent de regarder l'évolution de ce descripteur.

Profil	Valeur du moment d'ordre 1(ms)
E	610
A	536
B	684

TABLE 1 – Moments d'ordre 1 des différents profils cibles de vitesse angulaire

Moment d'ordre 2 et durée du geste

Le moment d'ordre 2 correspond à la variance d'une distribution ou en en prenant sa racine carrée, l'écart-type (voir Figure 11). Dans notre cas, cela donne une idée sur la durée du geste. On peut alors comparer l'écart-type à celui (invariant) des trois profils cibles.

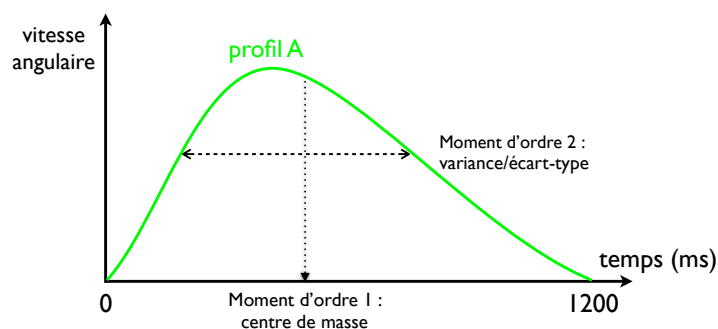


FIGURE 11 – Moments d'ordre 1 et 2 représentés pour le profil A

Moments d'ordres supérieurs

Nous avons également observé les moments d'ordre 3 et 4. Le moment d'ordre 3 rend compte de la dissymétrie de la distribution. Or, en considérant un geste de durée fixe, le moment d'ordre 1 nous renseigne déjà sur l'asymétrie du geste en cloche. Pour les mêmes raisons, l'aplatissement de la distribution caractérisé par le moment d'ordre 4 sera très corrélé à la variance donnée par le moment d'ordre 2. Ces deux corrélations ont été vérifiées expérimentalement. Nous nous sommes donc limités aux ordres 1 et 2.

4.1.4 Vitesse maximale

Il a semblé important d'observer la vitesse angulaire maximale atteinte durant le geste. On a pu alors suivre son évolution et voir si/comment le sujet se rapprochait de la vitesse maximale du profil cible.

4.1.5 Angles de départ et d'arrivée

A partir de la vitesse maximale du geste, nous avons modélisé le profil de vitesse angulaire par un triangle dans le but de mesurer ce que l'on appelle l'angle de départ et l'angle d'arrivée (voir Figure 12). Cette méthode s'est avérée plus robuste que le calcul de pentes sur deux portions de la courbe. Nous avons également préféré la notion d'angle pour sa linéarité (contrairement au coefficient de la pente qui peut tendre vers l'infini).

L'angle de départ

Il permet de caractériser la phase d'accélération du geste du sujet. Un angle de départ proche de celui du profil indique que le sujet a globalement un démarrage correct. Cependant, il ne nous renseigne pas sur la bonne durée de la phase d'accélération : en effet, comme on peut le voir sur l'exemple Figure 12, l'angle de départ est assez proche de celui du profil, bien que la phase d'accélération soit trop courte. Cela pourra par contre influencer l'angle d'arrivée.

L'angle d'arrivée

De manière analogue, l'angle d'arrivée permet de caractériser la phase de décélération du geste du sujet. Sur l'exemple Figure 12, on constate une différence notable entre celui du profil cible et celui du geste. A nouveau, cet angle ne nous dit pas si l'erreur entre la fin du profil cible et celui du sujet est faible, mais seulement si la dynamique lors de la décélération est similaire.

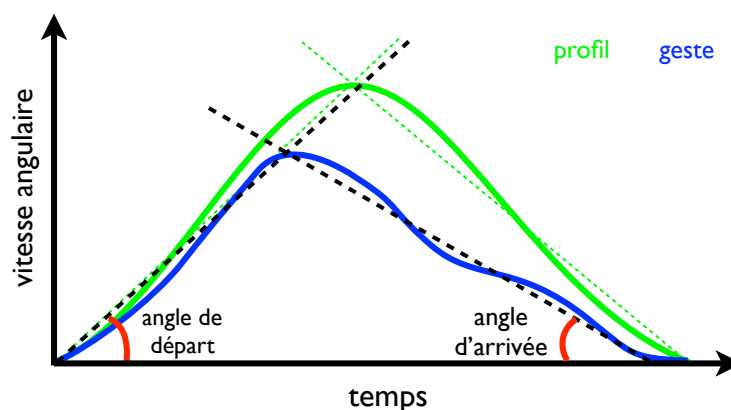


FIGURE 12 – Angles calculés au départ et à l'arrivée (en ligne noire pointillée pour le geste, en ligne verte pointillée fine pour le profil)

4.1.6 Fluidité du geste

Il était intéressant de trouver une manière de caractériser la fluidité du geste. Pour cela, nous avons proposé de regarder le nombre de changements de signe de l'accélération. En effet, un geste aussi fluide que le profil entrainera un seul changement de signe. A l'inverse, un geste hésitant ou saccadé, retournera plusieurs changements de signe (voir Figure 13).

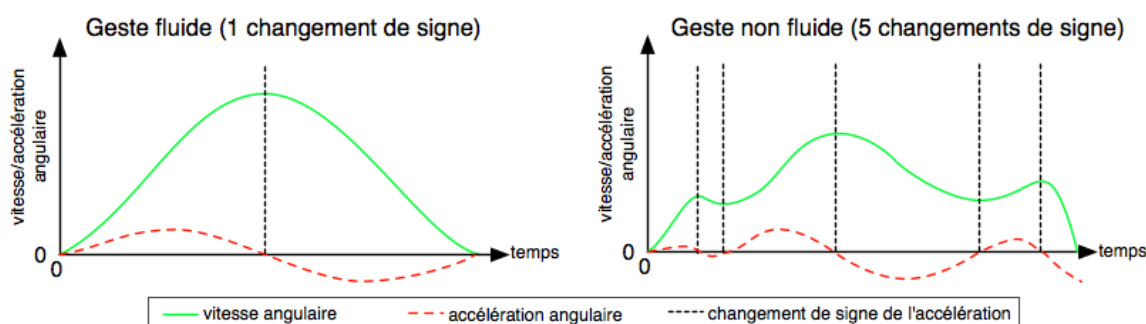


FIGURE 13 – Schéma expliquant le calcul de fluidité basé sur l'accélération (dérivée de la vitesse) angulaire. A gauche, on compte 1 seul changement de signe, décrivant une bonne fluidité. A l'inverse, à droite, on compte 5 changements de signe, décrivant un geste hésitant ou saccadé.

4.2 Mesures de l'adaptation

Dans le but de déterminer si un sujet s'adapte ou non, nous avons envisagé et mis en œuvre plusieurs méthodes.

4.2.1 Modélisation (*Fitting*)

La première idée était de modéliser l'évolution des descripteurs au cours des essais réalisés par le sujet. Par exemple, nous pensions intuitivement à modéliser l'évolution de l'erreur entre les gestes et le profil cible de vitesse angulaire par une exponentielle ou une droite, grâce à la méthode des moindres carrés. Il serait alors possible de connaître quel modèle décrit le mieux les données en comparant leurs coefficients de détermination R^2 .

4.2.2 Comparaison début/fin

Une autre solution était de regarder la valeur moyenne d'un descripteur en début et en fin de phase afin de voir si celle-ci avait varié. Le choix du nombre de gestes à considérer en début et en fin de phase a été longuement discuté. Choisir un nombre de gestes trop important au départ pourrait masquer une évolution rapide dans les premiers gestes. A l'inverse, un nombre trop faible risque de ne pas être représentatif du début de la phase. Comme déjà évoqué, des cycles de déconcentration ont été constatés et souvent relatés par les sujets. Se trouver dans un de ces cycles en fin de phase et prendre un nombre de gestes trop faible risquait de ne pas bien représenter la valeur finale du descripteur. Enfin, le geste aller-retour étant parfois asymétrique chez certains sujets, nous avons privilégié les valeurs paires afin de se baser sur autant de gestes aller que de gestes retour. Au final, nous avons choisi 8 gestes (4 aller-retour) lorsque l'on souhaitait estimer un descripteur en début de phase et 14 gestes (7 aller-retour) lorsque l'on souhaitait le caractériser en fin de phase.

4.2.3 Recherche de la meilleure série

Nous avons également pensé à rechercher sur chaque phase la série de 5 aller-retour consécutifs ayant l'erreur moyenne la plus faible (ou un autre descripteur). Cela permet alors de comparer la position de cette série dans la phase, mais aussi sa valeur moyenne et l'amélioration par rapport au début de la phase.

4.2.4 Analyse statistique : test t

Principe et calculs

Le test t (ou *t-test*) permet de tester statistiquement l'hypothèse d'égalité de la moyenne de deux échantillons de populations à distributions normales. Il se base sur deux hypothèses :

- l'hypothèse nulle H_0 : elle postule qu'il n'y a pas de différence significative entre les moyennes des deux groupes ;
- l'hypothèse alternative H_1 : elle postule qu'il y a une différence significative entre les moyennes des deux groupes.

Dans notre cas, nous aurons deux échantillons de tailles et de variances potentiellement différentes. Dans ce cas, la valeur du test t sera :

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{s_x^2}{n} + \frac{s_y^2}{m}}} \quad (3)$$

avec $\bar{x}$ et $\bar{y}$ les moyennes des distributions, s_x et s_y les écarts types et n et m les nombres d'échantillons respectifs.

Il est également nécessaire de calculer le degré de liberté df qui, dans notre cas (variances inégales), est donné par l'équation de Welch-Satterthwaite :

$$df = \frac{(s_x^2/n + s_y^2/m)^2}{(s_x^2/n)^2/(n-1) + (s_y^2/m)^2/(m-1)} \quad (4)$$

avec s_x et s_y les écarts types et n et m les nombres d'échantillons respectifs des distributions x et y .

Une fois les valeurs de t et df calculées, on en déduit la signification p correspondante grâce à une table de valeurs basée sur la loi de Student. Enfin, on compare p à un seuil de signification statistique α afin d'aboutir :

- au rejet de l'hypothèse nulle si $p < \alpha$;
- l'impossibilité de rejeter l'hypothèse nulle si $p > \alpha$.

Nous avons choisi classiquement $\alpha = 0.05$, ce qui signifie que l'on tolère une probabilité de 5% de faux positifs (i.e. rejeter H_0 alors que H_0 est vraie). On parle également d'intervalle de confiance pour la valeur $(1 - \alpha) * 100$.

Hypothèses unilatérales

Enfin, lors d'un test t , il est possible de formuler l'hypothèse de manière unilatérale en testant si la moyenne d'un échantillon est significativement inférieure ou (exclusif) supérieure à l'autre. Nous verrons par la suite que cette possibilité offerte par le test t nous a permis de caractériser l'adaptation par le sujet de son geste au travers de descripteurs en fonction de leurs sens d'évolution (accroissements ou décroissances théoriques et mesurés).

5 Résultats et discussions

Les conditions expérimentales des blocs Appropriation et Expérience étant différentes, nous ne pouvions pas les traiter de la même manière ni en tirer les mêmes informations. Nous les avons donc analysés de manière séparée.

