



Conception, développement et validation expérimentale d'une boussole haptique

Mémoire

Jean-Philippe Choinière

Maîtrise en Génie Mécanique
Maître ès sciences (M.Sc.)

Québec, Canada

© Jean-Philippe Choinière, 2016

Conception, développement et validation expérimentale d'une boussole haptique

Mémoire

Jean-Philippe Choinière

Sous la direction de:

Clément Gosselin, directeur de recherche

Résumé

Ce mémoire présente la conception, le contrôle et la validation expérimentale d'une boussole haptique servant à diriger les utilisateurs aux prises avec une déficience visuelle, et ce, dans tous les environnements. La revue de littérature décrit le besoin pour un guidage haptique et permet de mettre en perspective cette technologie dans le marché actuel. La boussole proposée utilise le principe de couples asymétriques. Son design est basé sur une architecture de moteur à entraînement direct et un contrôle en boucle ouverte étalonné au préalable. Cette conception permet d'atteindre une vaste plage de fréquences pour la rétroaction haptique. Les propriétés mécaniques de l'assemblage sont évaluées. Puis, l'étalonnage des couples permet d'assurer que le contrôle en boucle ouverte produit des couples avec une précision suffisante.

Un premier test avec des utilisateurs a permis d'identifier que les paramètres de fréquence entre 5 et 15 Hz combinés avec des couples au-delà de 40 mNm permettent d'atteindre une efficacité intéressante pour la tâche. L'expérience suivante démontre qu'utiliser une rétroaction haptique proportionnelle à l'erreur d'orientation améliore significativement les performances. Le concept est ensuite éprouvé avec dix-neuf sujets qui doivent se diriger sur un parcours avec l'aide seule de cette boussole haptique. Les résultats montrent que tous les sujets ont réussi à rencontrer tous les objectifs de la route, tout en maintenant des déviations latérales relativement faibles (0.39 m en moyenne). Les performances obtenues et les impressions des utilisateurs sont prometteuses et plaident en faveur de ce dispositif.

Pour terminer, un modèle simplifié du comportement d'un individu pour la tâche d'orientation est développé et démontre l'importance de la personnalisation de l'appareil. Ce modèle est ensuite utilisé pour mettre en valeur la stratégie d'horizon défilant pour le placement de la cible intermédiaire actuelle dans un parcours sur une longue distance.

Abstract

This Master's thesis presents the design, control and experimental validation of a haptic compass, designed as a guiding device for the visually impaired in all environments. The literature review shows that there is a need for haptic guidance and how this technology differs from current haptic devices. The proposed device uses the principle of asymmetric torques. Its design is based on a direct drive motor and a pre-calibrated open-loop control, which allows the generation of stimuli in a wide range of frequencies. The device is calibrated and its mechanical properties are evaluated to ensure that the open-loop control provides sufficient precision.

A first user study presents interesting effectiveness in the frequency range 5 to 15 Hz and for torques over 40 mNm. In a second experiment, the use of a haptic feedback proportional to the angular error is shown to significantly improve the results. An experimental validation by a group of subjects walking with the aid of the portable device in an open environment is then reported. The results show that all participants met all route objectives with small lateral deviations (0.39 m on average). The performances obtained and the user's impressions are favorable and confirm the potential of this device.

Finally, a model of the human orientation task is developed and demonstrates the importance of individual customization. A receding horizon strategy for the placement of the current target on the path is thereby proposed.

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	iv
Table des matières	v
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	viii
Remerciements	xiv
Introduction	1
1 Revue de Littérature	4
1.1 Contexte des utilisateurs	4
1.2 Système sensoriel	5
1.3 Dispositifs Haptiques	10
1.4 Asymétrie	17
1.5 Conclusion	19
2 Conception du prototype	20
2.1 Requis	20
2.2 Composantes mécaniques	21
2.3 Assemblage	24
2.4 Circuit électrique	25
2.5 Systèmes de lecture	27
2.6 Conclusion	29
3 Caractérisation et Étalonnage	31
3.1 Contrôleur	31
3.2 Caractérisation	37
3.3 Conclusion	45
4 Évaluation des stimuli	47
4.1 Éthique expérimentale	47
4.2 Évaluation multivariable	47
4.3 Stimulus Proportionnel	59
4.4 Conclusion	66

5	Expérience d'orientation complète	67
5.1	Montage expérimental	67
5.2	Procédure expérimentale	73
5.3	Conclusion	86
6	Modèle de Marche et d'orientation	87
6.1	Conception du modèle	87
6.2	Validation du modèle	89
6.3	Sensibilité aux paramètres	92
6.4	Planification de trajet	94
6.5	Conclusion	97
	Conclusion	99
	Bibliographie	101

Liste des tableaux

1.1	Propriétés et caractéristiques des capteurs tactiles cutanés	8
2.1	Propriétés d’inertie du prototype (*valeur estimée)	24
4.1	Effet de la pente du pic de couple , δ , sur le taux de succès de la tâche d’orientation et d’identification binaire, les temps de complétion de la tâche et d’hésitation initial ainsi que sur l’évaluation qualitative.	53
4.2	Valeurs moyennes des essais et de sujets pour les critères de succès de la tâche, par type de stimulus.	62
5.1	Critères d’évaluation de la performance pour la marche avec la boussole haptique. Les résultats présentés sont une moyenne parmi tous les essais et les sujets.	77
5.2	Résultats du sondage qualitatif en ligne concernant l’expérience des utilisateurs avec la boussole haptique.	79
6.1	Sensibilité des corridors moyens aux paramètres d’entrée. Moyenne calculée sur $N = 50000$ trajectoires simulées. Les paramètres favorables de référence sont $\varepsilon_f = 0^\circ$, $\varepsilon_r = 25^\circ$, $\delta_s = 0.3$ m. Les autres jeux de paramètres ont pour seule variation la variable indiquée. La colonne (*) montre les résultats pour une simulation utilisant la stratégie d’horizon mobile sur l’objectif.	93

Liste des figures

1.1	Hypothèse de chargement sensoriel typique pour la tâche de marche. Ce graphique compare un utilisateur voyant, un non-voyant utilisant une GPS audio seulement et, finalement, le rééquilibrage sensoriel lorsque ce GPS est couplé audio et haptique. Le sens de l'ouïe est surchargé au-delà de sa capacité maximale avec les GPS audio actuels, comme avancé par Bradley and Dunlop [2002].	6
1.2	Représentation des récepteurs tactiles dans la couche cutanée, tirée de Kortum [2008].	7
1.3	Modèle de sensibilité combinée des différents canaux sensoriels tactiles. Les canaux identifiés comme NP III, NP II, NP I et P sont respectivement correspondants aux types SA-I, SA-II, FA-I et FA-II/PC . Figure tirée de Bolanowski [1988].	9
1.4	Manipulateur haptique Geomagic Touch populaire sur le marché, de la compagnie Geomagic. Il s'agit d'un manipulateur sériel à 6 DDL à l'espace de travail de 160x120x70 mm [Coles et al., 2011], servant entre autres à la modélisation d'objets tridimensionnels grâce à l'interaction haptique en un point par l'extrémité du « stylet ».	12
1.5	Ensemble de vibreurs simple disposés à angles en circonférence du tronc pour diriger un individu, tiré de Heuten et al. [2008].	14
1.6	Appareil de navigation utilisant un tacteur se déplaçant sur la surface du pouce pour transmettre des messages cutanés, tiré de Koslover et al. [2012].	15
2.1	Vue explosée de la boussole haptique en dessin assisté par ordinateur (DAO).	21
2.2	Prise ergonomique typique du dispositif portatif, généralement dans la main dominante.	22
2.3	Plan pour fabrication de la roue d'inertie. Toutes les valeurs sont en millimètres.	23
2.4	Vue de coupe du gabarit de localisation pour le collage de la roue d'inertie à l'arbre du moteur.	26
2.5	Vue de coupe de l'extracteur à vis. Cette assemblage est utilisé pour le démontage du joint collé entre l'arbre du moteur et l'ajustement coulissant de la roue d'inertie.	27
2.6	Schéma des branchements du système. Dans la section de gauche, les ordinateurs calculent le signal tactile à produire et sont alimentés par le réseau mural. À droite, toutes les composantes sont embarquées et transportées sur le sujet pour le transport de signaux analogiques.	28
2.7	Équipement des participants pour l'expérience d'orientation en marche. Le câble est relié au nœud de calcul en temps réel et transmet des consignes digitales seulement. Les marqueurs sur le bandeau à la tête fournissent la position du sujet et la flèche avant de la boussole (vue agrandie) représente la direction de marche.	30
3.1	Schéma de contrôle du prototype. La ligne pointillée indique la rétroaction haptique à l'utilisateur et son comportement de réorientation. Son orientation actuelle est obtenue par le système de caméras.	32

3.2	Illustration conceptuelle de la courbe de couple et ses principaux paramètres.	33
3.3	Échantillon d'étalonnage du signal de couple dans les conditions fixes et prises en main. Les paramètres des signaux haptiques sont f , τ , τ_w et δ	34
3.4	Montage utilisé pour la l'étalonnage, montrant l'installation du couvercle inférieur à la cellule de force. Le reste du prototype s'insère sur le couvercle par une interface de serrage. Les essais sont effectués dans deux conditions de support : fixe (ci-haut) et pris en main (non illustré).	38
3.5	Comparaison entre les couples obtenus par différentes sources. Le couple consigne est comparé au couple mesuré par la cellule de charge, avec et sans filtrage (1 ^{er} ordre à 100 Hz). Le couple mesuré est validé par sa correspondance à l'estimation à partir de l'accélération angulaire du système.	39
3.6	Extrait d'un test d'étalonnage des gains de couple.	42
3.7	Analyse fréquentielle de la réponse des systèmes dispositif-fixe et dispositif-main. . .	43
3.8	Limite sensorielle minimale de la vibration en fonction de la fréquence. Cette limite combine les caractéristiques de sensibilité des différents types de récepteurs tactiles, sur la plage de fréquences. Tiré de Bolanowski [1988].	44
3.9	Lectures des efforts de déséquilibre pour une rotation à vitesse constante. À droite, les forces F_x et F_y représentent les vibrations transversales, alors que le poids est supporté dans l'axe de F_z . M_z correspond à l'axe de rotation du moteur et le couple sert à maintenir la vitesse constante. Le couple autour des autres axes est causé par le déséquilibre des pièces mobiles. La moyenne des valeurs est ramenée à zéro pour le calcul.	46
3.10	La hauteur du déséquilibre h montrée avec le prototype. La source du déséquilibre est partagée entre la roue d'inertie et le rotor du moteur.	46
4.1	Montage expérimental pour la qualification des stimuli. La boussole produit les signaux haptiques et donne une rétroaction sur l'orientation du bouton jusqu'à ce que la direction consigne soit atteinte.	49
4.2	Extraction des critères d'évaluation de la tâche d'orientation à partir du parcours en angle du bouton, représentant l'orientation du sujet. Ici, la consigne d'angle représente un déplacement de 45° vers la droite. Le sujet complète la tâche en environ 2 s. . . .	51
4.3	L'effet de la fréquence des impulsions f sur les taux d'identification binaire et de succès pour la tâche d'orientation. Les autres paramètres sont maintenus à $\tau = 30$, $\delta = 0$ et $\tau_w = \tau/4$	54
4.4	L'effet de la fréquence des impulsions f sur le temps d'hésitation initial et les temps de complétion de la réorientation. Les autres paramètres sont maintenus à $\tau = 30$, $\delta = 0$ et $\tau_w = \tau/4$	54
4.5	L'effet de l'amplitude du couple τ sur le taux d'identification binaire et sur le taux de succès de la tâche d'orientation. Les autres paramètres sont maintenus constants à $f = 1$, $\delta = 0$ et $\tau_w = \tau/4$	55
4.6	L'effet de l'amplitude du couple τ sur le temps d'hésitation initial et les temps de complétion de la réorientation. Les autres paramètres sont maintenus constants à $f = 1$, $\delta = 0$ et $\tau_w = \tau/4$	56
4.7	Évaluation qualitative sur l'utilité de la rétroaction haptique pour s'orientation en fonction de l'amplitude du couple τ . Les autres paramètres sont maintenus constants à $f = 1$, $\delta = 0$ et $\tau_w = \tau/4$	56

4.8	Les trois types de stimuli étant comparés dans l'expérience : constant sans égard à l'erreur d'orientation, positif (calme) et négatif (brûlant). Dans tous les cas, le signal s'arrête complètement lorsque la bonne orientation est rejointe.	61
4.9	Classement des types de signaux par les valeurs moyennes, en indiquant les sous-groupes où les résultats sont confondus. Chaque barre transversale montre que ces sous-ensembles ne présentent pas de différence significative ($p < 0.05$). Le classement est montré pour les taux de succès (dessus) et pour les temps de complétion (dessous) de la tâche.	63
5.1	Schéma des branchements du système incluant les caméras Vicon. Dans la section de gauche, les ordinateurs calculent le signal tactile à produire et sont alimentés par le réseau mural. À droite, toutes les composantes sont embarquées et transportées sur le sujet pour le transport de signaux analogiques.	69
5.2	Technique de déroulement d'angle adaptée à la tâche de réorientation. Tout dépendant d'où le sujet arrive, le passage à une instruction de l'autre côté ne se fait que lorsqu'il dépasse un seuil de 90°	71
5.3	Paramètres et variables utilisés pour modéliser la tâche d'orientation avec la boussole haptique.	72
5.4	Appareillage fourni aux participants pour l'expérience d'orientation. Le câble transmet des informations digitales seulement entre le nœud de calcul en temps réel et la source de puissance. Les marqueurs fixés à la tête sont utilisés pour calculer la position actuelle et la direction pointée par la boussole correspond à l'orientation (vue agrandie au bas).	73
5.5	Courbe typique de résultats avec l'extraction des critères de performance. Courbes de haut en bas : Erreur d'orientation, distance euclidienne jusqu'au point de référence, déviation latérale de la trajectoire rectiligne. Ces tracés permettent de mesurer le délai initial, le temps d'orientation et le temps de mouvement ainsi que de calculer la largeur maximale du corridor.	76
5.6	Vue du dessus de la trajectoire parcourue durant l'expérience, bordée par la dimension maximale du corridor (pointillé rouge). Les dimensions de l'espace de travail sont en mètres. L'utilisateur s'oriente et doit rejoindre le prochain point de repère (étoile). . .	77
5.7	Distribution des déviations latérales maximales, ou corridors, parmi tous les essais et tous les participants. Les valeurs sont en mètres (m).	78
5.8	Temps d'essai brut et le temps de déplacement filtré en fonction de la distance à parcourir durant l'essai.	79
5.9	Prise typique de la boussole haptique et les variantes observées expérimentalement. .	85
6.1	Paramètres et variables utilisés pour modéliser la tâche d'orientation avec la boussole haptique.	89
6.2	Superposition de la trajectoire (sujet 20b) avec les résultats du modèle. L'erreur fixe ϵ_f est paramétrée à 35° , l'erreur aléatoire maximale ϵ_r est de 25° , la longueur des pas est de 0.25 m. Les 5 courbes sont générées aléatoirement par le modèle pour chaque essai successif.	90
6.3	Superposition de la trajectoire (sujet 7) avec les résultats du modèle. L'erreur fixe ϵ_f est paramétrée à 0° , l'erreur aléatoire maximale ϵ_r est de 25° , la longueur des pas est de 0.25 m. Les 5 courbes sont générées aléatoirement par le modèle pour chaque essai successif.	91

6.4	Trajectoire obtenue par Elliott et al. [2010] avec une combinaison d'haptique et visuel, dans un espace de forêt.	95
6.5	Exemple de dépassement local qui n'en est pas un au niveau global. Le sujet passe à côté de la cible intermédiaire numéro 2 : les instructions le font revenir sur ses pas malgré qu'il l'ait dépassée et soit sur le bon chemin.	96
6.6	Résultat de trajectoires avec des points de repère successifs et distanciés. Tiré de Heuten et al. [2008].	96

*Je dédie cet ouvrage à Hélène, Yves
et Cécile, mes parents et mentors
adorés qui m'ont tout donné, car ils
croyaient à la valeur de l'éducation.*

*Et à mon amour, merci pour ta
patience, ton soutien et ton sourire.*

Voir, entendre, toucher, sont des
miracles et chaque partie et chaque
particule de moi-même est un
miracle

Walt Whitman, Feuilles d'herbe

Remerciements

Je tiens à remercier M. Clément Gosselin, qui a su être à la fois un directeur de recherche et un modèle. Toujours disponible pour tout et chacun, généreux de son temps et de sa sagesse, il a su m'inspirer tout au long de la maîtrise.

Je remercie ces professionnels de recherche de qualité qui ont permis l'accomplissement de ce projet de recherche :

Thierry Laliberté pour ses conseils de fabrication,

Simon Foucault pour le travail d'interfaçage des logiciels et le support informatique,

Sylvain Comptois pour son support avec le système de caméras.

Aussi, j'offre un remerciement tout spécial à Bruno Sauvet pour les échanges fructueux sur l'haptique et pour l'aide apportée tout au long du projet.

Chers collègues et amis du Laboratoire de Robotique, nos mille et une activités et nos discussions pleines de passion ont été une vraie joie. Le plaisir que nous avons eu ensemble restera longtemps un fait saillant de ces années passées à Québec.

De tout coeur, merci

Jean-Philippe

Introduction

L'ère du numérique a vu naître de nouveaux moyens de s'orienter dans son environnement, ou navigation. Les cartes sont aujourd'hui numérisées, les boussoles intégrées dans les téléphones et le réseau GPS permet de déterminer son emplacement, partout dans le monde. Ces innovations ont grandement facilité les déplacements quotidiens en calculant des itinéraires et en donnant des instructions en temps réel. Pourtant, ces technologies sont typiquement dépendantes d'une interface visuelle, l'écran, pour interagir avec l'utilisateur, ce qui est problématique pour les utilisateurs présentant des déficiences visuelles.

Dans la dernière décennie, plusieurs projets de recherche se sont penchés sur cette problématique, mettant de l'avant des moyens technologiques. Ces systèmes de navigation piétonne communiquent avec l'utilisateur via un ou de multiples canaux sensoriels : des symboles visuels à l'écran, des alertes audio ou des stimuli tactiles. Or, si les signaux visuels sont inutilisables par cette clientèle pour des raisons évidentes, l'utilisation de signaux auditifs comporte aussi un désavantage majeur : l'interférence avec l'environnement. En effet, les sons externes comme la parole ou les bruits ambiants forts peuvent perturber la compréhension et le transfert d'information [Wilson et al., 2007]. À l'opposé les sons générés par le dispositifs peuvent nuire à la perception des sons externes importants pour la sécurité de l'utilisateur, tels le vrombissement des voitures, les signaux sonores des feux de circulation ou les alertes vocales.

Or, le sens du toucher n'a pas ces désavantages, car il interagit en produisant une force directement sur la peau de l'utilisateur et n'est par conséquent pas sujet aux perturbations de l'environnement. Une intégration multi-sensorielle d'haptique et de visuel ou audition permet en général d'obtenir de bons résultats, puisque l'humain combine les informations efficacement [Koslover et al., 2012]. De façon générale, l'idéal est de répartir la transmission d'information entre les canaux sensoriels, pour distribuer la charge cognitive [Antolini et al., 2011] et éviter de surcharger l'attention requise pour un sens. Un bon exemple de cette situation est le danger qu'encourt un piéton écoutant de la musique et qui porte moins attention à son environnement. Puisque le sens du toucher est généralement le moins sollicité durant la marche, il demeure un canal totalement disponible et favorable pour orienter des marcheurs, spécialement ceux ayant des problèmes visuels.

Ce travail s'intéresse à une technologie reposant sur le sens du toucher, ou haptique, comme interface entre l'ordinateur et l'utilisateur pour la tâche de d'orientation. Ce canal de transmission d'information

permet des gains évidents auprès de la clientèle avec déficiences visuelles. Une technologie facilitant leurs déplacements a immédiatement un impact sur leur autonomie, leur permettant des déplacements plus longs et complexes et surtout dans des endroits inconnus. Les enjeux principaux de tels dispositifs sont la sécurité de l'utilisateur, le caractère intuitif des informations, la facilité de prise en main et la portabilité.

Pour répondre à cette problématique, le domaine de l'haptique est en essor constant, une croissance qui est favorisée par la miniaturisation et la démocratisation de l'électronique. Les mécanismes haptiques les plus courants sont ancrés au sol [Stanney, 2002], [Hayward et al., 2004], utilisent des compresseurs à air encombrants [Romano and Kuchenbecker, 2009] ou impliquent de porter sur soi un appareillage volumineux [Hirose et al., 2001]. Ces systèmes ancrés au sol ou ailleurs sur le corps sont restreints par leur espace atteignable ou des limitations physiques qui les rendent inopérants pour guider une personne dans des environnements étendus. Le défi principal pour la classe d'haptique alternative sans ancrage est de transmettre des signaux à la fois compréhensibles, pertinents et fiables à l'utilisateur. Plusieurs des technologies tactiles proposées utilisent des vibrateurs simples situés sur des points stratégique du corps, comme Heuten et al. [2008] et Elliott et al. [2010].

Une approche qui semble préférable est de produire une sensation tactile et kinesthésique tirant l'utilisateur vers la direction où il devrait aller, ce qui est intuitif à cause de sa grande ressemblance à un modèle mental déjà acquis par l'expérience [Kortum, 2008] : être tiré par la main. Dans cette optique, Amemiya [2009] a proposé des mécanismes haptiques qui utilisent une stratégie de pseudo-attraction asymétrique pour tirer l'utilisateur avec le mouvement de masses internes. Ces dispositifs peuvent guider l'utilisateur dans les 8 directions cardinales, laissant la résolution de la rétroaction à environ 45°. Ces informations sont adaptées à la navigation dans des environnements spécifiques, où des repères ou obstacles physiques peuvent être utilisés comme information de localisation contextuelle, comme un trottoir, une poubelle de rue ou un mur.

Cependant, les plaines, les parcs, les champs ou les stationnements ne fournissent pas ces informations complémentaires requises par ces autres dispositifs haptiques. Pour se déplacer dans de tels endroits, que l'on peut qualifier d'environnements ouverts ou génériques, il faut pouvoir guider l'utilisateur dans une direction précise. Il existe ainsi actuellement un besoin pour les aides à l'orientation dans les environnements ouverts et génériques. De tels outils haptiques sont aussi plus versatiles que leurs contreparties, puisque leur utilisateur peut tout de même se situer avec les points de repère au sol, mais sans en être dépendant. Cette proposition technologique permet ainsi d'augmenter l'autonomie et la liberté des utilisateurs avec déficit visuel, et ce dans tous les milieux de vie.

Dans ce contexte, Sakai et al. [2003] et Winfree et al. [2010] ont proposé des prototypes qui génèrent une sensation de torsion kinesthésique dans la main de l'utilisateur. Or, ceux-ci se heurtent aux limitations de durée d'exposition continue d'un stimulus, propre aux mécanismes sans appui. Cette difficulté est résolue en utilisant l'approche d'oscillation asymétrique pour des torsions, comme le font Antolini et al. [2011], Yano et al. [2003] et Amemiya [2013]. Cette technique consiste à alterner des couples

forts et brefs et un retour à l'équilibre faible et long. Bien que le couple net dans le temps soit nul, les humains perçoivent une sensation directionnelle dans la direction des couples plus forts. Ce phénomène est attribuable aux relations non-linéaires entre le couple réel et le couple perçu [Amemiya, 2009].

Cet ouvrage présente une boussole haptique novatrice qui utilise des couples asymétriques pour aider la clientèle avec des difficultés visuelles à se diriger dans un environnement générique. Le prototype développé utilise un moteur à entraînement direct pour créer une sensation de torsion, ce qui permet d'utiliser des fréquences plus élevées que dans les recherches précédentes. Les objectifs de conception principaux sont la simplicité, la portabilité et le coût abordable, tout en conservant une versatilité appropriée au cadre de recherche. La preuve de concept est validée expérimentalement avec des utilisateurs.

Le mémoire débute par une revue de littérature détaillant le contexte, la nature du sens du toucher, l'évaluation des stimuli et une classification des dispositifs haptiques existants. Ces informations mènent à une conception éclairée du prototype, qui est étalonné pour produire des stimuli en boucle ouverte. Une première expérimentation avec des utilisateurs permet de raffiner la compréhension de l'efficacité des paramètres de la rétroaction tactile, spécifiquement pour la tâche d'orientation. Les intervalles efficaces de signaux alors identifiés sont réutilisés pour évaluer expérimentalement la performance d'un patron de rétroaction proportionnel à l'erreur d'orientation.

Le concept de boussole haptique, utilisant les signaux précédemment qualifiés, est validé par une expérience où des marcheurs parcourent un trajet dans un environnement contrôlé. Les résultats montrent l'efficacité et les performances d'une telle approche. Un modèle de l'orientation d'un marcheur est subséquemment présenté et colle aux résultats expérimentaux. Ce modèle permet d'étudier la sensibilité de la trajectoire à une variété de paramètres ainsi que d'extrapoler les résultats à des scénarios de longues distances.

Chapitre 1

Revue de Littérature

Pour commencer, le contexte actuel des aides au déplacement de la clientèle avec des difficultés visuelles est analysé afin de mieux cerner la problématique. Les bases de l'haptique sont ensuite consolidées avec des notions d'anatomie du système sensoriel ainsi que de psychophysique.

Ensuite, une brève revue des mécanismes haptiques déjà existants permet d'évaluer leurs propriétés par rapport au besoin spécifique de l'orientation à grande échelle. Finalement, le concept retenu, l'oscillation asymétrique, est analysé plus en profondeur.

1.1 Contexte des utilisateurs

Les aides technologiques à la navigation ont pour objectif d'augmenter l'autonomie des personnes avec difficultés visuelles, pour qu'elle s'apparente à celle des voyants qui utiliseraient une carte ou un GPS. Malgré les avancements technologiques récents, beaucoup de travail demeure à accomplir au niveau des interactions humain-ordinateur (Human-Computer Interactions - HCI). Alors qu'une partie de la recherche se concentre sur la fonctionnalité des dispositifs, c'est plutôt leur interaction avec l'humain pour une tâche donnée qui doit être étudiée [Bradley and Dunlop, 2002].

Le marché actuel des outils d'aide aux non-voyants se divise en deux catégories : les aides traditionnelles et les aides technologiques. Les aides traditionnelles à la marche comme les cannes et les compagnons canins sont très adaptées à l'évitement d'obstacles ponctuels et locaux. Elles ne permettent cependant pas d'obtenir les informations de direction dans des endroits inconnus ou d'improviser un itinéraire.

Parmi les aides technologiques, une gamme de produits commerciaux est disponible pour guider les utilisateurs. Des applications pour téléphones mobiles comme BlindSquare¹ et Nearby Explorer² donnent les directions, mais n'utilisent pas d'interface dédiée et spécifique aux aveugles. D'autres ap-

1. <http://blindsquare.com/>, consulté le 6 janvier 2016

2. http://tech.aph.org/neo_info.htm, consulté le 6 janvier 2016

plications commerciales de GPS parlants comme le Kaptan Mobility de Kapsys³, le Trekker Breeze de Humanware⁴, ou le Sense Navigation de Sendero Group LCC⁵ sont des dispositifs dédiés et à l'interface adaptée [National Federation of the Blind USA, 2015]. À la différence des GPS grand public, ils disposent d'interfaces adaptées avec des boutons physiques ou une communication en braille. Ils donnent aussi des détails complémentaires sur l'environnement immédiat, par exemple les commerces et les rues croisées, ce qui augmente la conscience de l'entourage.

Or, l'utilisation de rétroaction auditive avec des écouteurs interfère avec les sons environnants, qui sont pourtant des repères sensoriels cruciaux pour la sécurité [Bradley and Dunlop, 2002]. Dans cette même étude, 50% des répondants affirment que la meilleure façon de présenter les informations est avec une combinaison d'audio et de tactile. Le concept de charge mentale ou sensorielle, proposé par Antolini et al. [2011], permet de représenter à quel point chaque sens est sollicité durant une tâche donnée. Ainsi, une communication sensorielle efficace cherche à répartir la charge sur plusieurs canaux afin d'éviter la saturation sensorielle. Antolini et al. [2011] a proposé une hypothèse de chargement sensoriel pour un utilisateur voyant en situation d'orientation. La Fig.1.1 s'inspire de cette hypothèse pour un utilisateur non-voyant, en s'inspirant des données de la littérature. Il est à noter que cette représentation montre un chargement saturé pour l'ouïe avec un GPS audio seulement, ce qui signifie qu'il y a perte d'information pour l'utilisateur. Or, les indicateurs sonores sont le contact principal avec l'environnement à moyenne portée pour les non-voyants. Donc, soit l'utilisateur s'expose à des risques supplémentaires ou il accepte que les informations vocales ne soient que partiellement comprises, car perturbées par les bruits ambiants.

Dans ce contexte, il est clair que la combinaison d'haptique et audio permet de mieux répondre aux besoins des utilisateurs non-voyants que la solution actuelle, notamment en ce qui a trait à la sécurité et à la fiabilité des informations transmises. Puisque le GPS audio sont déjà disponibles commercialement, cet ouvrage est dédié à l'aspect haptique de la navigation. Aussi, il est important que cette recherche soit menée dans une optique de performance pour cette tâche et en prenant en compte l'ergonomie d'utilisation.

1.2 Système sensoriel

1.2.1 Anatomie et Physiologie

Afin d'interagir efficacement avec l'humain, il est essentiel de considérer ses caractéristiques sensorielles spécifiques. Parmi les cinq sens de l'humain, celui du toucher, ou haptique, a la particularité d'être délocalisé, c'est à dire que le récepteur est réparti sur pratiquement tout le corps (superficie $2m^2$ [Hayward et al., 2004]). La peau contient une batterie de senseurs dédiés regroupés en trois classes : des thermorécepteurs sensibles au froid ou au chaud, des nocicepteurs sensibles à la douleur et des

3. <http://www.kapsys.com/modules/movie/scenes/home/>, consulté le 6 janvier 2016

4. <http://store.humanware.com/hus/trekker-breeze-plus-handheld-talking-gps.html>, consulté le 6 janvier 2016

5. <http://www.senderogroup.com/products/shopvsnav.htm>, consulté le 6 janvier 2016

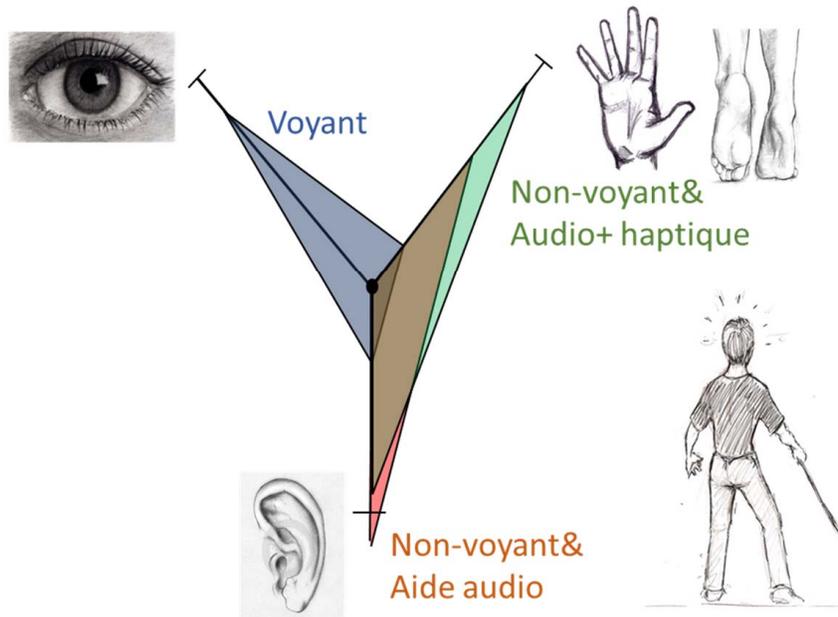


FIGURE 1.1 – Hypothèse de chargement sensoriel typique pour la tâche de marche. Ce graphique compare un utilisateur voyant, un non-voyant utilisant une GPS audio seulement et, finalement, le rééquilibrage sensoriel lorsque ce GPS est couplé audio et haptique. Le sens de l’ouïe est surchargé au-delà de sa capacité maximale avec les GPS audio actuels, comme avancé par Bradley and Dunlop [2002].

mécanorécepteurs sensibles aux efforts mécaniques [Fuchs and Moreau, 2003]. C’est par le biais de cette dernière classe que l’interface haptique transmet des informations.