5.1 Le bloc Appropriation

La phase d'appropriation, même si son but était de se familiariser avec le système, contient tout de même des informations intéressantes que l'on présente dans cette partie.

5.1.1 Un geste spontané très variable

Nous entendons par geste spontané le profil de vitesse angulaire des premiers gestes du bloc Appropriation, c'est-à-dire le geste que le sujet a "envie de faire" tout au début de l'expérience, même s'il est probablement très vite influencé par le retour sonore. Il est intéressant alors de regarder par exemple la moyenne de la vitesse maximale atteinte lors des 10 premiers gestes (voir Figure 14). Elle montre clairement que les sujets démarrent la phase d'appropriation avec un geste spontané très différent, certains atteignant une vitesse maximale moyenne deux fois plus grande que d'autres.

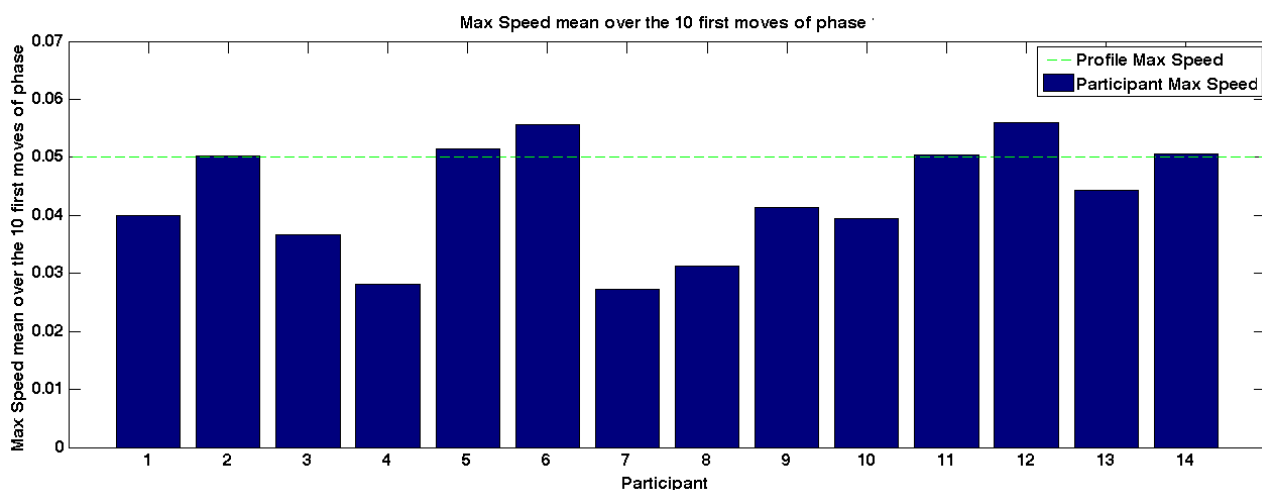


FIGURE 14 – Vitesse maximale moyennée sur les 10 premiers gestes du bloc Appropriation pour chaque sujet, mettant en avant une grande variabilité d'un sujet à l'autre.

5.1.2 Évolution de l'erreur

En effectuant un test t sur l'erreur entre le début et la fin de la phase d'appropriation pour chaque sujet, nous pouvons savoir si celle-ci a varié significativement. Nous testons alors l'hypothèse que la distribution contenant les erreurs des huit premiers gestes est statistiquement différente de celle contenant les erreurs des quatorze derniers gestes, avec un intervalle de confiance supérieur à 95%. De plus, comme une bonne adaptation est synonyme d'une baisse de l'erreur, nous nous contraignons au cas où la moyenne de la distribution de début de phase est supérieure à celle de la distribution de fin de phase (hypothèse unilatérale). En Figure 15 est représentée la moyenne en début et en fin de phase 1 pour chaque sujet. Les résultats des tests t pour chaque sujet sont présentés par leurs intervalles de confiance Figure 16.

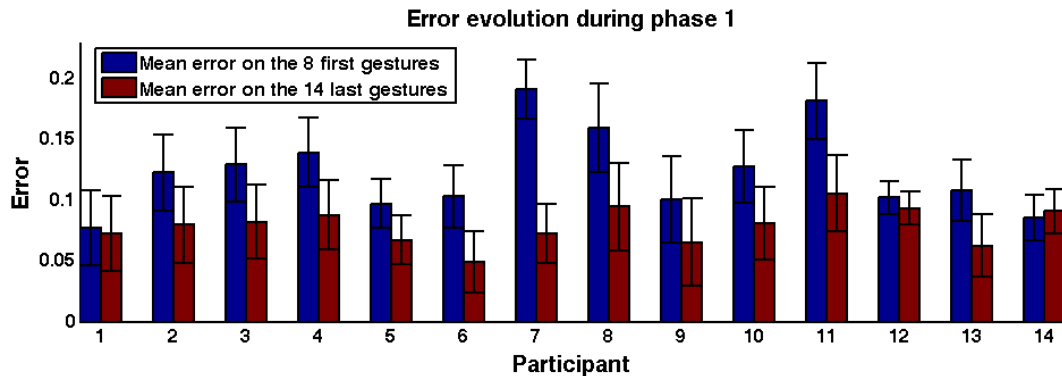


FIGURE 15 – Moyenne de l'erreur en début et en fin de phase du bloc Appropriation pour chaque sujet

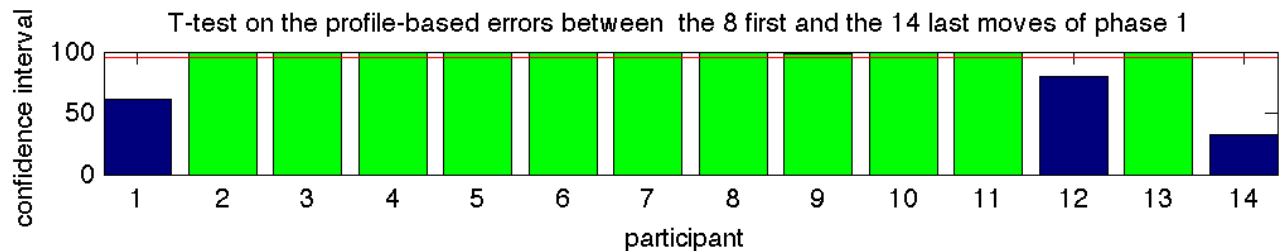


FIGURE 16 – Intervalles de confiance résultant du test t sur l'erreur pour chaque sujet sur la phase du bloc Appropriation. La barre est verte pour un test t positif ($p < \alpha$), bleue pour un test t négatif ($p > \alpha$)

Ce que l'on peut en déduire

On remarque que le test t est positif pour 11 sujets sur 14 (voir Figure 16). Pour cette majorité, le test t affirme qu'il y a eu une évolution significative (au sens intervalle de confiance supérieur à 95%) de l'erreur et, comme nous avons contraint le cas où la moyenne à la fin est inférieure à la moyenne du début, affirme donc qu'il s'agit d'une baisse significative de l'erreur. Pour les 3 autres sujets, le test t négatif signifie juste qu'il n'est pas possible de conclure sur une évolution significative dans ce sens. Cela ne donne aucune information sur la valeur de cette erreur. Il est alors possible qu'un sujet pour qui une baisse significative de l'erreur a été constatée par un test t positif voie son erreur finale supérieure à celle d'un sujet pour qui le test t est négatif. C'est le cas entre les sujets 11 et 12 : l'erreur du sujet 11 baisse significativement, mais sa valeur finale est supérieure à celle du sujet 12, qui n'a pas vu de baisse significative de son erreur.

Pour les sujets 1, 12 et 14, on constate Figure 15 qu'ils ont eu une erreur moyenne sur leurs premiers gestes relativement faible par rapport aux autres sujets, ce qui semble indiquer un geste spontané correspondant assez bien au profil E. Le résultat du t-test montre cependant qu'ils n'ont pas réussi à diminuer de manière significative l'erreur des profils initiaux qui était déjà relativement faible (voir l'exemple du sujet 12 Figure 17).

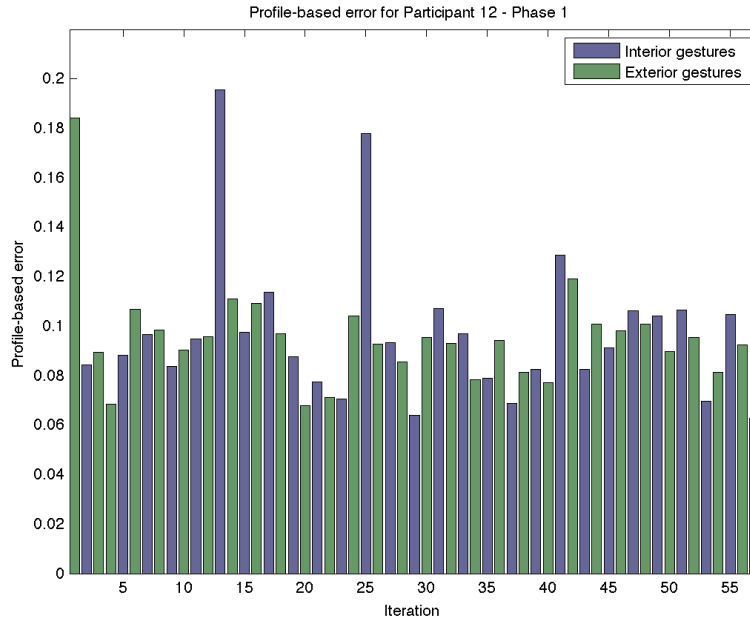


FIGURE 17 – Évolution de l'erreur pour chaque geste de la phase 1 (bloc Appropriation) du sujet 12. La stagnation de son erreur par rapport au profil engendre un test t négatif ($p > \alpha$)

5.2 Le bloc Expérience

Le but premier de l'analyse du bloc Expérience est d'évaluer dans quelles mesures les sujets s'adaptent aux deux changements de mapping qui surviennent. Pour cela, nous avons effectué des tests t sur différents descripteurs du geste.

5.2.1 Modélisation de l'erreur

Nous n'avons pas pu tirer de modèle mathématique décrivant de manière satisfaisante l'erreur sur les 14 sujets de l'expérience. Nous avons plusieurs pistes d'explications :

- asymétrie du geste aller-retour (voir Figure 18) : même si nous avons tenté d'analyser séparément les gestes aller des gestes retour sans grande satisfaction, cela peut s'expliquer par le fait que le geste aller influence forcément le geste retour, et nous ne pouvons pas considérer que de séparer les deux revienne à faire l'expérience une fois dans un sens, puis une fois dans l'autre ;
- pertes de concentration cycliques (constatées pour/par de nombreux sujets, voir Annexe F) : la durée de ces cycles étant différente pour chaque sujet, cela rend difficile la modélisation, en rajoutant une sorte de modulation d'amplitude sur l'erreur (voir Figure 19) ;
- existence d'un nombre élevé de comportements différents et par conséquent un nombre de sujets trop faible pour les observer.