Ces mécanorécepteurs peuvent à leur tour être divisés en deux catégories :

- Récepteurs extéroceptifs, ou tactiles : Ce sont des récepteurs cutanés et surfaciques, sensibles à l’interaction avec le monde extérieur. L’excitation tactile est liée directement aux récepteurs sous la peau [Fuchs and Moreau, 2003].
- Récepteurs proprioceptifs, ou kinesthésiques : Il s’agit de récepteurs internes qui informent sur l’état de tension, de position et de vitesse des muscles, tendons et autres tissus. L’excitation kinesthésique est liée à des récepteurs situés dans les muscles, les tendons et les articulations. Ce sens nous informe sur la pose et le mouvement, les forces de contact, le poids et la déformation des objets [Fuchs and Moreau, 2003].

L’expérience haptique est une combinaison de ces deux volets, tout dépendant du type de stimulation créée. Pour l’utilisateur, il est difficile de distinguer l’effet des sensations proprioceptives (kinesthésiques) des sensations cutanées (tactiles), puisqu’elles sont typiquement ressenties simultanément [Rose, 2004]. Un mécanisme de retour de forces servira ainsi principalement à reproduire le sens kinesthésique, puisqu’il interagit avec des forces macroscopiques. La simulation tactile est pour sa part plus microscopique et subtile, puisqu’elle doit reproduire des textures, des sensations surfaciques ou des stimulations vibratoires délicates.

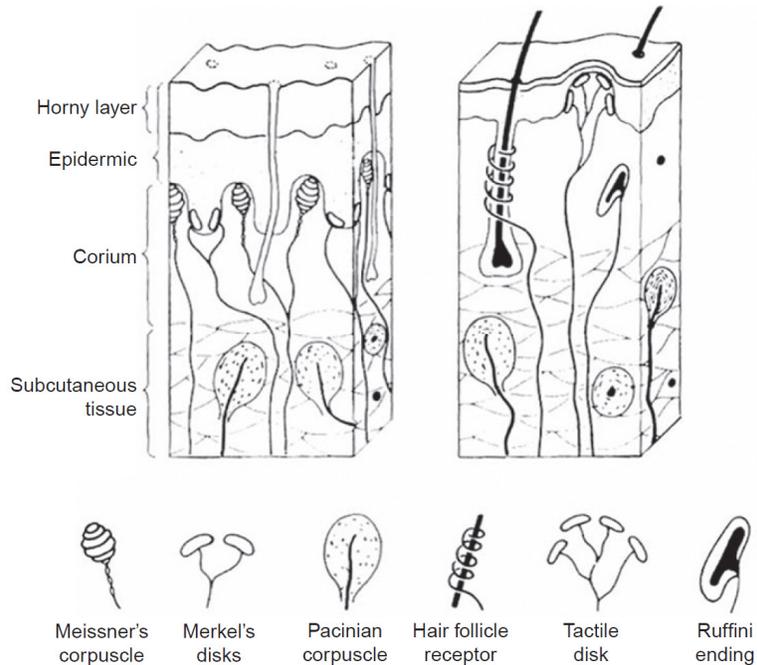


FIGURE 1.2 – Représentation des récepteurs tactiles dans la couche cutanée, tirée de Kortum [2008].

La Fig.1.2 montre l'anatomie des récepteurs tactiles de la peau. Ces récepteurs ont chacun des capacités sensorielles complémentaires, de par leur configuration physique et le type d'axone les reliant au système nerveux central.

Les fibres nerveuses transmettant le signal jouent un rôle dans la fréquence d'envoi d'informations, puisque le cycle de polarisation de l'axone inclut une période réfractaire durant laquelle le nerf ne peut pas envoyer de signal malgré l'arrivée d'une nouvelle stimulation [Tortora and Derrickson, 2008]. Selon le type de « gaine » de la cellule nerveuse, les bandes passantes sont limitées à 250 Hz sans et 1 kHz avec myéline. Cette caractéristique distingue les cellules dites à action lente (Slow Action - SA) de celles à action rapide (Fast Action - FA).

Les différents types de cellules ont des propriétés sensorielles distinctes en termes d'anatomie et de sensations, comme montré dans le Tab.1.1. Ce tableau compile les résultats compilés par Tiwana et al. [2012], Braun et al. [2008] et Bolanowski [1988]. Les plages de fréquence ressenties diffèrent entre les ouvrages, ce qui peut être attribuable à des questions méthodologiques ou au seuil utilisé pour déterminer s'il y a ressenti positif ou non. Bolanowski [1988] illustre un modèle de détection avec la superposition et les sensibilités des canaux sensoriels à la Fig.1.3. La directionnalité des structures sensorielles permet d'identifier simultanément les forces normales et tangentielles [Paré, 2001], donnant l'orientation de la force par rapport à la peau [Cutkosky and Ulmen, 2014].

TABLE 1.1 – Propriétés et caractéristiques des capteurs tactiles cutanés

Caractéristique	Merkel	Ruffini	Meissner	Pacini
Type	SA-I	SA-II	FA-I	FA-II / PC
Adaptabilité	Lente	Lente	Rapide	Rapide
Résolution spatiale du champ réceptif	Défini (3-4 mm)	Diffus (>10 mm)	Défini (3-4 mm)	Diffus (>20 mm)
Réponse à un stimulus $S(t)$	$S, \frac{ds}{dt}$	S	$\frac{ds}{dt}$	$S, \frac{d^2s}{dt^2}$
Sensations	Déformation statique locale, normale	Cisaillement directionnel	Cisaillement, contact et arrêt de contact, vibration de basse fréquence	Vibration délocalisée haute fréquence
Fréquences ressenties (Hz) ⁶	0-30	0-15	10-60	50-1000
Fréquences ressenties (Hz) ⁷	0.3-3	15-400	3-40	400-1000
Fréquences ressenties (Hz) ⁸	0.4-100	15-400	10-100	40-800

1.2.2 Psychophysique

L'anatomie à elle seule n'est pas suffisante pour comprendre les interactions entre l'humain avec son environnement par le biais de ses sens.

La psychophysique est l'étude de la relation entre un stimulus physique et la perception de ce stimulus [Jones and Tan, 2013]. Autrement formulé, alors que les résultats de physiologie sur les cellules sont issus d'un examen physiologique des signaux nerveux, la psychophysique s'intéresse au résultat du jugement perceptuel de l'humain.

Un premier concept est celui de la Seuil différentiel (SD)(Just Noticeable Difference - JnD) [Samur, 2012], [Jones and Tan, 2013]. Il s'agit de l'écart le plus grand entre deux valeurs V d'une propriété (e.g. force/couple/fréquence) sans que l'utilisateur ne puisse les discerner. Ce SD est principalement représentée dans la littérature comme suivant une loi proportionnelle constante (Fraction de Weber). La loi de Feshner, qui suit une expression logarithmique, est moins couramment utilisée. La fraction de Weber est modélisée par une SD qui est une fraction constante k de la valeur V de la propriété, $SD = kV$. Cette fraction est la plus utilisée dans la littérature, en qualité d'approximation simple. La

6. Tiwana et al. [2012]

7. Braun et al. [2008]

8. Bolanowski [1988]

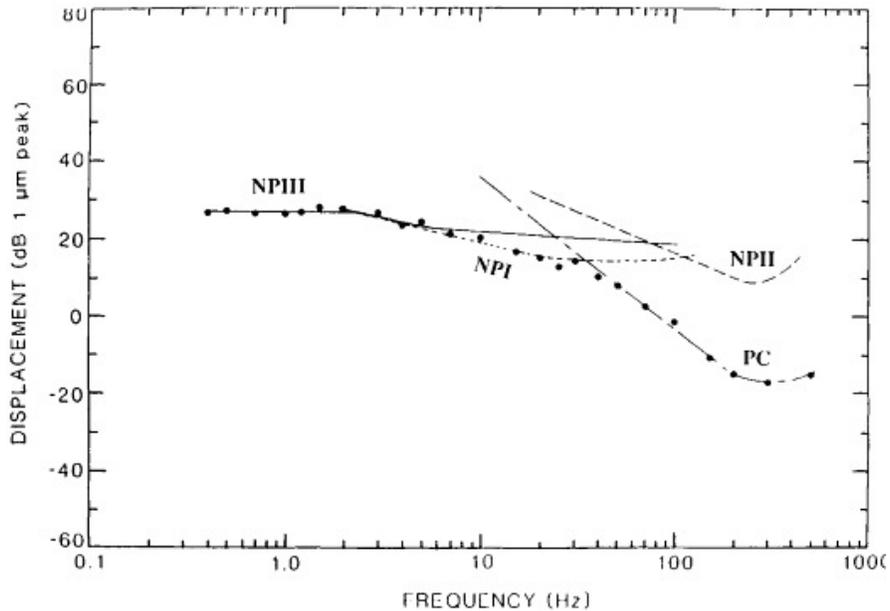


FIGURE 1.3 – Modèle de sensibilité combinée des différents canaux sensoriels tactiles. Les canaux identifiés comme NP III, NP II, NP I et P sont respectivement correspondants aux types SA-I, SA-II, FA-I et FA-II/PC . Figure tirée de Bolanowski [1988].

fraction de Weber peut être en quelque sorte comme la « résolution » du sens, puisqu'elle explique l'amplitude des niveaux perceptibles. Une panoplie d'études montrent que la réalité est bien plus complexe et dépend d'une batterie de facteurs pour l'haptique :

- les interactions multimodales, où plusieurs propriétés sont utilisables simultanément [Streit et al., 2007]
- les stratégies d'exploration utilisées. Il y a une différence notable entre une expérience de sensation passive ou une expérience où l'exploration d'une propriété est active et l'utilisateur peut utiliser des stratégies dynamiques [Debats et al., 2012], [Tavakoli, 2008], [Ross and Brodie, 1987], [Jones and Tan, 2013]
- la position de l'utilisateur, puisque sa force utilisable et sa rigidité systémique sont modifiées [van Beek et al., 2013].
- L'anisotropie sensorielle de la peau dans différentes directions [Tanaka et al., 2001]

Quant à lui, le seuil sensoriel est la plus petite valeur d'une propriété déclenchant une réponse des capteurs somatiques [Samur, 2012], [Jones and Tan, 2013]. Cette valeur est aussi connue sous le nom de seuil absolu, puisqu'il s'agit d'une valeur fixe et nécessaire à la détection. L'étude des limites sensorielles est essentielle, puisque la conception des dispositifs haptiques doit s'y conformer.

La détermination de ces valeurs est basée sur une approche statistique. La valeur des SD et des seuils sensoriels est fixée lors de l'atteinte d'un taux suffisant de détection positive, taux basé sur le type de protocole. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées : la méthode des stimuli constants, la méthode des limites et la méthode de l'ajustement, décrites plus en détail dans Jones and Tan [2013]. Le lecteur

intéressé pourra trouver les valeurs de SD, de seuil sensoriel pour un vaste éventail de propriétés dans les références suivantes : Jones and Tan [2013], Kortum [2008], Samur [2012], Stanney [2002]. Ces propriétés sont à leur tour évaluées grâce à la combinaison des sensations provenant des organes tactiles et kinesthésiques : la détection de force normale, le cisaillement, le glissement, les vibrations, les forces internes des tissus, etc.

L'étude de chaque sens isolé permet d'évaluer les propriétés de ce canal d'information. La psychophysique s'intéresse aussi à l'effet sur un jugement d'une combinaison de signaux provenant de sources sensorielles distinctes. Au-delà des signaux électrochimiques reçus, le cerveau doit être capable d'en extraire une signification. Steinbach et al. [2012] proposent une revue intéressante de la combinaison des sens avec des références vers plusieurs expériences pertinentes. Les informations fournies par chaque canal sensoriel peuvent s'apparenter à des signaux bruités qui doivent être traités et combinés. Lorsque plusieurs sens sont impliqués dans un jugement, le cerveau calcule en quelque sorte une moyenne des valeurs obtenues par les différents capteurs, pondérée par leur fiabilité perçue. Plus d'information sur la théorie du transfert et de l'analyse d'information est disponible dans Jones and Tan [2013].

Cette technique d'optimisation des données pour obtenir un jugement pourrait s'apparenter à celle dans un filtre de Kalman, où chaque donnée est pondérée dans le calcul par sa variabilité. Les ramifications de ces combinaisons sont multiples : amélioration de la précision d'un jugement impliquant plusieurs sens, dominance dans le jugement de certains sens perçus comme plus fiables (comme la vue) sur d'autres, illusions sensorielles lors de signaux contradictoires, recalibration perceptuelle d'un sens dissident, etc.

Par ailleurs, il a été montré que la nature des stimuli utilisés pour accomplir une tâche n'est pas nécessairement le stimulus que le chercheur vise à mettre de l'avant [Jones and Tan, 2013], puisque l'utilisateur combine en fait plusieurs sources d'information. Dans cette optique, il est évident que la performance d'un individu à percevoir un stimulus haptique est différente de sa performance pour accomplir une tâche spécifique en utilisant ce même stimulus [Steinbach et al., 2012]. En d'autres termes, la performance d'un outil haptique comme une boussole n'est pas exclusivement corrélée avec la qualité de la stimulation haptique fournie.

Ces considérations sont primordiales pour la conception d'une boussole haptique. En effet, le but est de transmettre un message compris par l'utilisateur : il faut implanter un jugement correspondant à la réorientation nécessaire. Afin d'atteindre cet objectif, il faut viser dans ce projet à envoyer un message qui aura une signification intuitive et claire. C'est dans cette optique que plusieurs projets de recherche évaluent la combinaison de médiums tels que haptique-auditif [Koslover et al., 2012], haptique-visuel [Elliott et al., 2010], entre autres.

1.3 Dispositifs Haptiques

Pour comprendre le contexte technologique dans lequel s'inscrit le projet, il faut considérer une grande variété de mécanismes commerciaux qui ont comme fonction d'interagir avec le sens du toucher. La méthode de classification et la catégorisation des dispositifs haptiques n'est pas unanime dans la littérature. Celle présentée ici est toutefois couramment utilisée et est généralisable. Une classification des mécanismes haptiques commence au premier niveau par distinguer le type d'appui utilisé pour produire une force, [Kunzler and Runde, 2005], [Stanney, 2002], [Nakamura and Fukui, 2005], [Winfrey et al., 2009]. Chacune de ces catégories se décortique en son propre éventail de technologies et de variantes.

Il y a un consensus général sur les propriétés que doivent avoir les technologies haptiques servant à représenter un environnement virtuel figuratif [Gosselin et al., 2008]. Tout d'abord, le mécanisme doit être transparent, c'est-à-dire que l'utilisateur ne ressent pas l'inertie, les frictions ou autres bruits mécaniques durant l'utilisation. Aussi, les contacts avec l'environnement doivent être nets et précis, ce qui requiert une force admissible suffisante, une rigidité du mécanisme et une bande passante élevée, spécialement pour les objets rigides. L'espace de travail cartésien et en orientation doit être suffisant pour l'application. D'un autre côté, certains outils haptiques n'ont pas comme objectif de représenter des contacts ou des environnements concrets : ils visent à encoder des « messages » haptiques. Leurs requis sont disparates et fortement liées à l'application.