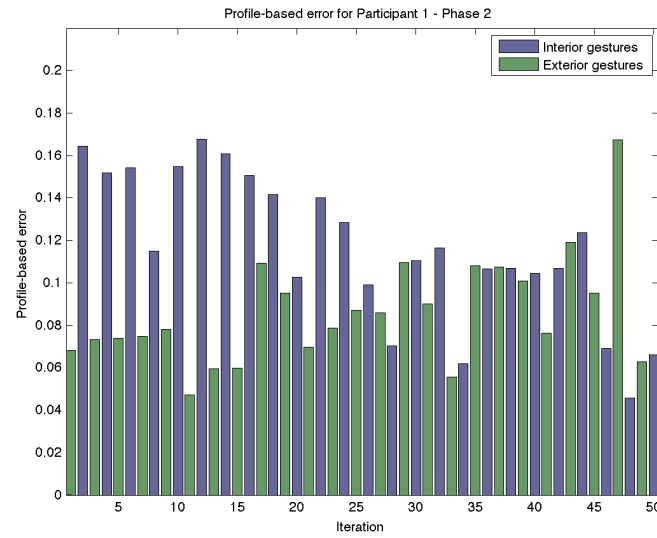


FIGURE 18 – Exemple du sujet n ° 1 ayant une nette asymétrie entre ses gestes intérieurs et extérieurs en début de phase 2 impliquant une erreur très différente selon le sens du geste.

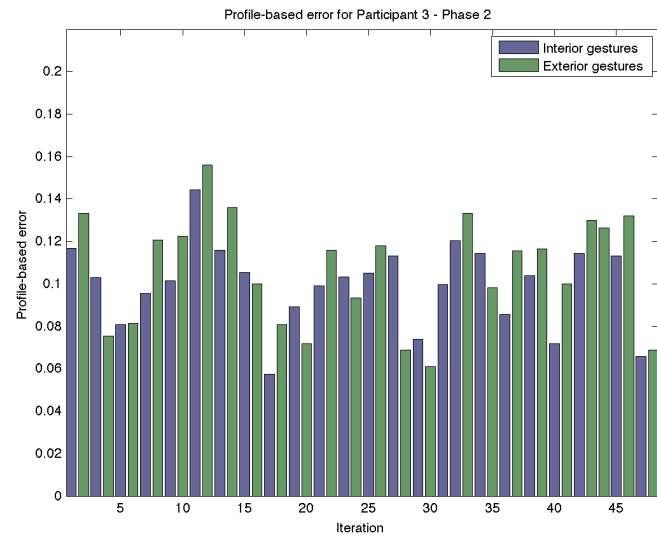


FIGURE 19 – Exemple du phénomène de déconcentration cyclique rendant difficile la modélisation mathématique de l'erreur.

5.2.2 Évolution de l'erreur

Hypothèse

Lors du passage de la phase N-1 à N : si le sujet s'est bien adapté à la phase N-1, il reproduira au début de la phase N des gestes proches de ceux du profil N-1. On devrait alors constater un pic d'erreur proche de l'erreur entre le profil de la phase N et celui de la phase N-1, en début de chaque phase et évoluant vers le bas si le sujet parvient à s'adapter au nouveau profil.

Analyse par tests t

De la même manière que pour le bloc Appropriation, nous effectuons une série de tests t basés sur l'erreur en début et en fin de phase pour les 3 phases du bloc Expérience. Conformément à la théorie, nous posons des hypothèses unilatérales supposant une baisse de l'erreur durant chaque phase. La visualisation en barres de l'erreur moyenne en début et en fin de chaque phase est disponible en Annexe C. Les intervalles de confiance résultant des tests t sont présentés Figure 20.

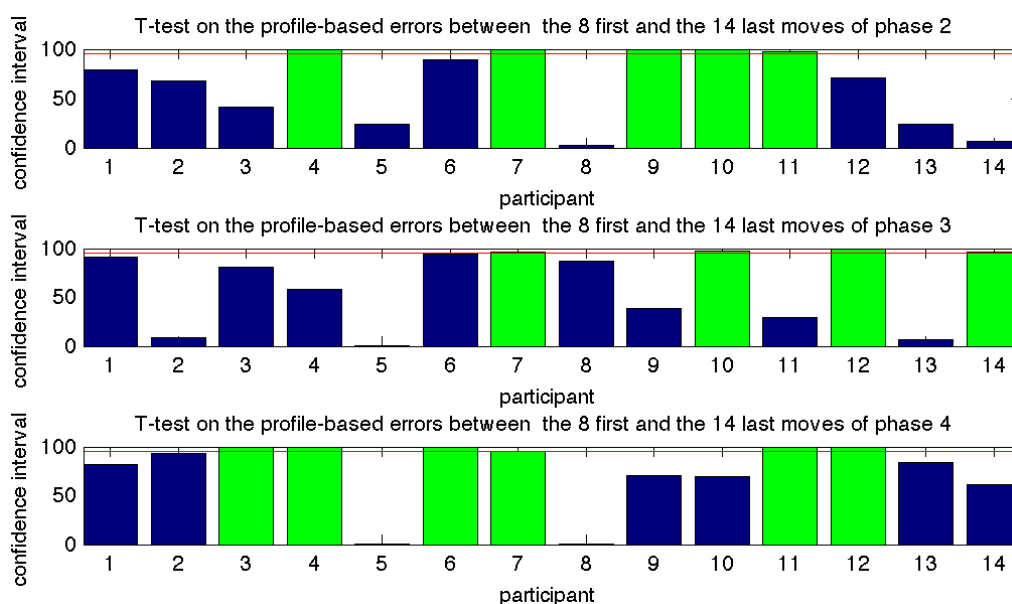


FIGURE 20 – Intervalles de confiance résultant du test t sur l'erreur pour chaque sujet sur les 3 phases du bloc Expérience

Ce que l'on peut en déduire

Pour les trois phases, nous remarquons qu'il y a moins de tests t positifs que lors du bloc Appropriation (voir Figure 16). Cela peut s'expliquer par le fait que l'erreur au début de la phase d'appropriation est relativement élevée, et donc subit une évolution plus forte que durant les phases suivantes.

En plus de l'erreur sur la totalité du geste, nous avons également calculé les tests t pour l'erreur sur la première moitié et sur la seconde moitié du geste. Les intervalles de confiance pour ces deux descripteurs sont présentés en Annexe D.

5.2.3 Évolution du moment d'ordre 1

Analyse par tests t

Afin de décrire au mieux l'évolution du moment d'ordre 1 entre chaque phase, nous avons choisi de comparer les valeurs ce descripteur en fin de phase N avec celles en fin de phase N-1. En effet, à la fin de chaque phase, le sujet est censé s'être adapté au mapping. Il nous a donc semblé plus légitime de

comparer ces zones plutôt que de comparer le début et la fin à l'intérieur d'une phase. C'est d'ailleurs ce que nous avons fait pour tous les descripteurs dont on attend une valeur cible différente d'une phase à l'autre (ce n'est pas le cas de l'erreur). Pour la première phase du bloc Expérience, nous comparons le moment d'ordre 1 à la phase du bloc Appropriation. Les valeurs du moment d'ordre 1 pour les 3 profils cibles sont présentés tableau 1. Nous remarquons alors que pour l'enchaînement E-A-B-A, nous nous attendons à voir la valeur du moment d'ordre 1 varier respectivement vers le bas, vers le haut, puis à nouveau vers le bas. Ayant ces informations pour les tests t, nous posons les hypothèses unilatérales afin qu'ils limitent les bons résultats à ce type d'évolution entre chaque phase.

Les intervalles de confiance pour chaque participant et chaque phase sont présentés Figure 21.

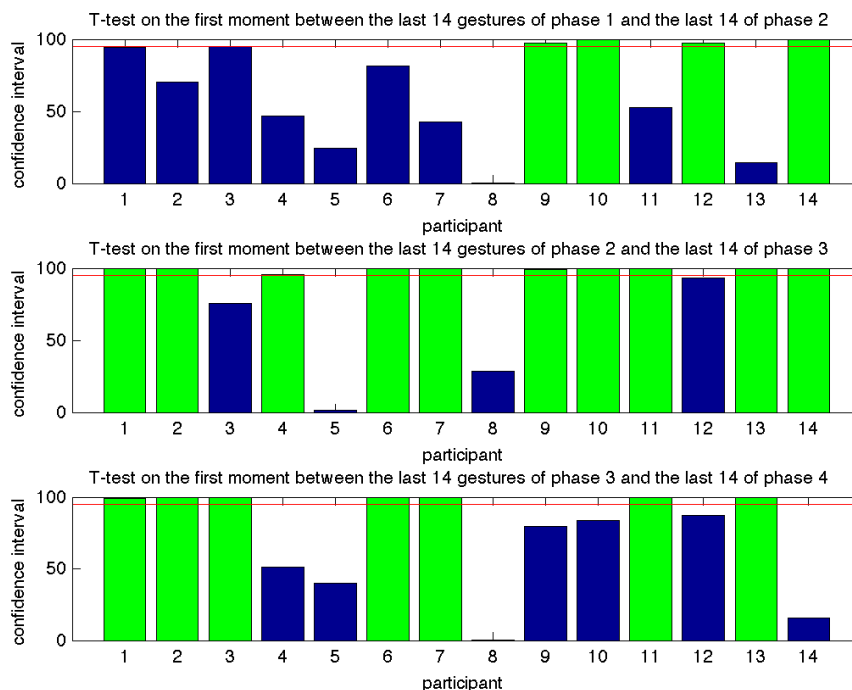


FIGURE 21 – Intervalles de confiance résultant des tests t sur le moment d'ordre 1 pour chaque sujet sur les 3 phases du bloc Expérience

Ce que l'on peut en déduire

Un test t positif (intervalle de confiance supérieur à 95%) pour la phase N signifie dans notre cas que le sujet a déplacé de manière significative le moment d'ordre 1 de son profil de vitesse angulaire dans le bon sens conformément à la phase N-1. A l'inverse, un test t négatif pour la phase N affirme qu'il n'est pas possible de conclure sur une évolution significative (au sens intervalle de confiance supérieur à 95%) du moment d'ordre 1 dans le bon sens. Cela peut s'expliquer par exemple par une stagnation de la valeur entre les deux phases, ou bien encore une par une évolution dans le sens inverse conformément à la phase N-1.

De manière générale, les sujets parviennent assez bien à adapter leur moment d'ordre 1, i.e. le temps au bout duquel ils ont parcouru la moitié de l'angle total à balayer. Cependant, les résultats sont moins bons durant la phase 2. Cela peut s'expliquer par le fait que la variation du moment d'ordre 1 attendue entre le profil E et le profil A (phase 2) est deux fois plus faible que celle attendue entre les profils A et B (phase 3 et phase 4). L'évolution du moment d'ordre 1 sera alors moins importante

donc moins significative à variances égales durant la phase 2 que durant les phase 3 et 4.

5.2.4 Évolution de l'angle de départ

Analyse par tests t

Les valeurs des angles de départ des 3 profils cibles sont présentés tableau 2. Nous remarquons alors que pour l'enchaînement E-A-B-A, nous nous attendons à voir la valeur de l'angle varier respectivement vers le haut, vers le bas, puis à nouveau vers le haut. Ayant ces informations, nous contraignons les tests t afin qu'ils limitent les bons résultats à ce type d'évolution entre chaque phase. Nous remarquons également que l'on s'attend à une variation de l'angle plus faible entre les mappings E et A qu'entre A et B puis B et A. Les intervalles de confiance pour chaque participant et chaque phase sont présentés Figure 22.