1.3.1 Ancrage Fixe

Les machines haptiques avec ancrage fixe sont les mieux représentées dans le marché spécialisé (excluant vibreurs simples) [Coles et al., 2011]. Elles sont caractérisées par un mécanisme appuyé à une extrémité dans le sol par un lien rigide. Toutes les forces de réaction à la stimulation haptique désirée sont récupérées par cet ancrage. Ainsi, tout manipulateur traditionnel dont la base est fixée peut servir de machine haptique, notamment avec un contrôle en force, en impédance ou en admittance.

Quelques domaines d'application de ces machines incluent la télémanipulation industrielle et en médecine, l'entraînement virtuel en médecine [Coles et al., 2011], la modélisation tridimensionnelle [Liu et al., 2004], l'exploration précise d'environnements virtuels [Kunzler and Runde, 2005] et dans des environnements de micro-assemblage [Boloipion and Regnier, 2013]. Une comparaison des dispositifs haptiques commerciaux est disponible dans Samur [2012], Coles et al. [2011] pour la médecine et Kunzler and Runde [2005] pour les espaces de réalité virtuelle de grande dimension.

À l'instar des manipulateurs dans les autres sphères d'activité, la catégorisation peut se poursuivre en les divisant par type d'architecture (sériel, parallèle, à câbles) et par degrés de liberté.

- Les manipulateurs sériels ont un espace de travail translationnel proportionnel à la longueur de leurs membrures et de grands débattements angulaires. Leur inertie est élevée pour obtenir une rigidité donnée, spécialement à cause des actionneurs distaux, ce qui rend plus complexe la « transparence » du mouvement. La rigidité est une autre propriété importante pour éviter que



FIGURE 1.4 – Manipulateur haptique Geomagic Touch populaire sur le marché, de la compagnie Geomagic. Il s’agit d’un manipulateur sériel à 6 DDL à l’espace de travail de 160x120x70 mm [Coles et al., 2011], servant entre autres à la modélisation d’objets tridimensionnels grâce à l’interaction haptique en un point par l’extrémité du « stylet ».

la flexibilité du manipulateur n’interfère avec le signal haptique désiré. Ces architectures sont actuellement utilisées commercialement, comme le Phantom⁹ montré à la Fig.1.4.

- Les manipulateurs parallèles ont des espaces de travail plus restreints en orientation, ce qui limite leur utilisation dans certaines applications. L’inertie relativement faible des membrures et les actionneurs à la base permettent à la fois une rigidité importante et une meilleure transparence.
- Des mécanismes à câbles sont des options de choix pour atteindre de grands espaces de travail, souvent référés comme de l’haptique à l’échelle de l’humain (« human-scale haptics ») [Dominjon et al., 2007]. La faible inertie des câbles et leur rigidité comparativement à des articulations mécaniques est un avantage dans ces dimensions pour conserver la transparence. En contrepartie, la zone utile est encombrée par les câbles et les débattements en rotation sont limités.
- La lévitation magnétique active est elle aussi utilisée pour reproduire des efforts haptiques, comme utilisé par Tappeiner et al. [2009]. Cette technique permet une reproduction précise des efforts avec une transparence intéressante. Cependant, l’espace de travail est limité à l’ordre du millimètre, puisque les forces d’interaction magnétiques sont fortement dépendantes de la distance entre l’objet manipulé et les électroaimants.

À ces catégories peuvent s’ajouter des machines génératrices de textures [Culbertson et al., 2012], des claviers d’ordinateur à rétroaction active et autres technologies utilisant un ensemble d’actionneurs simples pour générer un patron sensoriel spécifique [Yano et al., 2006], généralement tactile. Se retrouvent aussi dans cette catégorie des interfaces électroniques sur le bureau avec des capacités haptiques ajoutées, comme des souris, des manettes de jeu à manche (« joystick »), balles de suivi (« trackball ») et des boutons actifs [Hayward et al., 2004].

9. <http://www.dentsable.com/haptic-phantom-omni.htm>, consulté le 6 janvier 2016

Pour l'application particulière souhaitée, soit la navigation spatiale dans de grands espaces, ces technologies ne sont pas appropriées puisque leur espace de travail absolu est limité.

1.3.2 Type exosquelettique

Les mécanismes haptiques de type exosquelettique ont comme caractéristique commune d'être harnachés au corps pour produire des efforts. Typiquement, l'ancrage est situé dans une zone proximale moins sensible pour produire des efforts localisés dans une région plus sensible. Ils présentent comme avantage principal d'avoir un espace de travail dont l'origine est mobile avec le corps de l'utilisateur plutôt que contraint par rapport au sol, leur permettant d'accompagner les déplacements et d'avoir un espace de travail absolu techniquement infini. En contrepartie, ces technologies ne peuvent pas produire de forces absolues par rapport à l'utilisateur [Gosselin et al., 2008]. Elles présentent aussi une problématique d'encombrement spatial autour des articulations.

Ces technologies ont comme applications principales la représentation d'objets virtuels et la réadaptation, puisqu'ils peuvent permettre de générer des résistances mécaniques ciblées aux articulations à soigner. Une autre application de ces géométries, sous forme passive, peut servir à mesurer les mouvements articulaires complexes, comme ceux de la main Ma et al. [2014].

Les dispositifs haptiques exosquelettiques peuvent généralement être divisés en deux catégories principales :

- De type kinesthésique : des forces seront générées au niveau des articulations. Un exemple commercial est le Cyber Grasp¹⁰, où un retour de force sur la fermeture des doigts permet de simuler des prises en s'appuyant sur le poignet.
- De type tactile : la stimulation est cutanée seulement et très localisée, faisant une reproduction des sensations surfaciques seulement, comme montré dans Romano et al. [2009].

Ces technologies ne sont pas envisagées pour ce projet puisqu'elles présentent plusieurs problèmes intrinsèques : l'adaptation individuelle à la morphologie de l'utilisateur, une vulnérabilité des mécanismes situés en périphérie des membres et ne pouvant être recouverts de boîtier rigide sans compromettre la portabilité ainsi que l'encombrement.

1.3.3 Sans ancrage externe

Les dispositifs sans ancrages externes permettent de générer des forces sur leur environnement, par le mouvement de masses et mécanismes internes. La littérature s'y réfère aussi comme des mécanismes « ancrés » dans l'inertie de leurs composantes internes. Les vibrateurs utilisés dans les téléphones ou les contrôleurs de jeux vidéos font partie de cette famille et sont largement utilisés dans le marché grand public, bien qu'ils ne représentent qu'une fraction des possibilités offertes par ce type de technologie.

10. <http://www.cyberglovesystems.com/cybergasp/>, consulté le 6 janvier 2016

Les dispositifs sans ancrage ont comme avantage principal leur espace de travail absolu illimité, puisqu'ils peuvent être transportés partout. De plus, puisque le mécanisme est contenu à l'intérieur d'un boîtier, ils ne présentent pas de contraintes particulières pour la robustesse et l'encombrement spatial. En contrepartie, ils ne peuvent pas produire de force nette continue dans une direction donnée. Ils peuvent produire des forces nettes, mais limitées dans le temps, en accélérant une masse interne.

Ces appareils sont classifiés par le type d'interaction haptique produite, tactile ou kinesthésique, puis par le principe d'action technologique.

Tactile

Les interactions tactiles sont généralement utilisées pour exciter une région cutanée précise de la peau, par opposition à une large surface, comme un membre ou une articulation. Dans les interfaces tactiles, on retrouve notamment :

- Les vibrateurs simples à un seul degré de liberté, souvent une masse excentrique en rotation. Cette technologie est omniprésente sur le marché grand public, notamment dans les téléphones et les contrôleurs de jeu vidéo. Ces vibrations peuvent aussi être regroupées en séquences caractéristiques, ou tactons, pour transmettre des messages plus complexes et contextuels [Nukarinen et al., 2012], [Raisamo et al., 2012]. Il est à noter que même si la stimulation s'applique sur une grande région de la main, le ressenti est uniquement au niveau tactile, à cause des faibles amplitudes.
- Des vibrateurs simples dispersés sur le corps, pour qu'une vibration à tel ou tel endroit transmette un message différent. Plusieurs projets de recherche avec cette approche consistent à mettre au point des ceintures sur la circonférence de la taille, comme montré à la Fig.1.5 , par Heuten et al. [2008], Elliott et al. [2010], et Srikulwong and O'Neill [2011].
- Un tacteur étirant la peau localement, tel un bouton ou une surface bougeant à un endroit spécifique comme le bout du doigt pour transmettre des sensations tactiles. Cette approche est utilisée par Luk et al. [2006] et Pasquero et al. [2007] en bordure d'un prototype de téléphone ou par Guinan et al. [2013] et Koslover et al. [2012] (voir Fig.1.6) pour la navigation à l'aide du tactile.

Kinesthésique et tactile

La seconde catégorie de dispositifs haptiques génère des stimuli de nature kinesthésique, misant sur des forces de plus grande amplitude et qui ont un effet sur un membre complet, comme toute la main. De plus, la sensation s'étend au niveau articulaire en faisant bouger le membre dans une direction donnée. Nécessairement, une sensation kinesthésique implique un contact cutané, expliquant que la stimulation affecte les deux canaux sensoriels simultanément.

Un examen plus approfondi de cette classe de dispositifs haptiques permet de les diviser par type de technologie :

- Les prototypes basés sur la gravité, déplacent le centre de masse de l'appareil pour créer une sensation de déséquilibre cartésien [Hemmert et al., 2010] ou en couple [Swindells et al., 2003].

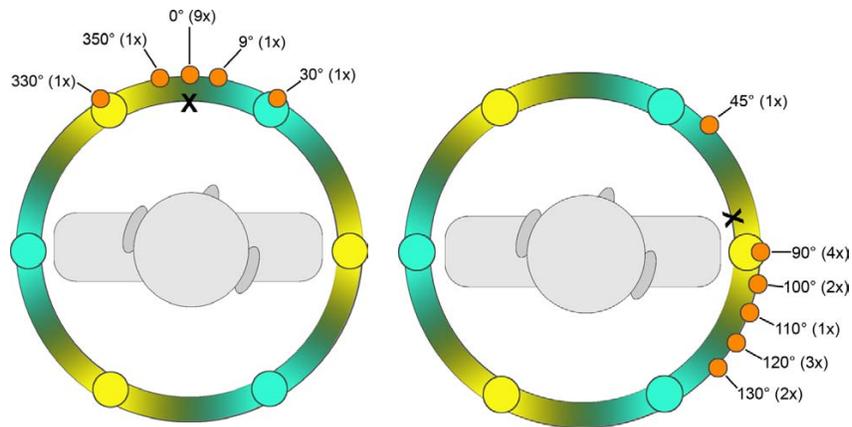


FIGURE 1.5 – Ensemble de vibreurs simple disposés à angles en circonférence du tronc pour diriger un individu, tiré de Heuten et al. [2008].



FIGURE 1.6 – Appareil de navigation utilisant un tacteur se déplaçant sur la surface du pouce pour transmettre des messages cutanés, tiré de Koslover et al. [2012].

Cette technique se veut l'exception, puisqu'elle permet de produire des forces constantes et continues. Cependant, le déplacement interne de masses requiert d'augmenter la taille du prototype, ce qui limite l'applicabilité pratique.

- Des générateurs de couples basés sur l'accélération angulaire de roues d'inertie ont fait l'objet de plusieurs recherches. Alors que certains combinent des couples dans 3 degrés de liberté (DDL) [Tanaka et al., 2001] et étudient les propriétés sensorielles en couple [Sakai et al., 2003], d'autres étudient les possibilités d'augmenter les couples à l'aide du freinage [Ando et al.,

2004]. Ces mécanismes permettent une relative compacité pour l'intégration à d'autres technologies existantes, comme une tablette informatique dans [Badshah et al., 2012].

- Les générateurs de couples basés sur l'effet gyroscopique perturbent un disque d'inertie à haute vitesse, lequel est pivoté par un moteur dans un axe perpendiculaire pour créer un couple résultant à l'utilisateur [Yano et al., 2003]. L'avantage principal de cette technique est l'amplitude de couple pouvant être généré [Winfree et al., 2009]. La transparence du dispositif est une autre problématique liée, puisque tout mouvement angulaire produit une réaction gyroscopique parasite. Pour la résoudre, une approche est d'utiliser un contrôle actif [Winfree et al., 2010] ou alors deux disques miroir tournant en direction opposée [Antolini et al., 2011].
- Des générateurs d'efforts accélèrent une masse linéairement [Amemiya et al., 2007] en un ou plusieurs DDL [Gosselin et al., 2013], [Pedemonte et al., 2014] afin de faire ressentir une force nette à l'utilisateur durant une brève période. Le mode de génération haptique utilise alors souvent la technique d'asymétrie décrite dans la section 1.4. Plusieurs projets cherchant à miniaturiser ces technologies ont été proposés, notamment par Yoshimoto et al. [2012] et Yang et al. [2011].

1.3.4 Concept haptique retenu

La catégorie de dispositifs haptiques sans ancrage externe a été explorée plus en profondeur dans le cadre de cette recherche, puisque ses caractéristiques sont cohérentes avec le besoin. Dans un premier temps, elle offre un espace de travail virtuellement illimité, ce qui est un requis essentiel pour se déplacer dans une ville ou un autre milieu vaste. De plus, l'encombrement de ces mécanismes est inférieur à celui de l'approche exosquelettique, en plus d'offrir une forme intégrée dans un boîtier et facile à transporter.

Les technologies sans appui sont tout à fait appropriées pour l'application de navigation dans des grands espaces, grâce à leur portabilité, leur espace de travail virtuellement infini et de leur faible niveau d'encombrement. De plus, les désavantages potentiels de cette technologie sont minimes, puisque l'application ne requiert pas nécessairement la production de forces directionnelles continues.

Parmi les concepts haptiques sans ancrage, la classe des dispositifs stimulant le tactile seulement présente une limitation en termes de qualité et de versatilité des sensations haptiques. En effet, une excitation à la fois kinesthésique et tactile est vraisemblablement plus intuitive, puisqu'elle s'apparente davantage aux interactions antérieures des utilisateurs avec des objets réels.

Dans ce même ordre d'idées, il est notoire que l'humain est capable de se représenter le monde avec un modèle virtuel acquis par l'expérience. Par exemple, lors de la prise d'une tasse de café avec la main, les mouvements sont pré-calculés par la compréhension intrinsèque des propriétés de l'objet. Ainsi, l'assimilation de nouvelles réalités est d'autant plus facile et intuitive que celles-ci sont similaires à une expérience précédente. En ergonomie fonctionnelle, les interfaces machine-humain doivent s'assurer que l'utilisateur peut aisément se créer une représentation mentale des processus. La façon dont la

machine et le système fonctionnent doit donc correspondre à la représentation mentale que s'en fait l'utilisateur [Kortum, 2008].

Pour la réorientation, un modèle déjà ancré est d'être tiré par la main dans la direction où aller, comme une mère tire son enfant par la main [Amemiya et al., 2007]. En termes conceptuels, cette interaction familière est reliée à une stimulation du système kinesthésique, où l'ensemble de la main est tirée. Cette rétroaction kinesthésique serait donc plus similaire à des expériences antérieures de l'utilisateur, comparativement à un message codifié. Un exemple de ces messages codifiés est d'un train de vibrations simples ou la vibration au niveau de l'abdomen de Elliott et al. [2010]. On peut ainsi poser l'hypothèse qu'un système haptique tirant son utilisateur par la main dans la direction où aller sera intuitif, puisque l'utilisateur comprend déjà intrinsèquement ce que la machine veut lui dire.

Pour ces raisons, une prémisses de la conception de cette boussole haptique est qu'un signal haptique kinesthésique tirant l'utilisateur par la main dans la direction où il doit se diriger est une forme de stimulus à la fois intuitive et efficace pour la tâche d'orientation.

1.4 Asymétrie

À partir de ce constat sur le type d'interaction et de technologies les mieux adaptées au besoin pour la tâche d'orientation, il est important de définir les détails de la stimulation souhaitée. Or, si le type de technologie utilisé définit les rendus haptiques potentiels, il est primordial de tirer pleinement profit des capacités offertes par l'haptique sans ancrage.

Or, de par son principe de déplacement de masses internes, l'haptique sans ancrage ne peut pas produire de forces continues dans une direction donnée. Cette limitation ne permet donc pas de tirer constamment l'utilisateur dans la direction souhaitée. Le concept d'asymétrie a pour objectif de contourner cette difficulté en exploitant les limitations du sens tactile humain.

La technique de stimulus asymétrique a d'abord été proposée par Amemiya et al. [2008]. Cette méthode consiste à alterner une stimulation de haute amplitude dans la direction souhaitée avec un retour à l'équilibre de l'inertie interne à faible amplitude. Afin que seule la direction désirée soit interprétée par l'utilisateur, cette phase de retour (« wash out ») exploite les défaillances sensorielles haptiques. Dans un premier temps, il faut savoir que la réponse physiologique a une relation non-linéaire avec le stimulus l'engendrant. Un exemple de cette discontinuité est l'existence du seuil sensoriel, ou excitation minimale requise pour la détection. À l'opposé du spectre des forces, la capacité sensorielle est saturée à partir d'un certain seuil maximal [O'Malley and Goldfarb, 2002].

Donc, si l'état d'équilibre est rejoint entre chaque excitation asymétrique, le système haptique peut générer une stimulation kinesthésique virtuellement « unidirectionnelle » en régime continu. Un tel retour à l'équilibre est utilisé en robotique pour faire un retour discret à une configuration optimale ou préférentielle par l'ajout d'une commande de basse fréquence dans la boucle de contrôle [Gosselin et al., 2013].

L'approche asymétrique est ponctuée de plusieurs développements ultérieurs, notamment :

- lorsque orienté vers le sol, elle augmente la perception de poids d'un objet [Amemiya and Maeda, 2008],
- un assemblage (2DDL) de ces dispositifs disposés perpendiculairement dans le plan du sol [Amemiya and Sugiyama, 2009] permet de reproduire une perception en 8 points cardinaux,
- de nouveaux systèmes mécaniques permettent de réduire la taille et les bruits mécaniques [Amemiya, 2009],
- une conception d'un tel mécanisme en utilisant des impacts pour l'excitation à haute amplitude peut avoir une certaine efficacité [Shima and Takemura, 2012], [Hamaguchi et al., 2010],
- des mécanismes parallèles plans permettent de générer des excitations asymétriques en 2DDL [Pedemonte et al., 2014],
- des roues d'inertie et l'effet gyroscopique peuvent être utilisés en mode asymétrique avec succès pour créer des couples [Antolini et al., 2011],
- une accélération angulaire directe d'une roue d'inertie permet de générer des couples asymétriques avec succès [Amemiya, 2013].

Ces deux dernières recherches sont d'un intérêt particulier, puisqu'elles permettent de générer des couples kinesthésiques directionnels en continu. Ce type de signal correspond à la stimulation presentielle comme à la fois intuitive et efficace pour réorienter une personne.

L'intérêt d'opter pour une rétroaction en couple plutôt qu'une traction linéaire est d'augmenter la précision de l'orientation. Pedemonte et al. [2014], avec un mécanisme qui tire les participants dans une direction arbitraire du plan, a en effet montré que l'erreur moyenne entre l'orientation ressentie par les participants et l'orientation des stimuli est de 18.3° . Aussi, la plus petite différence d'angle perçue (SD) par rapport à une référence est de 10.1° en moyenne, et de 3.75 à 4° pour les utilisateurs les plus habiles.

Or, ces performances moyennes sont insuffisantes pour permettre à un utilisateur non-voyant de se déplacer en terrain accidenté où la précision est importante. Puisque cette limitation a pour origine la sensibilité de l'humain à l'orientation de ces forces linéaires, une rétroaction utilisant des couples permettrait de changer de paradigme pour améliorer la précision. De plus, l'utilisation d'une stimulation en rotation s'agence aisément avec le modèle mental de la boussole, qui donne des consignes d'orientation autour de l'axe perpendiculaire à la paume.

Par ailleurs, les instructions typiques d'orientation étant la réorientation à gauche ou à droite, il est raisonnable de penser qu'une présentation de couple vers la gauche ou la droite est intuitive. Ces signaux de couple, présentés en continu jusqu'à l'atteinte de l'objectif, pourraient ainsi produire de meilleures précisions d'orientation que l'approche de traction linéaire.

Ce concept de production de couples asymétriques a déjà été étudié avec les paramètres suivants : des couples entre 3.7 et 59.4 mNm à des fréquences entre 1 et 3 Hz dans Antolini et al. [2011] par

rapport à des couples de 100 à 200 mNm et des fréquences potentielles estimées à moins de 2 Hz dans Amemiya [2013].

Or, ces couples utilisés précédemment sont envoyés à basse fréquence, ce qui est discordant avec l'idée que la stimulation paraisse être continue malgré l'oscillation. Une particularité des travaux de ce mémoire est l'utilisation d'une autre gamme de fréquences. De plus, à la différence des travaux de Antolini et al. [2011] et de Amemiya [2013], cette recherche évalue la performance pour la tâche plutôt que l'évaluation seule de la détection de direction du stimulus.

Finalement, l'approche d'évaluation utilisée dans cette recherche est basée d'une part sur l'identification correcte de la sensation et d'autre part sur l'efficacité pour remplir la tâche spécifique d'orientation. Les critères de qualité de la sensation tactile fournie et de l'efficacité de cette sensation pour compléter avec succès une tâche spécifique sont tous deux distincts. Dans cette recherche, cette capacité de réorientation est évaluée sur la base de critères quantitatifs reflétant directement l'atteinte de l'objectif, soit d'aider les utilisateurs avec troubles visuels à s'orienter.

1.5 Conclusion

Ce chapitre a montré le besoin actuel de rétroaction haptique pour la clientèle avec des difficultés visuelles. Les notions d'haptique et de psychophysique permettent d'adapter le mécanisme aux caractéristiques tactiles et kinesthésiques des utilisateurs. Il est proposé qu'une stimulation de type kinesthésique qui tire l'utilisateur par la main vers la gauche ou la droite est intuitive, car elle correspond à des modèles mentaux préexistants.

Un survol du marché actuel des dispositifs haptiques a permis de d'identifier le type de mécanisme sans ancrage externe comme adapté au besoin. Finalement, le concept d'oscillations asymétriques est retenu et analysé plus en profondeur, afin de cibler un créneau encore inexploré et vraisemblablement efficace pour la tâche d'orientation.

Chapitre 2

Conception du prototype

À partir de requis de conception déduits de la littérature, des composantes mécaniques sont choisies et conçues. La méthode d'assemblage est optimisée pour respecter les contraintes mécaniques et favoriser la compacité. Les circuits logiques et la distribution de puissance sont eux aussi détaillés, autant pour l'actionneur que pour les systèmes d'acquisition des résultats.

2.1 Requis

Au chapitre précédent, il est expliqué que la génération d'un couple kinesthésique et asymétrique permettrait de guider l'utilisateur de manière intuitive, grâce à sa similitude avec la sensation naturelle d'être tiré par la main. Une telle stimulation est pressentie efficace pour améliorer la précision de la réorientation par rapport aux tractions dans le plan rapportées entre autres par Pedemonte et al. [2014].

La conception d'un prototype expérimental est nécessaire pour en démontrer la fonctionnalité et tester les hypothèses sur les performances de ces couples asymétriques. Les requis de design sont donc choisis en vue d'être aussi près que possible d'une solution applicable sur le terrain, tout en conservant une certaine latitude nécessaire à la recherche :

1. Capacité haptique : Le dispositif doit avoir la capacité de générer des stimuli haptiques directionnels. Le prototype doit avoir la capacité de produire des plages de fréquence de 0 – 20 Hz et des couples entre 0 – 100 mNm, [Amemiya, 2013], [Antolini et al., 2011], [Yano et al., 2003]. Ces spécifications dirigent notamment le choix de l'actionneur et du contrôleur.
2. Clarté : Pour que le signal soit clair pour l'utilisateur, une attention particulière doit être portée aux bruits haptiques transversaux. Par exemple, Amemiya [2013] note que l'utilisation d'engrenages ajoute des vibrations parasites ; Amemiya and Maeda [2008] montre que l'effet inertiel des membrures mobiles bougeant dans d'autres directions nuit à la clarté et Winfree et al. [2010] utilise des roues d'inertie à haute vitesse qui causent des efforts gyroscopiques latéraux. Ce critère a un impact sur le type de mécanisme choisi, mettant de l'avant un moteur à entraînement direct. De plus, la chaîne de commande doit avoir un temps de réponse rapide ≤ 50 ms [Stanney,

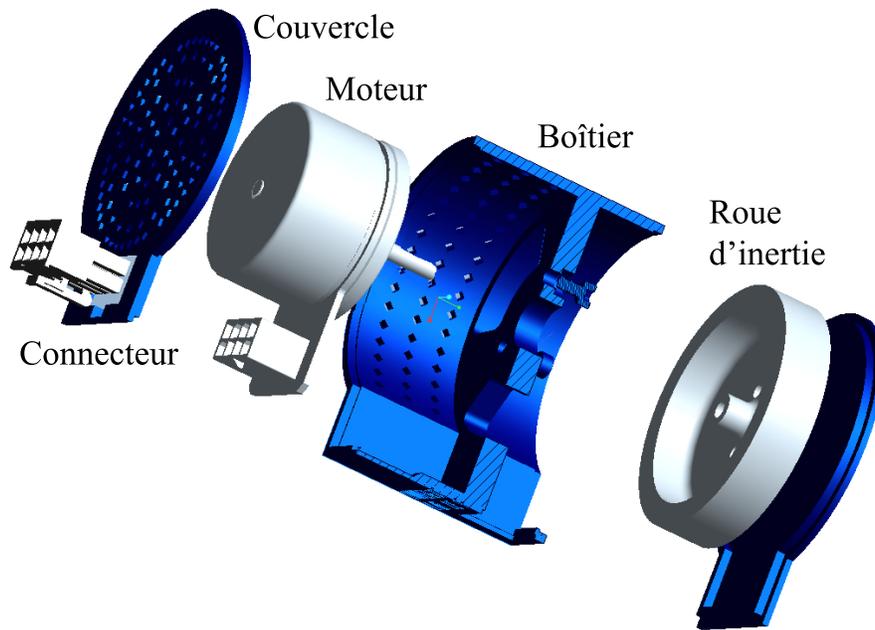


FIGURE 2.1 – Vue explosée de la boussole haptique en dessin assisté par ordinateur (DAO).

2002], soit bien en deçà du seuil de perception humaine.

3. Ergonomie et portabilité : Dans un contexte d'utilisation de longue durée, le confort de l'utilisateur est primordial. Le poids doit être minimisé pour éviter la fatigue musculaire. La masse totale peut être divisée en deux catégories : la masse active, qui est définie par la capacité haptique, par opposition à la masse passive, dont le boîtier est un bon exemple. Dans un système dynamique main-prototype, il est clair que le ratio entre les propriétés de masse active et passive ont un impact sur les déplacements à l'interface de la peau et des senseurs tactiles, comme le suggère Yoshimoto et al. [2012]. Le design extérieur doit aussi offrir une prise ergonomique.
4. Polyvalence : À des fins de recherche, le dispositif doit être capable de produire une grande plage d'efforts et de fréquences dans des séquences variées. Comme la recherche inclut une partie d'étude des stimuli efficaces, les plages de rendu haptique atteignables sont élargies et la durée d'exposition des couples continus peut être prolongée jusqu'à 0.5 s. Aussi, le prototype doit être démontable et modifiable.

La boussole haptique développée dans cette recherche est présentée à la Fig.2.1. Elle est généralement prise dans la main dominante comme montré à la Fig.2.2.

2.2 Composantes mécaniques

L'actionneur sélectionné est un moteur électrique sans transmission à rotor externe, le Maxon EC 45 Flat 70W.

Les caractéristiques d'un moteur à entraînement direct sont en synergie avec les requis sous plusieurs



FIGURE 2.2 – Prise ergonomique typique du dispositif portable, généralement dans la main dominante.

aspects :

- Le rotor externe maximise l'inertie embarquée et participe directement à la masse active en rotation dans l'axe d'excitation,
- Il n'y a pas de pièces de transfert de puissance pouvant causer des bruits tactiles [Amemiya, 2013],
- Le format est compact, comparativement à des concepts utilisant l'effet gyroscopique,
- La relation entre le couple et le courant est proportionnelle, permettant un contrôle en boucle ouverte après l'étalonnage,
- En général, un moteur électrique à rotor externe a une meilleure densité de couple, comparativement à un rotor interne,
- La qualité de l'équilibrage du rotor du moteur est importante pour conserver les vibrations de rotation sous le seuil sensoriel, comme expliqué dans le chapitre d'étalonnage,
- Des capteurs à effet Hall intégrés fournissent une lecture de la position avec une résolution de 48 comptes par tour.

Pour les mécanismes haptiques sans appui fixe, les efforts ressentis sont générés à partir de la force de réaction à une masse interne accélérée. La production d'efforts soutenus sur une période allongée est un défi propre à ce type de dispositif.

Pour assurer une polyvalence suffisante dans les stimulus générés, le critère de design est la production d'un couple directionnel de 100 mNm durant au moins 0.5 s. La fonction de couple τ peut être produite par le moteur Maxon, mais sa durée maximale t_{max} est limitée par la vitesse de rotation mécanique maximale, ω_{max} . La vitesse initiale ω_0 est typiquement nulle pour la rétroaction asymétrique.

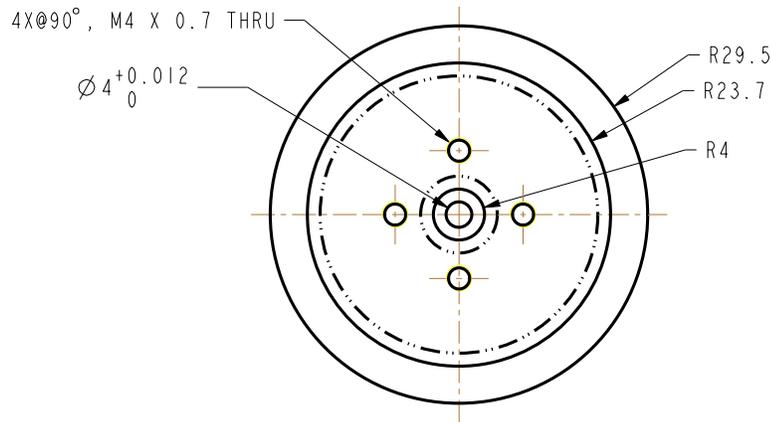
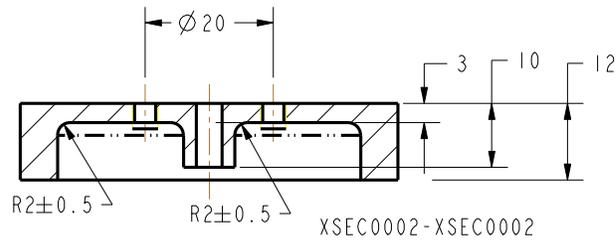


FIGURE 2.3 – Plan pour fabrication de la roue d’inertie. Toutes les valeurs sont en millimètres.