Profil	Angle de départ (degrés)
E	35.6
A	42.3
B	29.1

TABLE 2 – Angle de départ des différents profils de vitesse angulaire

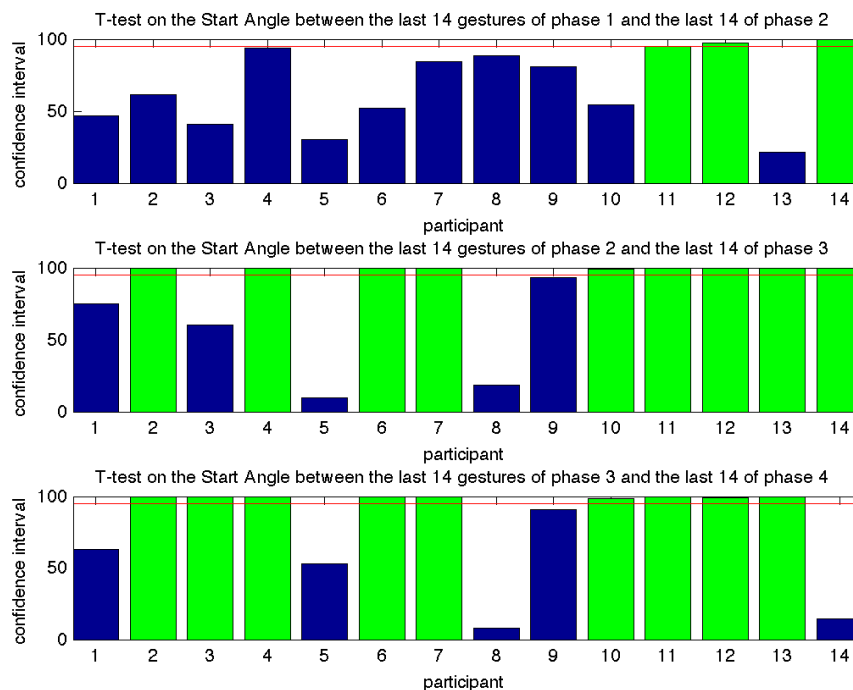


FIGURE 22 – Intervalles de confiance résultant des tests t sur l'angle de départ pour chaque sujet sur les 3 phases du bloc Expérience

Ce que l'on peut en déduire

Durant les phases 3 et 4, nous remarquons un grand nombre d'adaptations significatives de l'angle

de départ (9 sujets sur 14). Cependant, cela ne semble pas être le cas durant la phase 2. Cela peut s'expliquer par le fait que la variation d'angle attendue entre le profil E et le profil A (phase 2) est deux fois plus faible que celle attendue entre les profils A et B (phase 3 et phase 4). L'évolution de l'angle de départ sera alors moins importante donc moins significative à variances égales durant la phase 2 que durant les phase 3 et 4.

De manière générale, les sujets parviennent bien à adapter leur angle de départ, i.e. leur phase d'accélération de début de geste.

5.2.5 Évolution de l'angle d'arrivée

De la même manière que pour l'angle de départ, nous effectuons une série de tests t en contraignant l'évolution vers les valeurs des profils. Les intervalles de confiance pour chaque participant et chaque phase sont présentés Figure 23.

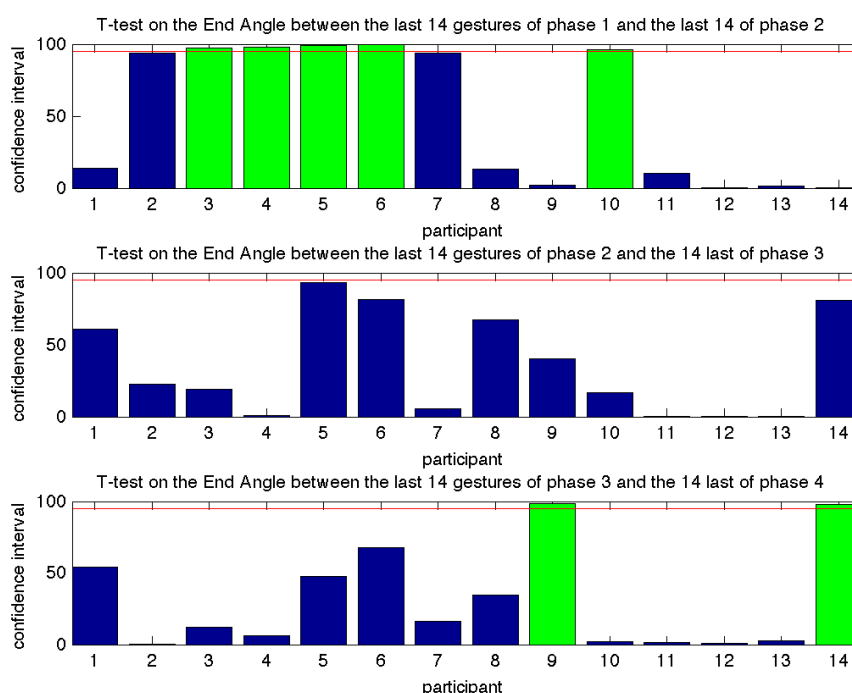


FIGURE 23 – Intervalles de confiance résultant du test t sur l'angle d'arrivée pour chaque sujet sur les 3 phases du bloc Expérience

Ce que l'on peut en déduire

Nous remarquons que contrairement à l'angle de départ, très peu de sujets parviennent à adapter leur angle d'arrivée. Cela pose notamment problème pour le passage du profil A au profil B attendu en phase 3 pour lequel il est nécessaire de faire grandement augmenter l'angle d'arrivée. On remarque qu'aucun des sujets n'est parvenu à s'adapter de manière significative lors de cette transition.

5.2.6 Début vs. fin du geste

En observant les descripteurs du début du geste par rapport à ceux de la fin du geste, nous remarquons des nombres moyens d'adaptation sensiblement plus grands pour le début geste que pour

la fin. L'adaptation sur la fin du geste semble donc plus difficile (voir Figure 24).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Nombre d'adaptations moyen
Erreur (1° moitié)	1	2	3	3	0	3	3	2	1	2	1	2	1	2	1.9
Erreur (2° moitié)	0	2	1	3	1	2	3	1	1	3	2	0	1	1	1.5
Angle début	0	2	1	2	0	2	2	0	0	2	3	3	2	2	1.5
Angle fin	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0.5

FIGURE 24 – Nombre d'adaptations (sur les blocs Appropriation + Expérience) pour chaque sujet selon l'erreur sur la première moitié du geste, celle sur la deuxième, l'angle de départ et celui d'arrivée, mettant en avant une meilleure adaptation globale sur le début du geste par rapport à la fin du geste

5.2.7 Synthèse des évolutions

En regardant le nombre de phases où il y a eu adaptation significative pour chaque descripteur et pour chaque sujet, nous obtenons un nombre d'adaptations entre 0 et 3 (pour les 3 phases du bloc Expérience). A partir de cette valeur pour chaque descripteur, nous avons défini pour chaque sujet une sorte de note globale permet de dégager des différences claires entre certains sujets (voir Figure 25). Il est important de noter que ces descripteurs ne sont pas indépendants les uns des autres. En effet, une bonne adaptation du moment d'ordre 1 et des angles de départ et d'arrivée sera probablement corrélée avec une baisse significatif des erreurs sur la première et deuxième moitié du geste.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Moyenne
Erreur (1° moitié)	1	1	2	2	0	2	2	1	1	2	1	1	0	2	1.3
Erreur (2° moitié)	0	1	1	2	0	1	2	0	0	2	1	0	0	1	0.8
Angle début	0	2	1	2	0	2	2	0	0	2	3	3	2	2	1.5
Angle fin	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0.5
Moment 1	2	2	1	1	0	2	2	0	2	2	2	1	2	2	1.5
Total (/15)	3	6	6	8	1	8	8	1	4	9	7	5	4	8	5.6

FIGURE 25 – Tableau donnant le nombre d'adaptations sur le bloc Expérience selon les différents descripteurs pour chaque sujet et la note globale d'adaptation obtenue pour chaque sujet.

On remarque clairement des sujets qui s'adaptent très bien (n° 4, 6, 7, 10, 14) et d'autres quasiment pas (n° 5, 8). Nous nous sommes intéressés à l'éventuelle corrélation entre ces résultats et le taux de gestes à faible erreur, sorte de taux de réussite, réalisés durant le bloc Expérience. Ce pourcentage pour chaque sujet est représenté Figure 26.

On retrouve en effet les cinq sujets ayant une bonne note globale d'adaptation dans les 6 meilleurs taux de réussite.

Le sujet n° 4

Le sujet n° 4 apparait comme celui ayant à la fois le taux de réussite le plus haut et une des notes globales d'adaptation les plus élevées. En figure 27 est présentée l'évolution du profil de vitesse

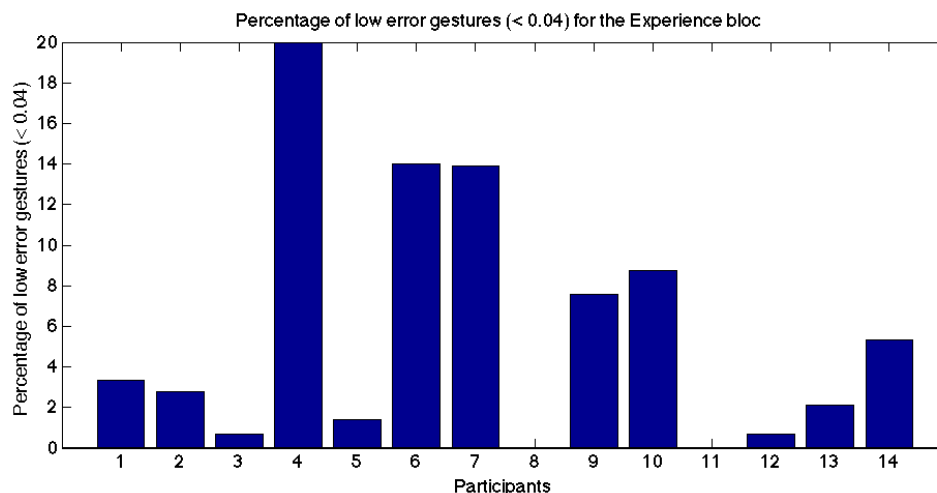


FIGURE 26 – Taux (en %) de gestes dont l’erreur est considérée comme faible (< 0.04) pour chaque sujet sur l’ensemble du bloc Expérience.

angulaire de ce dernier en fin de chaque phase comparé au geste moyen en fin de la phase précédente. On constate en effet qu’il parvient durant chaque phase à se rapprocher du profil, réduisant l’erreur sur la première et deuxième moitié du geste. Il semble bien adapter à chaque fois son angle de départ dans le bon sens, même si son geste en fin de phase 1 légèrement asymétrique vers la gauche fait que l’évolution entre la phase 1 et 2 n’est pas assez franche pour rendre le test t positif (voir Figure 22). Pour s’adapter au mieux au profil B de la phase 3, il joue ne d’ailleurs uniquement sur l’angle de départ, permettant de déplacer le moment d’ordre 1 dans le bon sens (il augmente). Comme nous l’avons déjà constaté de manière globale avec les tests t , l’angle de fin pose problème au sujet n° 4.

Le sujet n° 9

Nous nous sommes penchés sur l’exception du sujet n° 9, ayant à la fois une note globale d’adaptation faible (4) et un taux de réussite relativement élevé. En figure 28 est présentée l’évolution du profil de vitesse angulaire de ce dernier en fin de chaque phase comparé au geste moyen en fin de la phase précédente. On remarque en effet que son profil évolue peu d’une phase à l’autre, notamment l’angle de départ dont l’évolution, bien qu’elle semble être dans le bon sens d’une phase à l’autre, n’est pas jugée significative par tests t avec $\alpha = 0.05$ (voir Figure 22). Le sujet garde finalement un profil assez symétrique qu’il décale légèrement en temps, ce qui suffit à obtenir un nombre de reproductions fidèles de la cible au-dessus de la moyenne.

Les sujets n° 11 et 12

Les sujets 11 et 12 ont attiré mon attention pour leurs faibles taux de réussite malgré une note globale d’adaptation dans la moyenne. On remarque que ces deux sujets ont un nombre d’adaptations intéressant aussi bien pour l’angle de départ que pour celui d’arrivée : ils adaptent à chaque fois correctement leur angle de départ (3/3), mais n’adaptent jamais leur angle d’arrivée (0/3). On constate clairement Figure 29 et 30 que les deux sujets adaptent très bien leur angle de départ, mais ne maîtrisent pas la fin du geste, n’impliquant aucune adaptation de l’angle d’arrivée.

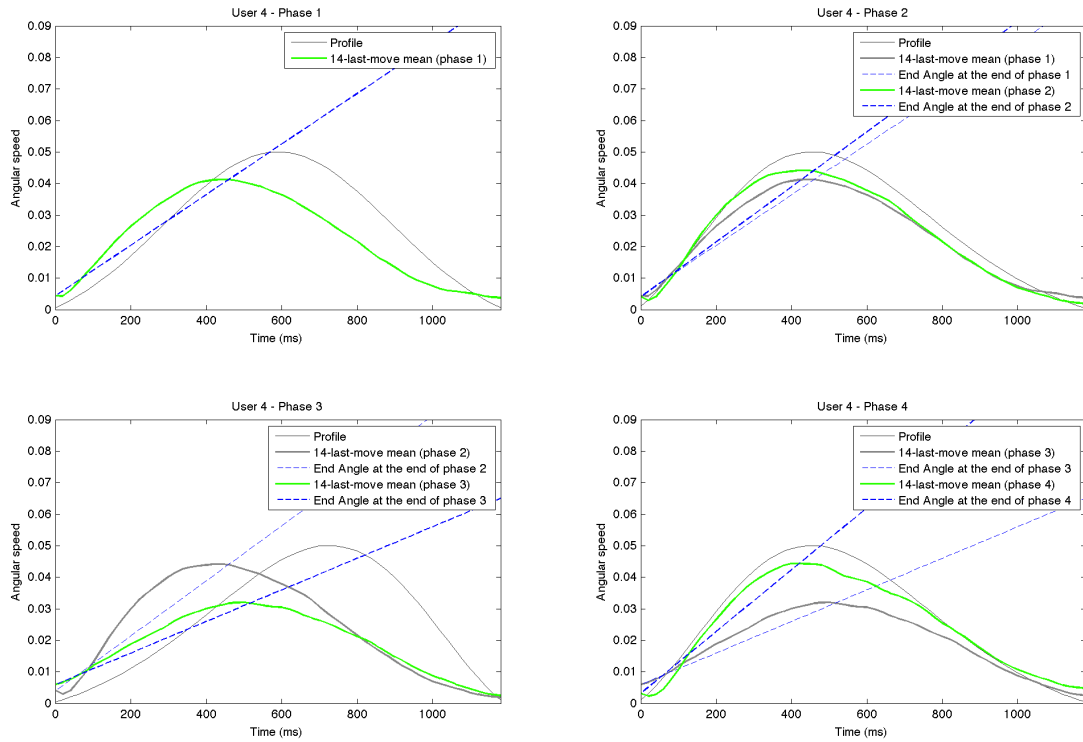


FIGURE 27 – Évolution du profil de vitesse angulaire du sujet n ° 4 et de son angle de départ

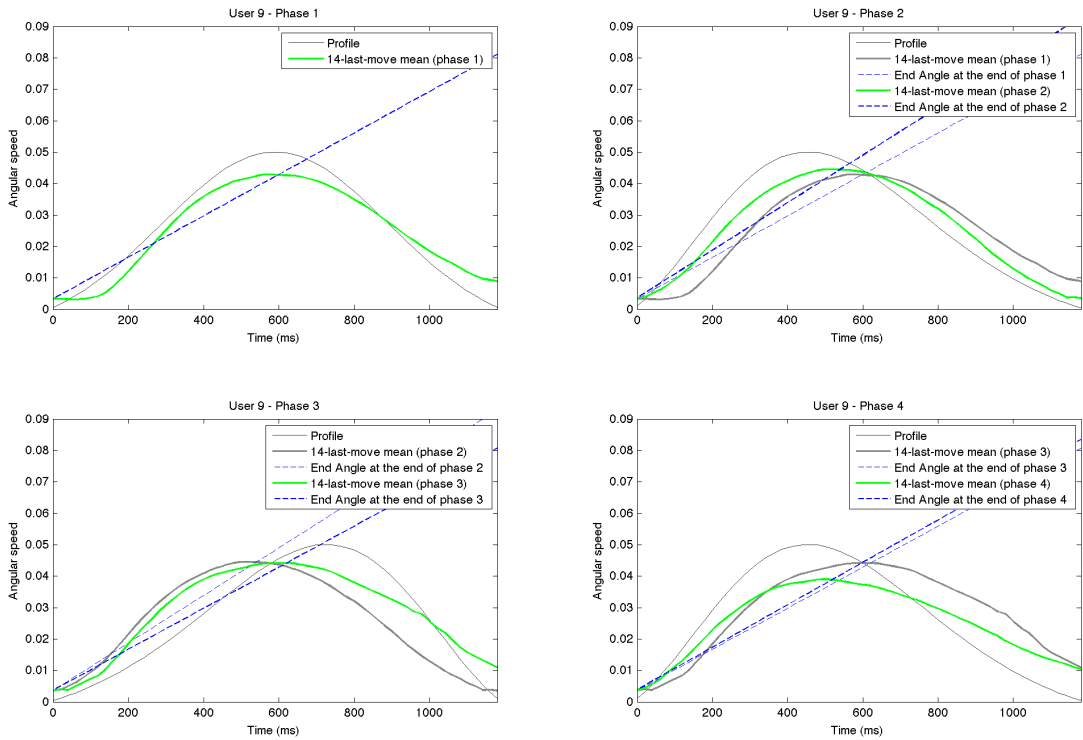


FIGURE 28 – Évolution du profil de vitesse angulaire du sujet n ° 9 et de son angle de départ

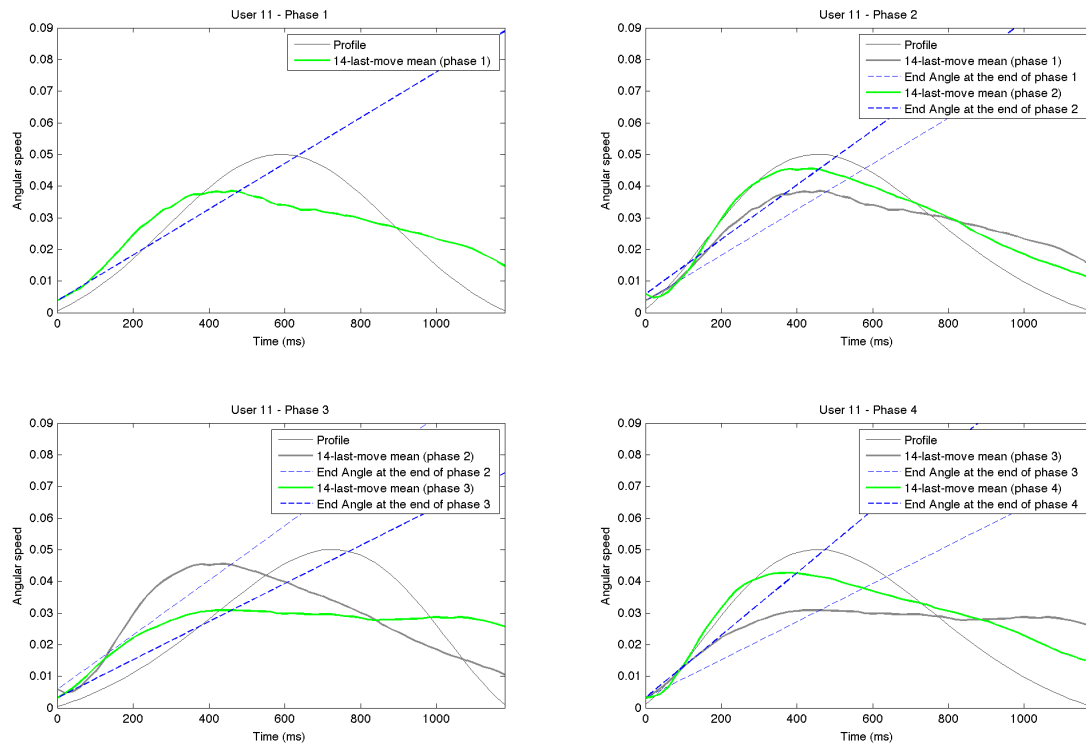


FIGURE 29 – Évolution du profil de vitesse angulaire du sujet n° 11 et de son angle de départ. On remarque une bonne adaptation de l'angle de départ, malgré une fin de geste visiblement incomprise.