Effectivement, si l’inertie des parties mobiles autour de l’axe d’actionnement (ou inertie active) est notée J_a , la relation est donnée par

$$\omega_{max} - \omega_0 = \int_0^{t_{max}} \frac{\tau}{J_a} dt. \quad (2.1)$$

Puisque l’inertie du rotor n’est pas suffisante à elle seule, une roue d’inertie a été conçue pour maximiser l’inertie du système en minimisant la masse totale. Cette pièce dépend de contraintes dimensionnelles de diamètre extérieur (59 mm) et de hauteur (10 mm) ainsi que de restrictions dues à l’usinage conventionnel. Ainsi, si le concept original était de mettre des bras de transmission entre le moyeu central et la membrane externe, l’équipement d’usinage disponible ne permettait que de mettre une membrane uniforme d’épaisseur minimale de 3 mm. Aussi, la conception est telle que le procédé de fabrication comprend une seule opération sur un tour. Cette précaution permet d’obtenir un balancement supérieur en évitant les erreurs de positionnement lors du changement de machine-outil. Idéalement, le débalancement doit être inférieur à environ 0.05 gmm, comme discuté dans le chapitre de l’étalonnage.

Les paramètres de distribution de masse proposés à la Fig.2.3 permettent que le poids total du prototype soit d’environ 325 g, tout en optimisant l’inertie rotationnelle de la masse active.

Pour l’ergonomie, le poids total visé se situe dans les environs de 300 g. Le diamètre extérieur pour la prise est fixé à 65 mm. Cette valeur est la médiane de popularité d’un test auprès d’un échantillon de 12 personnes à qui l’on a demandé de choisir leur préféré parmi 5 disques de carton de différentes grosseurs. La hauteur est de 52.7 mm et la protubérance avant mesure 8.5 mm.

Par ailleurs, le boîtier et les couvercles ont été fabriqués en plastique ABS par prototypage rapide, puisque les propriétés mécaniques requises le permettent et que cette technologie accélère le cycle de développement. Le couvercle et la partie supérieure du boîtier sont parsemés d’une mosaïque d’ouvertures pour l’évacuation de chaleur éventuelle du moteur. La température n’a pas monté de manière notable au cours de l’ensemble des expérimentations. Les ouvertures sont également conçues pour être le plus petites possible pour ne pas nuire à la rigidité de la prise en main. Leur design est adapté en forme et taille à l’imprimante 3D, pour que tout soit produit sans ajout de matière de soutien, qu’il aurait fallu extraire manuellement par la suite.

Il est intéressant d’évaluer les propriétés de masse et d’inertie autour de l’axe actionné de l’assemblage. Le Tab.2.1 montre une estimation des propriétés de masse, de laquelle on peut tirer le ratio de masse active m_a et de l’inertie active J_a par rapport à la masse totale m_t et inertie totale J_t passive. Les ratios à maximiser, en (%) dans la Tab.2.1 correspondent respectivement à $(\frac{m_a}{m_t})$ et $(\frac{J_a}{J_t})$ et

TABLE 2.1 – Propriétés d’inertie du prototype (*valeur estimée)

Pièce	Masse (g)	Inertie de rotation ($10^4 gmm^2$)
Boîtier	50.5	4.58
Rotor du moteur	92.8 *	1.81
Stator du moteur	48.2 *	2.21 *
Roue d’inertie	134.2	7.70
Masse m_a et inertie J_a actives	227 (69.7 %) *	9.51 (58.3 %) *
Masse m_t et inertie J_t totales	325.7	16.3

2.3 Assemblage

La construction du prototype est réalisée à l’aide d’une stratégie d’assemblage. Chaque opération est optimisée contextuellement pour réduire la masse totale sans sacrifier la résistance.

Les couvercles supérieurs et inférieurs sont assemblés au corps du boîtier par un ajustement en interférence à la main. Un test de serrage préliminaire avait permis de valider expérimentalement les paramètres de serrage fonctionnels, sans devoir effectuer un calcul complexe de serrage lors du refroidissement et de flexibilité du plastique ABS. Une petite ouverture recouverte d’un couvercle est pratiquée à l’avant, pour permettre d’ouvrir les couvercles s’ils se coinçaient.

Le moteur est assemblé sur le boîtier par des vis dont la tête est cachée dans le plastique.

2.3.1 Assemblage de la roue d'inertie

Pour la fixation de la roue d'inertie à l'arbre du moteur, plusieurs concepts ont été étudiés en détail selon l'usage planifié :

- Compte tenu du chargement rapide et alternatif, des vis de pression serrant l'arbre risqueraient de lâcher prise graduellement avec l'usage, puisque l'arbre n'a pas de face plate.
- Un système de manchon conique fendu pourrait effectuer un bon serrage et rencontrer les requis. Cependant, ce concept n'est pas retenu à cause de la complexité de mise en œuvre, incluant une conception de plusieurs pièces sur mesure.
- La solution du collage a été retenue puisqu'elle permet une adhésion fonctionnelle et permanente. Pour permettre le démontage et la maintenance du dispositif, un système d'extraction de la roue d'inertie a été conçu.
- Pour éviter que les vibrations parasites soient ressenties, la précision d'alignement requise doit idéalement être inférieure à $2.66\ \mu\text{m}$. L'ajustement ne permet pas de garantir l'atteinte de cette spécification. Il est cependant nécessaire que le jeu soit coulissant, puisque l'utilisation d'un jeu serré risquerait d'endommager le moteur durant l'assemblage. Plus de détails sur le balancement se trouvent dans le chapitre de Caractérisation du prototype.

Parmi une dizaine de colles calculées, la colle Loctite 222 permet de supporter le cisaillement d'un couple de 128 mNm (maximum du moteur) avec un facteur de sécurité (FS) de 1.22. Cette colle peu solide permet d'extraire la roue avec une force axiale de 314 N, ce qui permet d'utiliser une vis de 10 mm comme levier. Un essai de collage a été effectué après une période de prise de la colle d'environ 72 h a démontré que le couple supporté avant rupture d'élève à 436 mNm, soit amplement pour les charges. La différence entre le chargement accepté théorique et expérimental peut s'expliquer par une dizaine de facteurs de correction pris en compte dans le calcul des facteurs de sécurité, tel que décrit dans Henkel Corporation [2013].

Le concept d'extracteur, présenté à la Fig.2.5 a été testé dans un second essai et est fonctionnel. Le jeu entre la roue d'inertie et le boîtier de la boussole sont serrés ($\leq 1\ \text{mm}$), ce qui requiert un gabarit d'assemblage pour le collage. Un couvercle dont l'épaisseur est ajustée pour localiser précisément la roue d'inertie a été développé à cette fin. Le schéma d'assemblage est illustré à la Fig.2.4.

2.4 Circuit électrique

Les composantes électriques sont branchées selon le schéma montré à la Fig.2.6.

Le moteur est alimenté en triphasé par le contrôleur de puissance Gold Solo Whistle G-SOLWHI9/200EE de la compagnie Elmo motion. Cette alimentation a été retenue pour son haut ratio de puissance par rapport à son poids, ce qui est idéal pour la portabilité du système. Ce contrôleur permet un asservissement à haute fréquence des boucles de courant envoyé au moteur. Une panoplie de protections logicielles sont disponibles pour protéger le moteur des vitesses, courants ou tensions excessifs.

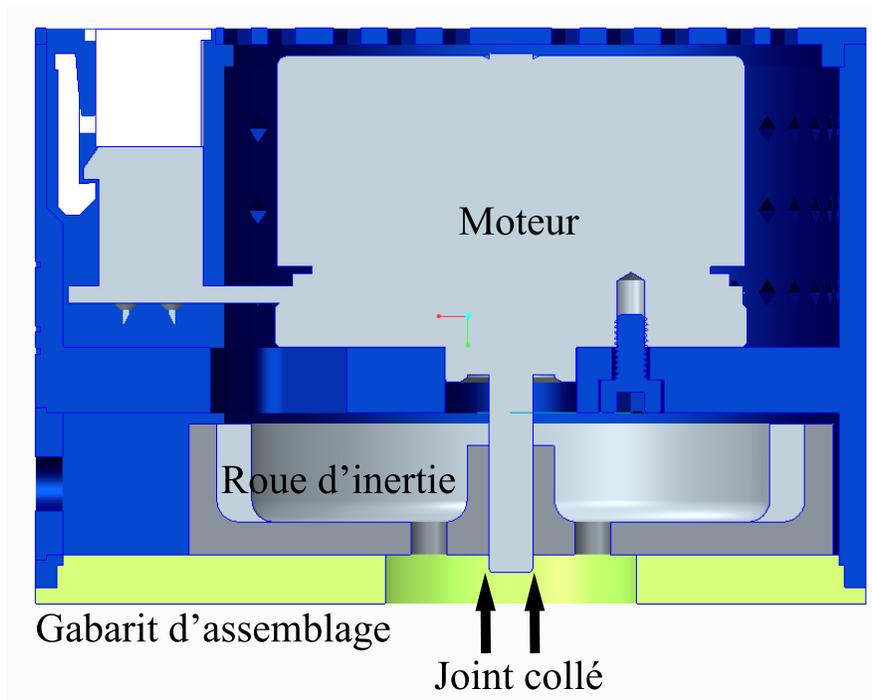


FIGURE 2.4 – Vue de coupe du gabarit de localisation pour le collage de la roue d’inertie à l’arbre du moteur. .

Le contrôleur en temps réel choisi est une station de calcul dédiée dans l’environnement QNX. Cette option est privilégiée pour sa disponibilité au Laboratoire de Robotique et sa simplicité de prise en charge compte tenu de l’expertise locale. Le code est développé dans l’environnement de développement de Matlab graphique, Simulink, et utilise le module Opal-RT. L’ordinateur de contrôle exécute un programme sur RT-Lab 10.7 à une fréquence de 1 kHz. Les consignes sont envoyées par le nœud de calcul en temps réel RT-Lab avec un module de communication EtherCAT.

La source de courant est externe dans les tests sans déplacements de l’utilisateur, de modèle Topward 6306D, choisie pour sa disponibilité. Le courant requis en opération est mesuré sur la source Topward à 210 mA en moyenne. Pour les tests de navigation où l’utilisateur doit déambuler, l’énergie est stockée dans deux batteries Panasonic LC-R123R4P de 12 V branchées en série. Les batteries qui alimentent l’actionneur permettant une autonomie d’environ 5 h à la température de la pièce. Le contrôleur temps réel, pour sa part, est alimenté directement sur le réseau du bâtiment.

Puisque la source Topward ne peut que fournir du courant et ne peut pas en recevoir, le circuit d’alimentation est modifié. L’ajout d’un condensateur de grande capacité (48 mF) et d’un circuit de résistances de puissance (250 Ω , 20 W) en parallèle permettent d’accepter les hausses de tension créées par le freinage actif et de dissiper cette énergie par la suite. Ce circuit de régulation n’est pas nécessaire avec les batteries comme source, puisqu’elles sont capables d’absorber directement l’énergie du freinage.

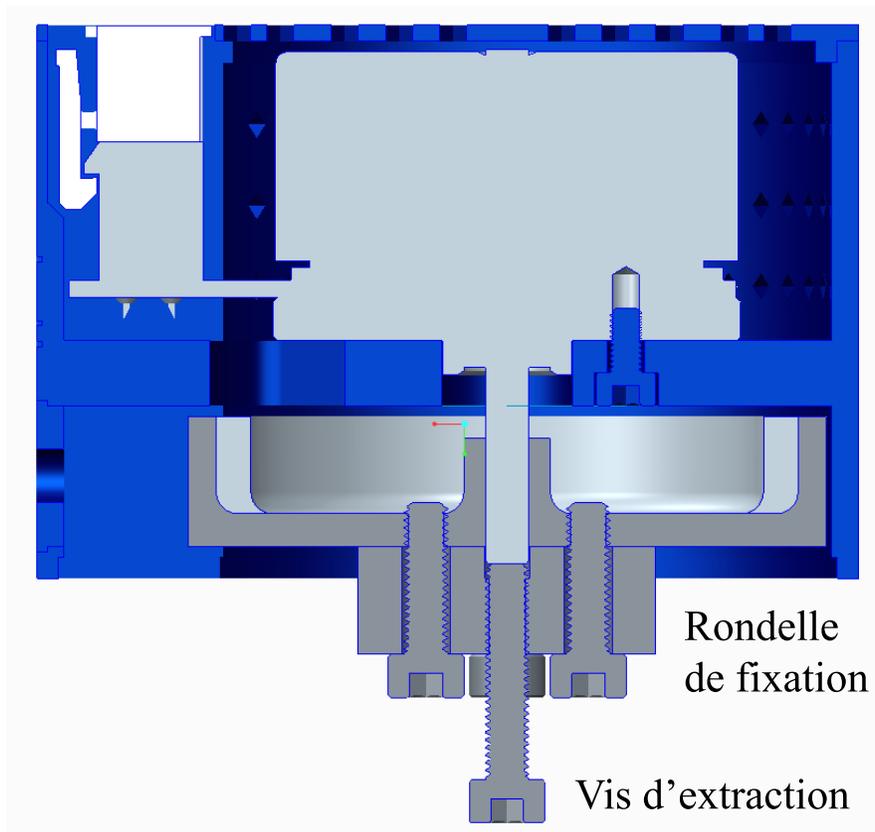


FIGURE 2.5 – Vue de coupe de l’extracteur à vis. Cette assemblage est utilisé pour le démontage du joint collé entre l’arbre du moteur et l’ajustement coulissant de la roue d’inertie.

2.5 Systèmes de lecture

Dans un premier temps, le prototype est vissé à une cellule de charge Mini 40-E SI-20-1, de la compagnie ATI Industrial Automation, avec une lecture dans 6 axes de forces et de couples. Cet instrument permet d’étalonner les gains pour un contrôle ultérieur en boucle ouverte ainsi que d’évaluer les propriétés fréquentielles et de déséquilibre du prototype. Cet étalonnage est décrit en détail dans le chapitre d’étalonnage.

Afin de guider l’utilisateur à l’aide de signaux correctifs vers l’objectif, il importe de connaître son orientation actuelle. Pour des raisons de sécurité et de faisabilité avec des sujets dont les yeux sont bandés, il a été décidé que les tests se feraient dans un environnement contrôlé intérieur. L’équipement porté par l’utilisateur est montré à la Fig.5.4.

Puisque les sujets se déplacent dans une pièce, le système de capture de leur localisation est constitué de 8 caméras infra-rouge actives Vicon MX T-40. Le système comprend un serveur d’analyse dédié et le logiciel Tracker 1.3 pour l’interface, permettant d’obtenir la position et l’orientation en 6 degrés de liberté d’objets à une fréquence de 100 Hz. Ce système a été retenu pour sa disponibilité au Laboratoire de Vision et de Systèmes Numériques (LVSN) de l’Université Laval.