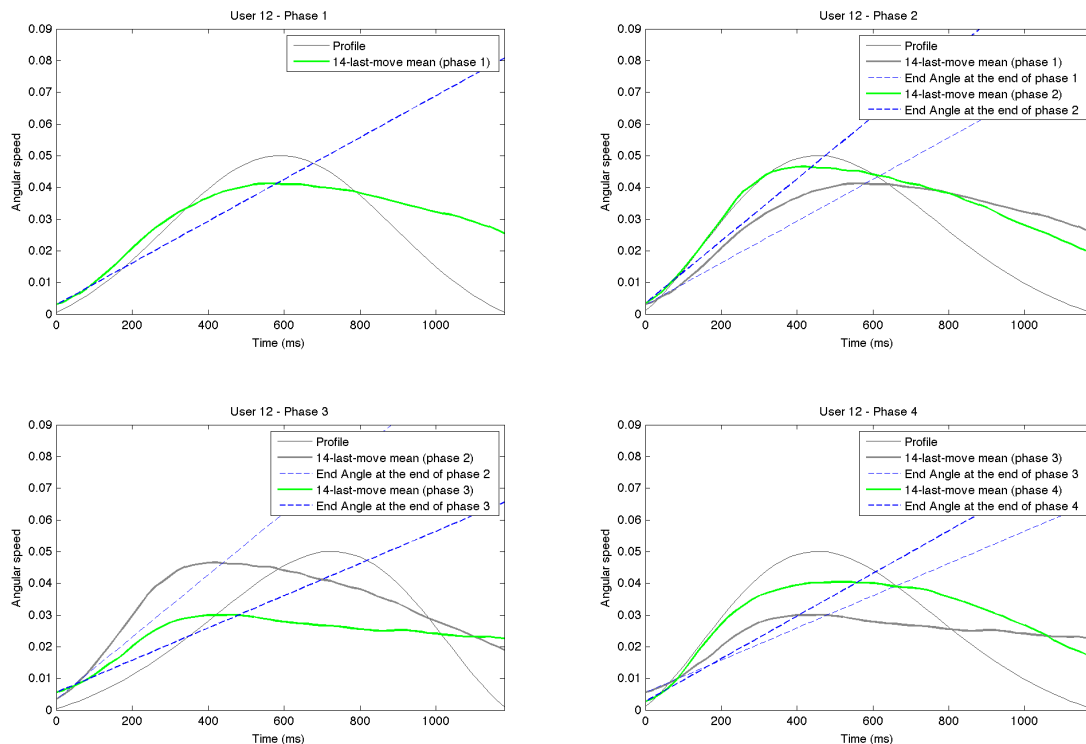


FIGURE 30 – Évolution du profil de vitesse angulaire du sujet n° 12 et de son angle de départ. Comme pour le sujet 11, On remarque une bonne adaptation de l'angle de départ, malgré une fin de geste visiblement incomprise.

5.3 Synthèse du questionnaire post-expérience

Le questionnaire effectué en fin d'expérience permet de recueillir les impressions des sujets afin de mieux comprendre et analyser leurs résultats, mais aussi afin d'améliorer l'expérience pour la prochaine version. Le questionnaire est disponible en Annexe E et les réponses (rendues anonymes) sont disponibles Annexe F.

5.3.1 Sentiment de maîtrise et difficulté

A la question "Avez-vous eu l'impression de maîtriser le système?", sur une échelle de "1 = Pas du tout" à "5 = Parfaitement", les sujets ont répondu en moyenne 2/5 pour le bloc Appropriation, et 3/5 pour le bloc Expérience (voir Figure 31). Quant à la difficulté de la tâche, entre "1 = Faible (facile)" et "5 = Elevée (difficile)", les résultats sont assez corrélés avec ceux de la maîtrise : 3,5/5 pour le bloc Appropriation, 3/5 pour le bloc Expérience.

Un sentiment de maîtrise en phase 1 relativement faible semble indiquer que le bloc Appropriation n'est pas suffisamment long pour s'approprier complètement le système ou, dans la même logique, que le système est trop complexe pour être maîtrisé en 60 gestes. Les sujets ont paradoxalement eu le sentiment de mieux maîtriser le bloc Expérience (3/5), malgré les perturbations.

5.3.2 Mapping ressenti

Détection des changements du mapping

A la question "Avez-vous senti des modifications du système?", la nette majorité a répondu correctement pour le bloc Appropriation : 9 'non', 3 'peut-être', 2 'oui'. Cependant, pour la même question concernant le bloc Expérience, 7 répondent 'oui', 5 'non' et 2 'peut-être'. Il y a donc plus d'un tiers des sujets qui pense que le mapping n'a pas changé durant la phase d'Expérience. En s'intéressant de plus près à ce groupe de cinq sujets, on se rend compte qu'il contient à la fois des sujets qui se sont bien adaptés et avec un fort taux de réussite (4, 6, 14), un sujet qui s'est moyennement adapté et avec taux de réussite moyen (13) mais aussi un sujet qui ne s'est pas bien adapté avec un taux de réussite faible (8).

Même si les sujets à fort taux de réussite semblent être légèrement sur-représentés dans ce groupe, le nombre trop faible de sujets ne permet pas d'affirmer l'existence d'une corrélation entre le fait de ne pas avoir conscience de la perturbation et le fait d'obtenir un taux de réussite élevé. Il faut également noter que certains d'entre eux étaient persuadés de "perdre" le geste, puis de le retrouver, considérant probablement l'augmentation de l'erreur lors des changements de mapping comme des pertes de concentration. On remarquera tout de même qu'un des sujets qui a le mieux réussi n'a pas ressenti de perturbations et a évoqué une meilleure réussite lorsqu'il n'essayait pas de s'adapter de manière "consciente", préférant laisser la place à une adaptation "inconsciente".

Types de modifications ressenties

Parmi les sujets qui ont ressenti des modifications du système, un a parlé de "modification de l'attaque attendue", un autre a ressenti une variation de la "finesse". Le sujet le plus proche de la réalité a compris qu'il fallait adapter le démarrage et l'arrivée en étant parfois plus rapide ou plus lent.

Description du geste à effectuer

Bien que non demandé, plusieurs sujets ont décrit le geste qu'ils devaient reproduire. La plupart pensaient que le geste attendu était à vitesse constante. Un sujet pensait que le mapping dépendait de la hauteur à laquelle il levait l'objet.

5.3.3 Conditions de l'expérience

Les retours sur les conditions d'expérience sont positifs (voir Figure 31) :

- le test a été en moyenne considéré comme "de la bonne durée" ;
- globalement, les sujets n'ont ressenti aucune fatigue physique ou auditive durant le test ;
- globalement, les sujets ont qualifié le son d'assez agréable.

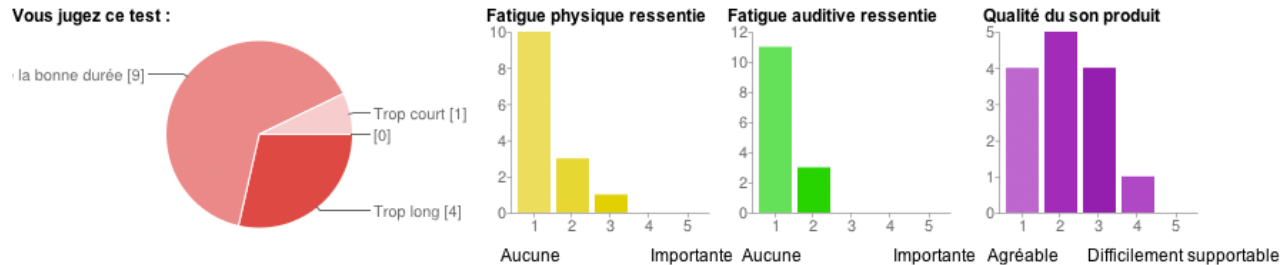


FIGURE 31 – Répartition des réponses aux questions sur les conditions d'expérience

6 Conclusions et perspectives

6.1 Conclusions sur l'expérience

6.1.1 Une adaptation différente mais bien caractérisée

Nous avons proposé une analyse de l'adaptation selon plusieurs descripteurs. Les résultats ont montré de nettes différences entre les sujets.

Nous avons constaté une bonne adaptation d'environ un tiers des sujets, corrélée avec un taux de réussite (nombre de reproductions fidèles de la cible sonore) élevée.

A l'inverse, selon nos critères, deux sujets ne se sont clairement pas adaptés. Leur taux de réussite est sans surprise très bas.

Enfin, entre ces extrêmes, nous retrouvons des comportements différents, comme les sujets 11 et 12 qui sont parvenus à très bien adapter leur angle de départ, malgré une fin de geste incomprise et laissée à l'abandon. Enfin, le sujet 9 a réussi à obtenir un taux de réussite relativement élevé en gardant un profil assez symétrique qu'il a déplacé temporellement : il l'effectuait plus tôt pour le profil A et plus tard pour le profil B.

Globalement, nous avons donc constaté des signes d'adaptation pour la grande majorité des sujets (12 sur 14), indépendamment du fait de prendre conscience ou non des modifications du système (5 sujets sur 14 ne les ont pas ressenties).

6.1.2 Une vitesse d'adaptation difficile à évaluer

Il aurait été intéressant d'aller encore plus loin en parvenant à définir au bout de combien de temps le sujet réussissait à s'adapter à la perturbation. Le problème d'asymétrie des gestes aller-retour auquel s'ajoute le phénomène de déconcentration cyclique sont les principales raisons qui selon nous expliquent le fait que nous ne sommes pas parvenus à définir de manière satisfaisante cette vitesse d'adaptation des sujets. A cela s'ajoute également la difficulté pour les sujets de reproduire plusieurs gestes identiques à la suite (indépendamment de l'éventuel asymétrie aller-retour). Il semble en effet que l'homme ne soit pas habitué à évaluer et à contrôler de manière consciente la vitesse de son membre supérieur lors d'un déplacement d'objet, puisque la plupart des sujets pensaient effectuer des gestes à vitesse constante.

6.2 Constats et recommandations pour l'expérience future

6.2.1 L'asymétrie du geste aller/retour

Constat

Nous avons remarqué une asymétrie entre le geste aller et le geste retour, plus ou moins marquée selon les personnes. Cela mène généralement à la confusion du sujet qui risque par exemple d'adapter son geste retour N avec les informations sonores de son geste aller N-1, alors qu'il devrait plutôt se baser sur les informations du geste retour N-2 pour bien s'adapter. Nous avons également évoqué le risque que le sujet imagine la cible comme un tracé dans l'espace entre les deux zones, et qu'il pense devoir parcourir ce tracé "à l'envers" dans le sens retour.

Recommandations

Nous recommandons donc de choisir un sens (vers l'intérieur ou vers l'extérieur par rapport au sujet) et de le spécifier dans la notice d'information. Une augmentation de la durée totale de l'expérience est à prévoir, puisqu'il faudra compter le temps de retour de la main dans la zone de départ entre chaque geste.

6.2.2 Une erreur sur la fin du geste "trompeuse"

Constat

Certains sujets avaient tendance à exécuter un geste trop long, et ne déposaient pas l'objet à temps, i.e. avant la fin du profil cible. Malgré la consigne qui insistait sur l'importance de terminer chaque geste en même temps que le son, ces personnes éprouvaient de grandes difficultés à corriger ce problème. D'après les discussions post-expériences, il semble que cela vienne de l'interprétation de l'harmonique supérieure en effet excitée en fin de geste, puisque au lieu de finir à vitesse nulle comme c'est le cas pour profil, le sujet était encore à une vitesse non nulle, donc trop rapide par rapport au profil cible. Le sujet constatait alors qu'il était "trop rapide" en fin de geste et décidait de ralentir, augmentant d'avantage la durée du geste. Une fois tombé dans ce cercle vicieux, la plupart ne cherchait plus à améliorer la fin du geste et se concentrait sur le début.

De manière plus générale, c'est peut-être la notion de mapping temporel qui pose problème à certains sujets.

Recommandations

Nous avons pensé à déclencher un second bip à la fin du profil, ce qui pourrait peut-être suffire à ce que le sujet règle son arrivée sur ce dernier. Nous avons également imaginé changer le type de son généré par un son moins stationnaire, contenant des indices temporels assez clairs pour 'sentir' la fin du geste.

6.2.3 Un geste spontané variable selon les personnes

Constat

Lors de la première manipulation, le profil spontané du sujet était très variable. Cela a pour conséquence une approche du système probablement différente d'une personne à l'autre, la tâche demandée pouvant être plus ou moins intuitive (correspondant plus ou moins à leur profil spontané).