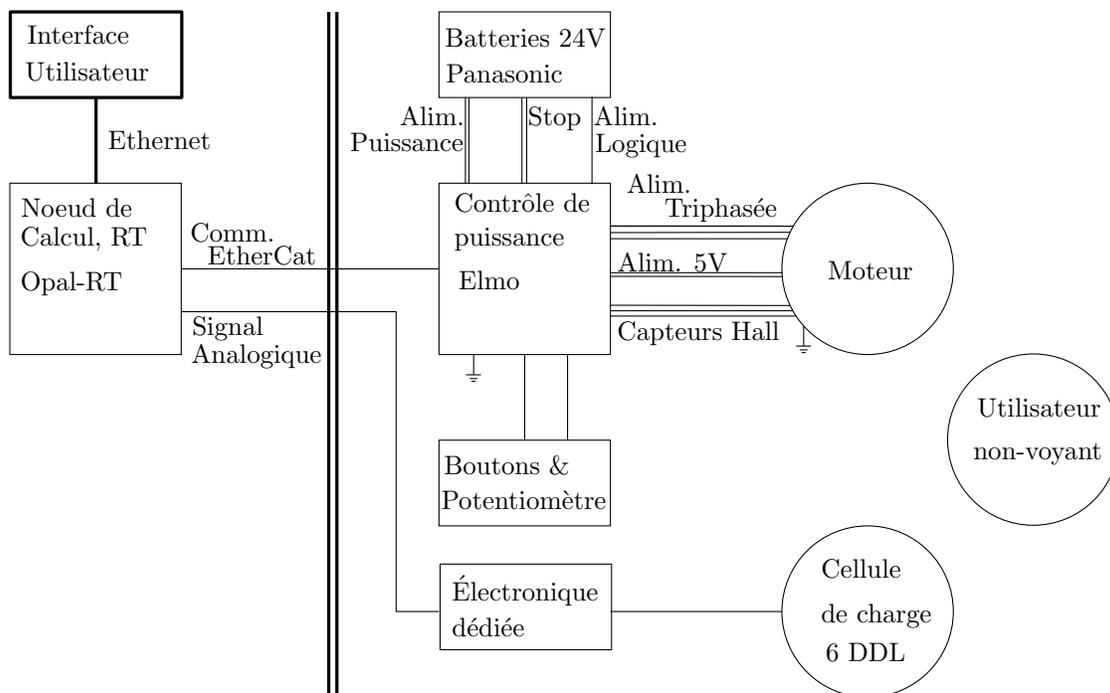


FIGURE 2.6 – Schéma des branchements du système. Dans la section de gauche, les ordinateurs calculent le signal tactile à produire et sont alimentés par le réseau mural. À droite, toutes les composantes sont embarquées et transportées sur le sujet pour le transport de signaux analogiques.

En résumé, ce système utilise des flashes de puissance dans le spectre infra-rouge, qui sont retournés sur les marqueurs sphériques réfléchissants à ces longueurs d'onde. Les caméras détectent seulement dans ce même spectre, ce qui permet d'obtenir un excellent contraste entre les marqueurs et l'environnement. La position des caméras est déterminée d'avance lors d'une phase d'étalonnage à l'aide d'une croix de géométrie connue. Le logiciel propriétaire utilise un algorithme de triangulation entre les images des 8 caméras pour identifier la position dans l'espace des points captés.

Cette technique de points libres peut causer des erreurs d'étiquetage des points dans le temps. En effet, un point est identifié comme étant le même en fonction de sa proximité avec un point à l'instant précédent. Or, il y a perte ou confusion d'identité si un point est masqué et réapparaît plus loin, ou si deux points passent très près l'un de l'autre. Il est complexe de tenir un registre avec certitude entre l'identité d'un point détecté et sa localisation sur le corps du sujet.

La stratégie alternative est d'utiliser la reconnaissance d'objets rigides uniques et pré-enregistrés dans le système. Le sujet est donc équipé avec des objets ayant une signature unique, donc discernables les uns des autres avec certitude. Le logiciel retourne alors la position du centre et un quaternion d'orientation. L'équipement expérimental fourni aux sujets est illustré à la Fig.2.7. Dans les bandeaux à la tête et au poignet sont insérés une plaque d'aluminium de 4.8 mm modelée pour le confort ergonomique avec des trous de passage dans un patron exclusif.

La précision en position et en orientation pour un tel système de caméras est variable en fonction de plusieurs paramètres : la distance de l'objet par rapport aux caméras, la disposition des caméras dans la salle, le nombre de caméras voyant chaque point à un instant donné, les occlusions et la dimension des marqueurs. Le logiciel d'analyse ne fournit pas d'estimation de précision sur les lectures en temps réel. L'estimation des performances est basée sur la mise à l'échelle d'un test effectué auparavant par le LVSN pour un objet étalonné. La précision en position est approximée à ≤ 0.1 mm en position et à une erreur d'orientation de $\leq 0.3^\circ$ pour les objets utilisés dans ce test.

La latence totale de la boucle de contrôle est estimée à ≤ 13 ms. Cette valeur prend en compte la fréquence de rafraîchissement de la lecture du Vicon (100 Hz), la fréquence de transfert des informations par UDP, le temps de calcul du contrôleur en temps réel (1 ms) et le transfert par EtherCAT. Cette latence est acceptable, car elle est indétectable par les sens humains et rencontre amplement les requis.

Le référentiel du bandeau de tête est défini de sorte qu'il soit coïncident avec l'axe de rotation du cou. De cette façon, une rotation de la tête affecte de façon marginale la position globale du corps dans l'algorithme (contenu dans une sphère $r = 2$ cm). Cet étalonnage a été effectuée avec un volontaire type qui devait tourner la tête jusqu'à la convergence à un point mort. Cette approximation a été utilisée pour tous les sujets, pour éviter d'allonger indûment la durée des tests par une étape de ré-étalonnage. Le vecteur de direction est étalonné sur la boussole comme un vecteur entre deux points : l'intersection entre l'axe d'actionnement et le plan du couvercle supérieur, puis le point d'attache du marqueur dans la pointe de la flèche.

2.6 Conclusion

Ce chapitre a détaillé la conception des pièces et les méthodes d'assemblage. Les circuits électroniques et électriques sont tels qu'ils permettent de commander l'actionneur avec une latence faible. La boussole haptique est légère, compacte, ergonomique et permet de générer des signaux haptiques clairs, ce qui rencontre tous les requis de design.

Le système de caméras Vicon est utilisé pour le retour de la position de l'utilisateur. Ce système de lecture est expliqué et permet une précision d'acquisition des données plus que suffisante.

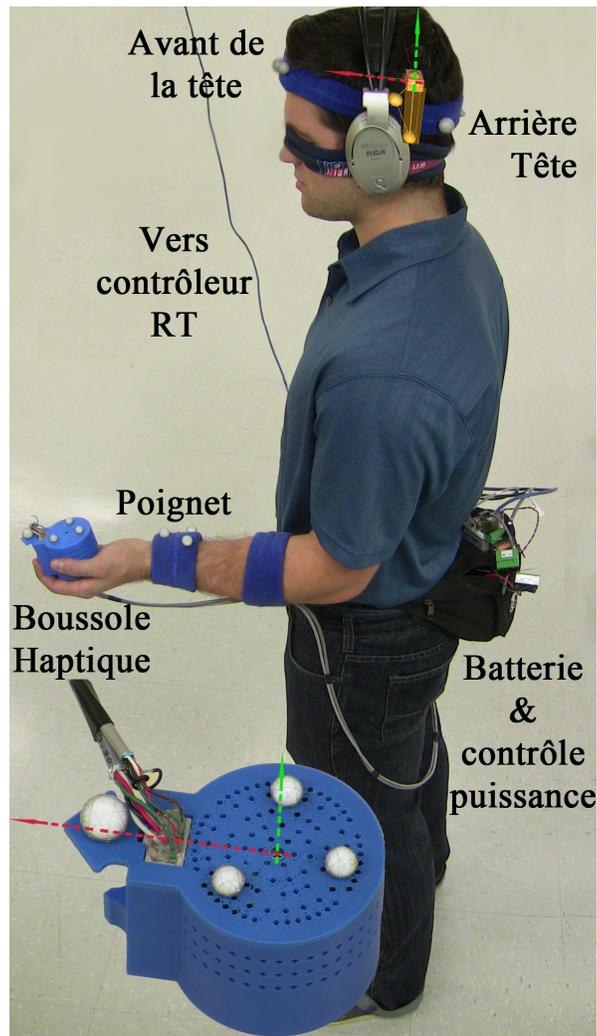


FIGURE 2.7 – Équipement des participants pour l'expérience d'orientation en marche. Le câble est relié au nœud de calcul en temps réel et transmet des consignes digitales seulement. Les marqueurs sur le bandeau à la tête fournissent la position du sujet et la flèche avant de la boussole (vue agrandie) représente la direction de marche.

Chapitre 3

Caractérisation et Étalonnage

Afin de valider que les propriétés mécaniques de la boussole haptique sont conformes avec les requis de conception, il est impératif de la caractériser. Une phase d'étalonnage permettra par la suite de déterminer les commandes à envoyer pour une sortie désirée donnée.

3.1 Contrôleur

Une fois les pièces fabriquées et assemblées, le câblage terminé et l'interface logiciel opérationnelle, les rétroactions doivent être commandées à l'aide d'une stratégie définie. Le programme de commande est constitué de plusieurs composantes unitaires qui sont combinées.

3.1.1 Stratégie de rétroaction

Pour fournir une rétroaction pertinente à l'utilisateur, la stratégie de contrôle illustrée à la Fig.3.1 a été développée. Un signal de correction d'orientation haptique est généré vers la gauche ou vers la droite, jusqu'à l'atteinte de la bonne direction. Si l'utilisateur dépasse l'objectif, le couple s'adapte et change lui aussi de direction.

Chaque bloc est détaillé ci-contre :

- Rétroaction Haptique : Il s'agit du modèle humain, ou comment l'humain se réoriente à l'aide de stimulation reçue. Ce comportement sert dans un premier temps à développer un générateur de signal haptique efficace. Ensuite, les performances sont évaluées et un modèle de cette rétroaction est proposé.
- Orientation Utilisateur : L'orientation de l'utilisateur est obtenue à l'aide de la caméra 3D Vicon et projetée dans le plan du sol. Dans les tests préliminaires de développement du générateur, l'orientation est représentée par la manipulation d'un bouton.
- Orientation vers l'objectif : L'orientation consigne est calculée par la différence entre la position actuelle de l'utilisateur et la localisation du point où se rendre. Il s'agit donc d'une ligne droite au sol vers l'objectif courant. Dans les tests préliminaires, l'orientation consigne est fixée

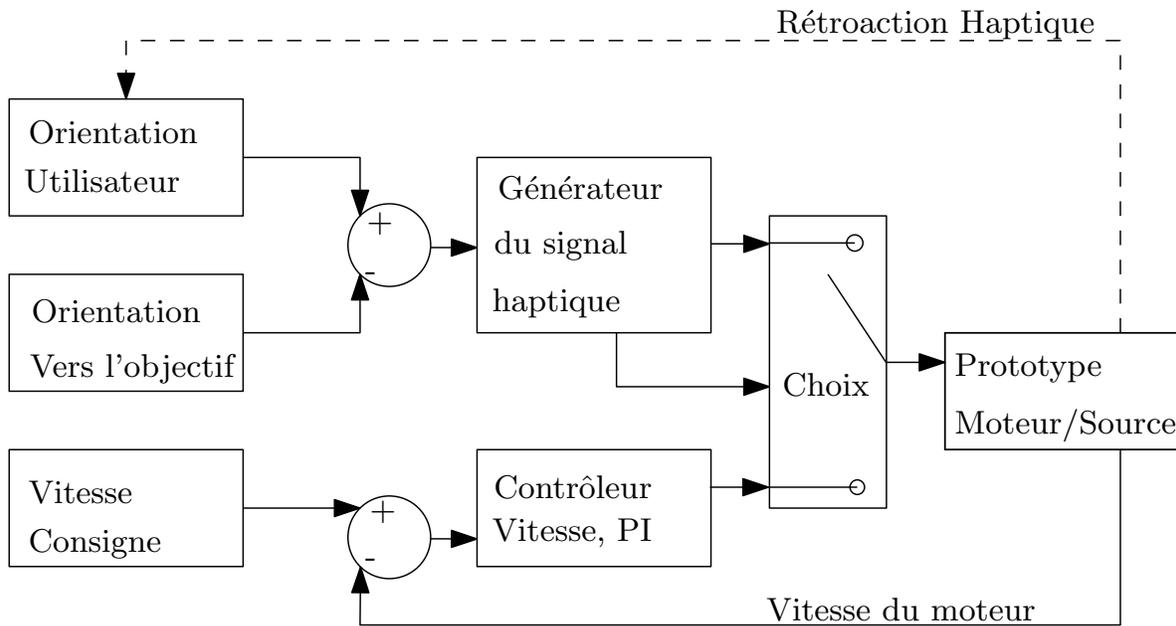


FIGURE 3.1 – Schéma de contrôle du prototype. La ligne pointillée indique la rétroaction haptique à l'utilisateur et son comportement de réorientation. Son orientation actuelle est obtenue par le système de caméras.

arbitrairement selon le plan expérimental. L'erreur entre l'orientation consigne et celle de l'utilisateur a une plage de tolérance de $\pm 5^\circ$ autour de la consigne.

- Générateur du signal haptique : À partir de l'erreur d'orientation, cette fonction génère une rétroaction efficace pour la tâche. Le développement et l'optimisation de cette fonction occupe une grande part du travail et nécessite des expérimentations avec sujets pour s'améliorer. Aussi, c'est elle qui gère si le dispositif est en mode de production de stimulus ou en retour à l'équilibre de vitesse.
- Vitesse consigne : Il s'agit de la vitesse à l'équilibre du système. C'est un compromis de vitesse cherchant à minimiser les effets gyroscopiques parasites et le couple d'arrêt.
- Vitesse moteur : Cette vitesse est calculée à partir des capteurs à effet Hall du moteur.
- Contrôleur de vitesse : Ce contrôleur transforme l'erreur de vitesse en un couple correctif.
- Prototype : Le système de boussole matérialise les consignes en un signal tactile pour l'utilisateur.

3.1.2 Paramètres tactiles

Les signaux haptiques sont développés selon la stratégie d'oscillation asymétrique proposée par [Ame-miya et al. \[2007\]](#). Cette technique consiste à utiliser des impulsions de haute intensité dans la direction désirée suivies par un retour à l'équilibre à basse intensité. La non-linéarité de la sensation envoyée par rapport à la perception de l'humain crée une direction perçue comme dominante. Dans cette recherche, le retour à l'équilibre s'effectue à une intensité sous le seuil de perception, de telle sorte

qu'une direction seulement est ressentie. Une illustration conceptuelle du principe est illustré dans la Fig.3.2.

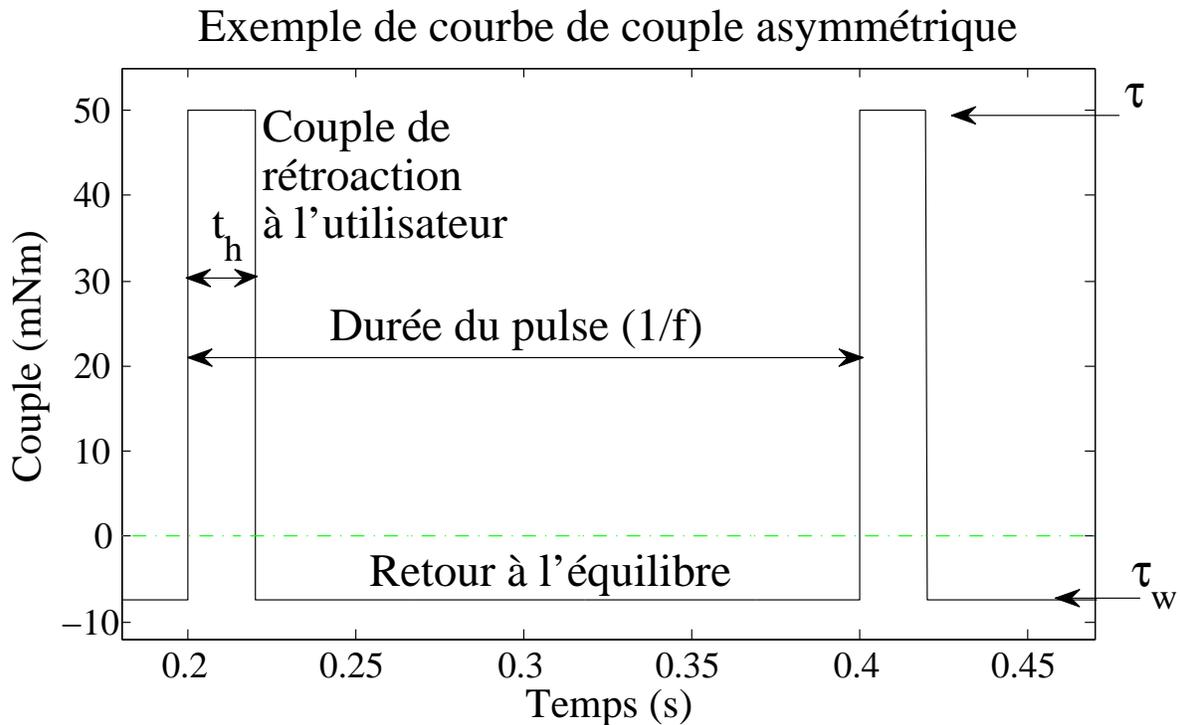


FIGURE 3.2 – Illustration conceptuelle de la courbe de couple et ses principaux paramètres.