Recommandations

Pour la prochaine expérience, nous proposons de nous baser sur le profil du geste spontané du sujet, en l'enregistrant sans retour sonore au début de l'expérience. Suivrait une phase d'appropriation avec le profil capturé, puis une phase avec ce profil déformé (déplacement du maximum de vitesse et/ou changement d'échelle).

6.2.4 Des conditions expérimentales satisfaisantes

Constat

L'analyse des réponses au questionnaire de fin d'expérience montre que la majorité des sujets ont jugé l'expérience de manière positive : sa durée était satisfaisante, aucune fatigue physique ou auditive n'a été ressentie et le son généré a été considéré comme assez agréable.

Recommandations

Compte tenu du fait qu'une adaptation a été clairement visible chez la plupart des sujets, nous recommandons de conserver des conditions expérimentales similaires.

A Ecran de contrôle de l'application Max/MSP



B Notice d'information

Notice d'information

Cette expérience s'inscrit dans l'étude de l'apprentissage sensori-moteur avec un retour sonore. Son objectif est de reproduire un son cible en effectuant un geste.

Le geste consiste à déplacer l'objet noir alternativement d'une zone à l'autre, avec votre main dominante et le coude posé sur la table. A chaque arrivée, l'objet doit être posé dans la zone, sans être dessaisi. Vous aurez les yeux bandés.

Le son cible que vous allez écouter correspond aussi bien à un aller qu'à un retour entre ces deux zones. Le son est généré en fonction de la vitesse de balayage horizontale de l'objet. Évitez au maximum la rotation de votre poignet.

Remarque : Les zones sont uniquement là pour vous donner une idée de l'amplitude du geste. Ce n'est pas un problème si vous êtes amené(e) à ne pas les atteindre ou à les dépasser (rappel : vous aurez les yeux bandés).

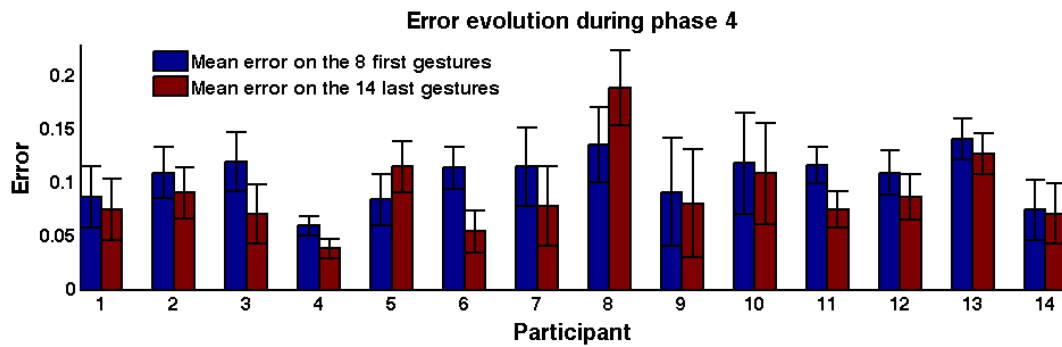
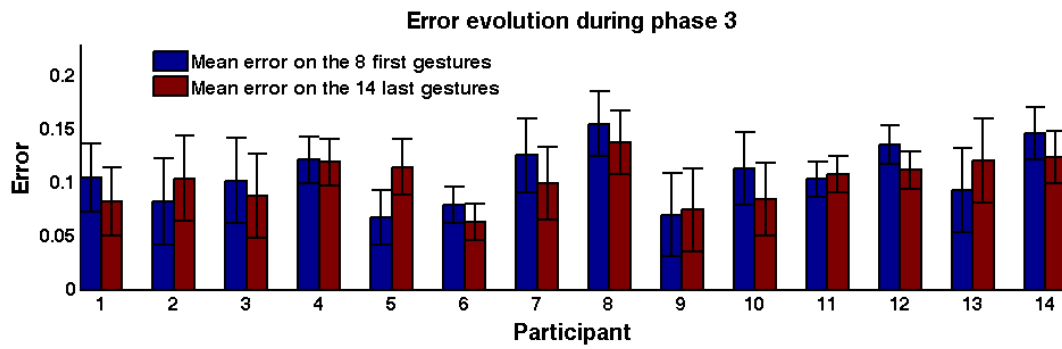
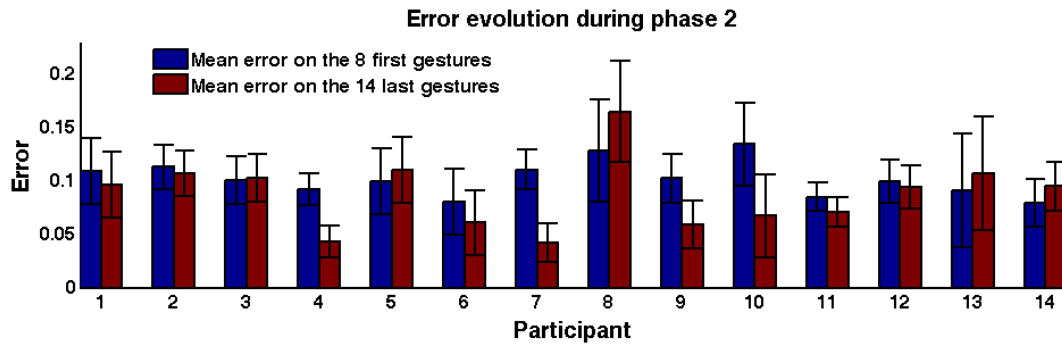
Déroulement de l'expérience (20 min environ)

- Ecoute du son cible et des exemples de sons incorrects
- Premiers essais les yeux ouverts pour s'habituer à manipuler l'objet : environ 4 minutes
- Tentatives de reproduction du son cible les yeux bandés : environ 8 minutes
- Le test s'arrêtera de lui-même (vous entendrez un gong)
- Questionnaire et entretien

Après avoir entendu un bip, vous débuterez votre mouvement quand vous le souhaitez.

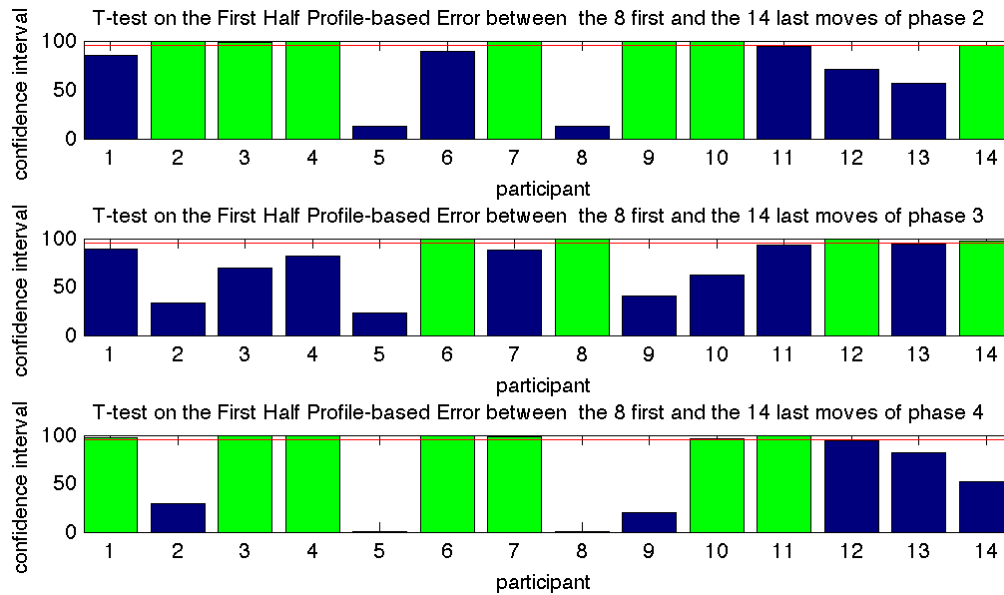
L'objet commence à émettre du son dès que vous le levez. Le son s'arrête après une durée déterminée qui correspond à la durée du son cible. La fin du son doit correspondre à la fin de votre mouvement.

C Erreur en début et en fin de phase pour le bloc Expérience

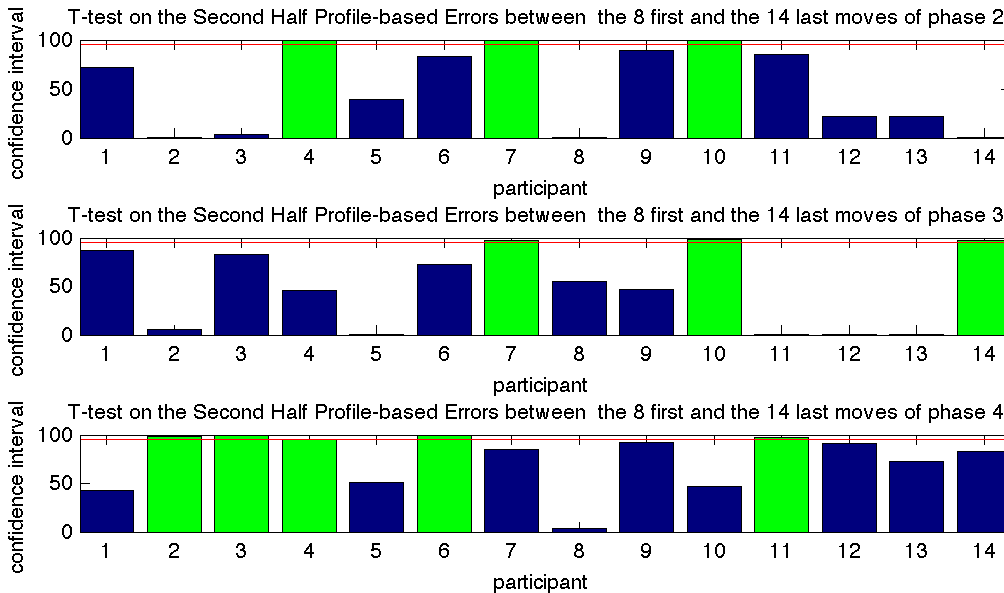


D Résultats des tests t pour les erreurs sur la première et deuxième moitié du geste

D.1 Intervalles de confiance des tests t pour l'erreur sur la première moitié du geste



D.2 Intervalles de confiance des tests t pour l'erreur sur la seconde moitié du geste



E Questionnaire post-expérience

Informations personnelles (1/2)

Nom et prénom *

Age *

Main dominante * Droite | Gauche | Je suis ambidextre

Main(s) utilisée(s) * Droite | Gauche | Les deux

Êtes-vous musicien ? * Non | Oui, amateur | Oui, professionnel

Si oui, quel instrument ?

Si oui, depuis combien d'années ?

Etes-vous familier avec les interfaces numériques ? * Oui Non

Impressions sur l'expérience (2/2)

Est-ce qu'il y a des choses qui vous ont gêné(e) durant l'expérience ? *

Phase de découverte

Avez-vous eu l'impression de maîtriser le système en phase de découverte ? *

1 2 3 4 5

Pas du tout

Parfaitement

Difficulté de la tâche en phase de découverte *

1 2 3 4 5

Faible (facile)

Elevée (difficile)

Avez-vous senti des modifications du système durant la phase de découverte ? Si oui, comment les décririez-vous ? *

Phase d'expérience

Avez-vous eu l'impression de maîtriser le système en phase d'expérience ? *

1 2 3 4 5
 Pas du tout Parfaitement

Difficulté de la tâche en phase 2 *

1 2 3 4 5
 Faible (facile) Elevée (difficile)

Avez-vous senti des modifications du système durant la phase d'expérience ? Si oui, comment les décririez-vous ? *

Impressions générales

Vous jugez ce test : * Trop long | De la bonne durée | Trop court

Fatigue physique ressentie *

1 2 3 4 5
 Aucune Importante

Fatigue auditive ressentie *

1 2 3 4 5
 Aucune Importante

Qualité du son produit *

1 2 3 4 5
 Agréable Difficilement supportable

F Réponses au questionnaire post-expérience

Numéro du sujet	Age	Main dominante	Main(s) utilisée(s)	Etes-vous familier avec les interfaces numériques ?	Etes-vous musicien ?	Si oui, quel instrument ?	Si oui, depuis combien d'années ?	Est-ce qu'il y a des choses qui vous ont gêné(e) durant l'expérience ?	Avez-vous eu l'impression de maîtriser le système en phase de découverte ?	Difficulté de la tâche en phase de découverte
1	23	Droite	Droite	Oui	Oui, amateur	Guitare, basse, batterie,...	8	Perte de concentration cyclique. Son grattement contre intuitif. Imagine un parcours en arc de cercle. Un seul sens aurait été mieux	3	4
2	23	Droite	Droite	Oui	Oui, amateur	guitare	7	Difficile. Résultats différents alors que sensation de faire le mm geste Meilleur avec coude levé ? Fin du geste non prise en compte Sensation de latence ? Frottement du coude. Perte de concentration. A essayé d'avoir une vitesse constante.	2	4
3	23	Droite	Droite	Oui	Oui, amateur	violon, piano	15	Harmonique rapide > plus agréable que le frottement. Frottement intuitif.	2	2
4	23	Droite	Droite	Oui	Oui, amateur	flûte trav, piano	16	RAS	2	3
5	23	Droite	Droite	Oui	Oui, amateur	Piccolo, Flute traversière	1	A certains moments, ne savait plus quoi faire pr améliorer	3	1
6	22	Gauche	Gauche	Oui	Oui, professionnel	Piano	15	Mêmes mouvements -> sons différents. Pertes de concentration -> déviation Une fois que je retrouve le bon son, j'y arrive sauf une fois de tps en tps, puis perte de concentration. Pas sûr au début si timer après bip. Crispation. Adaptation "inconsciente" fonctionne mais pas l'adaptation consciente.	3	2
7	23	Droite	Droite	Oui	Oui, amateur	Guitare	10	Difficile -> mouvement trop libre par rapport à un instrument. Manque de retour physique (poids, etc...) Déclenchement. Fatigue psychologique/"nerveuse"	2	3
8	24	Gauche	Gauche	Oui	Oui, amateur	Piano	10	Assez sensible. Son grave tjr au début. Mal aux yeux (bandeau).	3	4
9	25	Je suis ambidextre	Droite	Oui	Oui, amateur	Batterie	10	Gestes devaient être plus grands que la table Se rendait compte qu'il levait le coude. Perturbé par le random du bip. Son bruit plus désagréable que aigu.	3	4
10	24	Droite	Droite	Oui	Oui, amateur	Chant lyrique	10	Aurait aimé avoir une phase pr comprendre le mapping. Le système prévoyait le moment où tu devais l'arrêter. Ca revenait par hasard.	1	4
11	22	Droite	Droite	Oui	Oui, amateur	Percussions, Piano	10 et 2	Je ne comprenais pas pourquoi il avait les 2 sons consécutivement -> perturbé J'y arrivais mieux vers l'intérieur car il fallait aller assez vite au début Bien insister sur le fait que l'on peut démarrer qd on le souhaite	1	4
12	28	Gauche	Gauche	Oui	Oui, amateur	Saxophone	5	Impression de mieux y arriver vers l'extérieur car vers l'intérieur le coude bouge. Plusieurs conditions ? ou moi qui ai changé ? Départ/arrivée difficile à gérer à cause du besoin de poser/déposer. Constant dans sa vitesse pas facile ! Un peu long. Perte de concentration. Séparer en 2 la 2 ^e phase ?	2	3
13	27	Droite	Droite	Oui	Oui, amateur	Violoncelle	22	Aurait bien voulu réentendre la cible au milieu de la phase 2 (après s'être amusé avec le système). Essayait de savoir si c'était basé sur le départ, la fluidité, la hauteur, etc... Sur tout le geste ou qu'au début ? Un peu long par rapport au fait qu'on n'ait pas de retour entre les phases (pour dire quoi corriger) Cycle de déconcentration évident.	2	3
14	21	Droite	Droite	Oui	Oui, amateur	Guitare	15	Je l'avais assez bien, puis j'étais perdu super longtemps, puis c'est revenu à la fin. Corde qui frotte à cause d'une petite vibration à l'atterrissage. Difficulté à maintenir le bon geste (pas un problème de concentration) Un volume 2db moins fort n'aurait pas posé de problème	3	3

Avez-vous senti des modifications du système durant cette phase de découverte ? Si oui, comment les décririez-vous ?	Avez-vous eu l'impression de maîtriser le système en phase 2 ?	Difficulté de la tâche en phase 2	Avez-vous senti des modifications du système durant la phase 2 ? Si oui, comment les décririez-vous ?	Fatigue physique ressentie	Fatigue auditive ressentie	Qualité du son produit	Vous jugez ce test :
J'ai compris qu'il fallait que je fasse un atterrissage plus lent...peut-être.	3	3	Oui	2	1	1	Trop long
Non. Pas assez de maîtrise pour le dire.	3	4	Oui car mm geste et résultats différents	2	2	3	Trop long
Un peu	3	3	Changement de profil de vitesse. Parfois vitesse constante, parfois démarrage/arrivée rapide/lent. 2 gestes similaires, pas le même résultat.	1	1	1	Trop court
Non	4	3	Non.	1	1	2	De la bonne durée
Non	3	1	Oui : mm gestes et chgt de son	1	1	1	De la bonne durée
Mêmes mvt -> sons différents -> modification du geste attendu	3	3	Non, en tout cas moins flagrant. Surement du à la concentration. Le geste doit : - avoir une vitesse constante du début à la fin - durée importante - la hauteur compte moins que la vitesse	3	1	3	De la bonne durée
Non.	3	2	Oui. phase1+première partie > vitesse constante 2° partie : attaque douce 3° partie : attaque forte ?	1	1	1	De la bonne durée
Oui, ms ça venait plus de moi que du truc	3	3	Rien de flagrant	2	1	4	De la bonne durée
Non.	3	4	Oui. Nécessité d'avoir vitesse plus constante à la fin	1	1	2	De la bonne durée
Dur à dire... Peut-être Modif de la finesse ?	1	4	Se posait des questions Acc puis décélérer ? Vitesse constante ? Ne savait pas si ça venait d'elle ou du système	1	1	3	De la bonne durée
Peut-être un peu sur la fin du geste	2	3	Non. Peut-être au début. Ms sinon assez clair	1	1	3	De la bonne durée
Non.	3	4	Oui. Parfois, plus de mal à exciter le tuyau. Tout le temps dans les choux, jms de moment correct, ne sait pas cmt s'améliorer. Au moins 3 conditions différentes (2 flagrantes)	1	2	2	Trop long
Non.	2	3	Non, je ne crois pas.	1	2	2	Trop long
Non.	3	3	Non. C'est moi qui perdais mon geste.	1	1	2	De la bonne durée

Références

- [1] Frédéric Bevilacqua, Norbert Schnell, and Nicolas Rasamimanana. Online Gesture Analysis and Control of Audio Processing. *Musical Robots and Interactive Multimodal Systems*, 74 :127–142, 2011.
- [2] Steven Gelineck and Stefania Serafin. A Quantitative Evaluation of the Differences between Knobs and Sliders. In *New Interfaces for Musical Expression (NIME 2009)*, 2009.
- [3] Andy Hunt and Ross Kirk. Mapping Strategies for Musical Performance. In Marcelo M. Wanderley and Marc Battier, editors, *Trends in Gestural Control of Music*, pages 231–258. Ircam - Centre Pompidou, 2000.
- [4] IRCAM. Modalys Reference Manual. (Third Edition), 1996.
- [5] IRCAM. Modalys Reference Manual. (Finite element objects), 2003.
- [6] Legos Group. Dossier LEGOS Programme Blanc ANR, 2011.
- [7] D Merrill. Personalization, expressivity, and learnability of an implicit mapping strategy for physical interfaces. *Journal of the CHI Conference on Human*, 2005.
- [8] R Christopher Miall, Ned Jenkinson, and Kunal Kulkarni. Adaptation to rotated visual feedback : a re-examination of motor interference. *Experimental brain research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation cérébrale*, 154(2) :201–10, January 2004.
- [9] Djordje Mitrovic, Stefan Klanke, Rieko Osu, Mitsuo Kawato, and Sethu Vijayakumar. A computational model of limb impedance control based on principles of internal model uncertainty. *PloS one*, 5(10) :e13601, January 2010.
- [10] Sile O’Modhrain. A Framework for the Evaluation of Digital Musical Instruments. *Computer Music Journal*, 35(1) :28–42, 2011.
- [11] Isabelle Pennel, Yann Coello, and Jean-Pierre Orliaguet. Frame of reference and adaptation to directional bias in a video-controlled reaching task. *Ergonomics*, 45(15) :1047–77, December 2002.
- [12] C. Poepel. On interface expressivity : a player-based study. In *Proceedings of the 2005 conference on New Interfaces for Musical Expression*, pages 228–231, 2005.
- [13] Nicolas Rasamimanana, Frédéric Bevilacqua, Norbert Schnell, Emmanuel Fléty, and Bruno Zamborlin. Modular Musical Objects Towards Embodied Control Of Digital Music Real Time Musical Interactions. *Proceedings of the fifth international conference on Tangible, embedded, and embodied interaction*, pages 9–12, 2011.
- [14] Johanna V G Robertson, Thomas Hoellinger, Pål Lindberg, Djamel Bensmail, Sylvain Hanne-ton, and Agnès Roby-Brami. Effect of auditory feedback differs according to side of hemiparesis : a comparative pilot study. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 6 :45, January 2009.
- [15] Stefania Serafin, Matthew Burtner, and Charles Nichols. Expressive controllers for bowed string physical models. *Proceedings of the COST G-6 Conference on Digital Audio Effects (DAFX-01)*, pages 6–9, 2001.
- [16] D. Stowell, a. Robertson, N. Bryan-Kinns, and M.D. Plumbley. Evaluation of live human–computer music-making : Quantitative and qualitative approaches. *International Journal of Human-Computer Studies*, 67(11) :960–975, November 2009.
- [17] Marcelo Mortensen Wanderley and Nicola Orio. Evaluation of Input Devices for Musical Expression : Borrowing Tools from HCI. *Computer Music Journal*, 26(3) :62–76, September 2002.