Les signaux haptiques utilisent les paramètres de fréquence f , l'amplitude du couple τ , la pente du pic de couple δ et le couple de retour maximal permis τ_w . ($\delta = 0$ dans cet exemple) Le couple de retour effectif τ_{retour} est calculé par un contrôleur PI ayant pour limitation $\tau_{retour} < \tau_w$. Ces paramètres sont affectés par l'erreur d'orientation ε lorsque les stimuli sont en mode proportionnel à l'erreur. Le paramètre t_h représente la durée d'exposition au au couple τ dans le cycle.

La Fig.3.3 illustre graphiquement ces paramètres ainsi qu'un résultat de l'étalonnage. La procédure d'étalonnage est davantage détaillée dans les autres sections de ce chapitre.

Le signal de rétroaction haptique est généré avec la séquence présentée dans l'algorithme 1. Cette séquence logique est calculée par le nœud de calcul en temps réel à un rythme de 1 kHz.

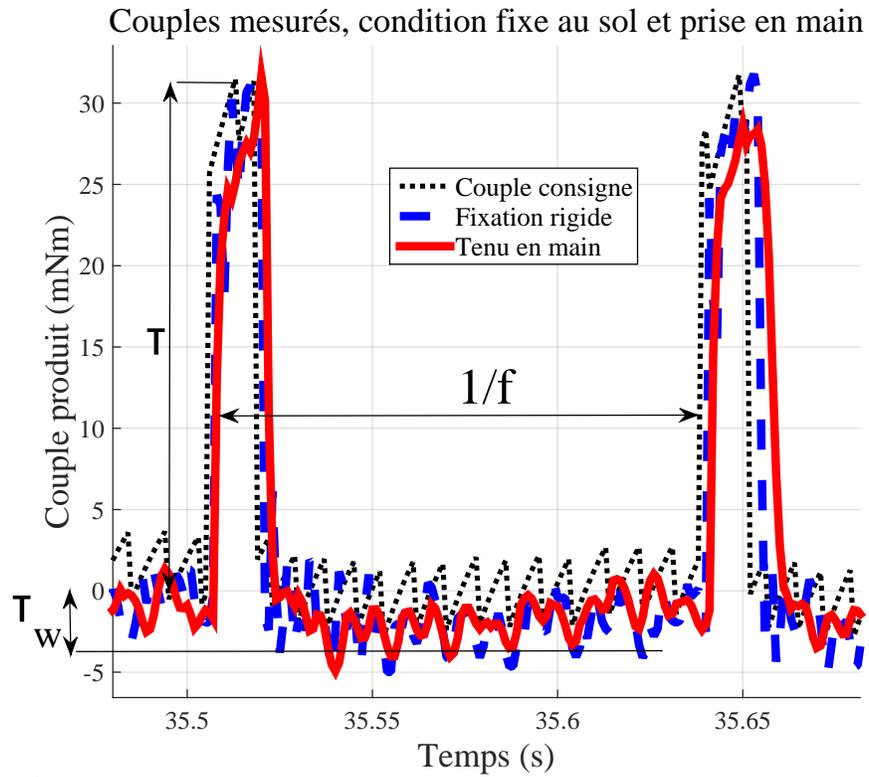


FIGURE 3.3 – Échantillon d'étalonnage du signal de couple dans les conditions fixes et prises en main. Les paramètres des signaux haptiques sont f , τ , τ_w et δ .

Data: Position et orientation du sujet par rapport à l'objectif

Result: Consigne de couple à l'actionneur de la boussole

while *Sujet en déplacement* **do**

 calcul de l'erreur d'orientation ε du sujet avec capteur Vicon ou potentiomètre;

 calcul de fréquence f avec l'erreur d'angle ε et le mode;

if $\varepsilon \leq \text{zone d'acceptation}$ **then**

 | τ est nul

else

 | calcul du couple de rétroaction τ avec δ , l'erreur d'angle ε et le mode;

end

 calcul de la période du stimulus actif total t_{actif} avec f ;

 calcul du couple τ_{retour} et durée t_{retour} de retour à l'équilibre ;

if $\text{temps actuel} \leq t_{actif}$ **then**

 | $\text{couple} = \tau_{stimulus} * \text{direction} - \tau_{retour}$;

else

 | $\text{couple} = 0$;

end

$\text{couple} = \text{couple} + \tau_{retour}$;

end

Algorithm 1: Génération du couple de consigne pour la production du stimulus haptique

3.1.3 Justification de boucle ouverte

Cette stratégie de signaux haptiques permet de guider un individu, à condition que les paramètres de couple et de fréquence soient ajustés correctement. Pour ce faire, il est nécessaire de caractériser et de mesurer le couple réellement ressenti par l'utilisateur.

On peut remarquer que le schéma de contrôle n'utilise pas de boucle de rétroaction sur le couple produit. Cette décision de produire un couple sans aucun moyen de le mesurer en continu durant le fonctionnement est basé sur les considérations suivantes :

- La tolérance de précision et de répétabilité du stimulus est grande, puisque l'humain ne sent pas les différences environ $\leq 10\%$. Cette fraction de Weber varie selon le paramètre observé : 16% pour les forces tangentielles, 7% pour les forces normales, 13 à 16% pour l'amplitude vibrotactile, selon Jones and Tan [2013].
- La tolérance sur les délais et les écarts de fréquence est large, puisque l'humain ne peut les discerner.
- La valeur absolue du couple n'est pas cruciale pour le fonctionnement normal. Cependant, dans une optique de recherche, il importe d'en avoir une estimation pour pouvoir la comparer avec la littérature.

- La dynamique du système de moteur est simple et linéaire dans la plage d'utilisation. Il est donc facile de calculer une séquence de commandes qui produira l'effet désiré.
- Pour un moteur électrique, il existe une relation physique de proportionnalité directe entre le couple du moteur et le courant envoyé.
- Les composantes de mesure, une cellule de charge en couple, ajoutent une masse passive au prototype.
- Dans une approche de produit commercial, l'ajout d'un capteur d'efforts et de sa chaîne d'acquisition augmente les coûts.
- Un dysfonctionnement du prototype en boucle ouverte n'entraîne pas de conséquences catastrophiques.
- Le système se stabilise de lui-même en cas de défaillance. Des protections logicielles au niveau de la source d'alimentation Elmo garantissent la sécurité du moteur en cas d'emballement du contrôleur.

Cette méthode comporte par contre quelques inconvénients quant à la précision obtenue. En effet, La dynamique et les couples produits peuvent changer dans le temps et selon des facteurs externes :

- La précision du couple réel produit est entièrement dépendante de la calibration initiale. Il n'y a pas de contrôle actif permettant de contrôler directement la sortie de couple.
- En enlevant le capteur de mesure du couple, il n'est pas possible non plus de mesurer directement la sortie du système.
- L'usure du mécanisme peut faire varier le comportement de la friction et les performances du moteur, changeant le modèle de couple. Ce problème peut être corrigé par un ré-étalonnage périodique des dispositifs.
- La friction du mécanisme peut changer en fonction de la température des composantes de roulement internes. Cette problématique est contrôlée par une évaluation des phénomènes thermiques dans la boussole. Avec l'ajout de trous sur le boîtier, aucun réchauffement n'est perceptible.

Les arguments en faveur d'une boucle ouverte relèvent de la précision du couple à laquelle on peut s'attendre. Or, la tolérance requise ne justifie pas l'usage de la boucle fermée, compte tenu de ses désavantages. La technologie de moteurs électriques à entraînement direct permet donc un contrôle simple, de par la relation entre le courant envoyé et le couple produit. Cette relation est idéale pour un contrôle en courant, qui est effectué par la source Elmo à partir des commandes de courant du nœud de calcul. Finalement, l'utilisation d'une boucle ouverte facilite le contrôle tout en respectant le niveau de tolérance en couple requis par l'application.

3.1.4 Retour à l'équilibre

Dans les mécanismes haptiques sans appui fixe, les efforts sont produits par l'accélération de masses internes, qui éventuellement atteignent des limites de vitesse ou de position. Pour y remédier, une stratégie de retour à l'équilibre de la masse interne est développée avec les objectifs d'efficacité et

de transparence. Pour le moteur électrique, la limitation de vitesse angulaire requiert un retour à une vitesse constante et faible après un stimulus haptique.

Une mesure de position angulaire p_k à l'instant k est obtenue par les capteurs à effet Hall avec une résolution de 48 comptes par tour. La dérivée de cette mesure étant très bruitée, la vitesse v est calculée avec un filtre exponentiel récursif de constante α , tel que

$$v_k = \frac{dp_k}{dt} \alpha + (1 - \alpha)v_{k-1}. \quad (3.1)$$

Ce choix de constante a été déterminé à $\alpha = 0.05$ par une série d'essais pour un compromis entre la qualité de filtrage et le temps de réponse. La fonction de transfert d'un tel filtre est donnée par

$$H(z) = \frac{v(z)}{\frac{dp(z)}{dt}} = \frac{\alpha}{1 - (1 - \alpha)z^{-1}} \quad (3.2)$$

sachant que la fréquence d'échantillonnage est de 1 kHz. L'investissement dans un encodeur de plus haute précision aurait simplifié le calcul du filtre de la vitesse. Cette amélioration matérielle aurait réduit le délai imposé par le filtre et ultimement permis un contrôle de retour à l'équilibre avec moins d'oscillations. Le temps de montée du filtre a été évalué par modélisation à 20 ms avec la fréquence de boucle de 1 kHz. Cette valeur est satisfaisante pour la durée des phases de retour à l'équilibre visées oscillant entre 60 et 180 ms.

Pour que l'utilisateur n'ait pas conscience du retour à l'équilibre, les couples utilisés sont inférieurs ou égaux à la limite sensorielle. Conserver les perturbations mécaniques sous les seuils sensoriels permet de conserver la transparence haptique, c'est-à-dire que seules les sensations de rétroaction sont ressenties. Les valeurs utilisées et leur processus d'obtention sont détaillés dans le chapitre 4. Cette valeur est utilisée comme limitation du couple généré par le contrôleur de vitesse. Le contrôleur de vitesse de type PI est implanté, avec une domination importante du facteur proportionnel. L'erreur de vitesse est transformée en couple commandé, qui est limité par le couple de retour à l'équilibre. Les constantes sont calculées à partir du modèle caractérisé et du temps de réponse voulu. Par la suite, elles sont ajustées expérimentalement pour optimiser la stabilité et le temps de réponse à haute et basse vitesses.

3.2 Caractérisation

Afin de contrôler en boucle ouverte le couple de sortie du prototype, une phase de caractérisation a permis de déterminer la fonction de transfert du dispositif, ainsi que de pallier aux non-linéarités observées. De plus, différentes propriétés physiques et dynamiques du système ont été étudiées, puisqu'elles ont potentiellement un impact sur le système.

3.2.1 Montage

Le montage pour l'étalonnage est illustré à la Fig.3.4. Il y a deux conditions limites d'ancrage : tenue en main et fixe. Dans l'assemblage fixe, l'étau tenant la cellule de charge est tenu en serre et collé

à la table pour éviter les glissements. Dans la condition tenue en main, l'utilisateur tient la plaque d'interface à laquelle est vissée le capteur d'efforts à 6DDL.

Le capteur d'efforts ATI est branché dans le module de traitement de signal dédié du même fabricant. Ce module de traitement est relié au nœud de calcul, qui lit les 6 signaux analogiques (3 forces et 3 couples). Le signal est filtré par la fonction $H(s)$ à $f_c = 100$ Hz avec un filtre passe-bas de premier ordre, tel que montré dans

$$H(s) = \frac{\omega_c}{\omega_c + s} \quad (3.3)$$

où $2\pi f_c = \omega_c$. Cette fréquence de coupure f_c est choisie en se basant sur la littérature, puis en conservant une marge pour pouvoir observer correctement les phénomènes à proximité des plus hautes fréquences d'excitation à 50 Hz. En effet, les fréquences perçues par les cellules de Meissner, produisant la plus grande sensation de directionnalité Paré [2001], ont une bande passante inférieure à environ 50 Hz, selon Tiwana et al. [2012] et Braun et al. [2008]. Les signaux bruts sont également enregistrés pour l'analyse fréquentielle étendue dans certaines conditions spécifiques, ainsi que pour évaluer l'efficacité du filtrage.

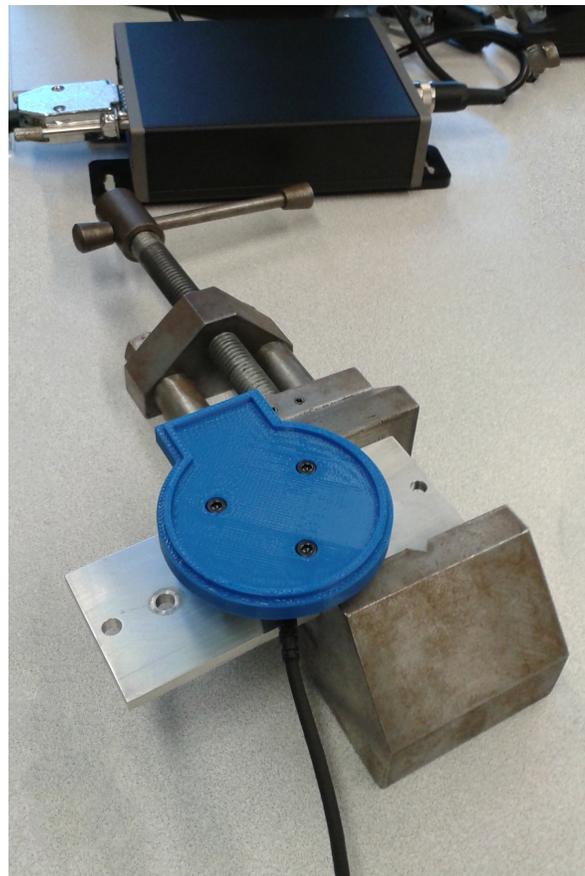


FIGURE 3.4 – Montage utilisé pour la l'étalonnage, montrant l'installation du couvercle inférieur à la cellule de force. Le reste du prototype s'insère sur le couvercle par une interface de serrage. Les essais sont effectués dans deux conditions de support : fixe (ci-haut) et pris en main (non illustré).

L'exactitude des lectures du capteur d'efforts est assurée par son certificat de validation. Pour valider les branchements et les algorithmes de calcul utilisés, la sortie est corroborée avec un couple généré avec une balance sur un bras de levier connu.

Dans un premier temps, l'option d'évaluer le couple à l'aide des accélérations mesurées par l'encodeur a été envisagée. La fonction de couple lue par la cellule de force est ainsi comparée à une estimation de couple obtenue avec l'accélération du système, tel qu'illustré à la Fig.3.5. L'accélération est calculée par la double dérivée de la position (capteurs à effet Hall) et le couple est calculé en connaissant l'inertie du système. La filtrage requis pour obtenir un signal d'une certaine clarté est une cascade de deux filtres récurrents exponentiels. Cette combinaison produit un temps de réponse lent, ce qui explique le retard entre la lecture du couple par le capteur et celle obtenue par l'accélération. Les valeurs lues et estimées correspondent entre elles, ce qui montre que la cellule de charge et son système d'acquisition sont fonctionnels. Par ailleurs, ce test montre que la valeur estimée aurait le potentiel d'être utilisée pour fermer la boucle, à condition que les filtres soient développés et optimisés.

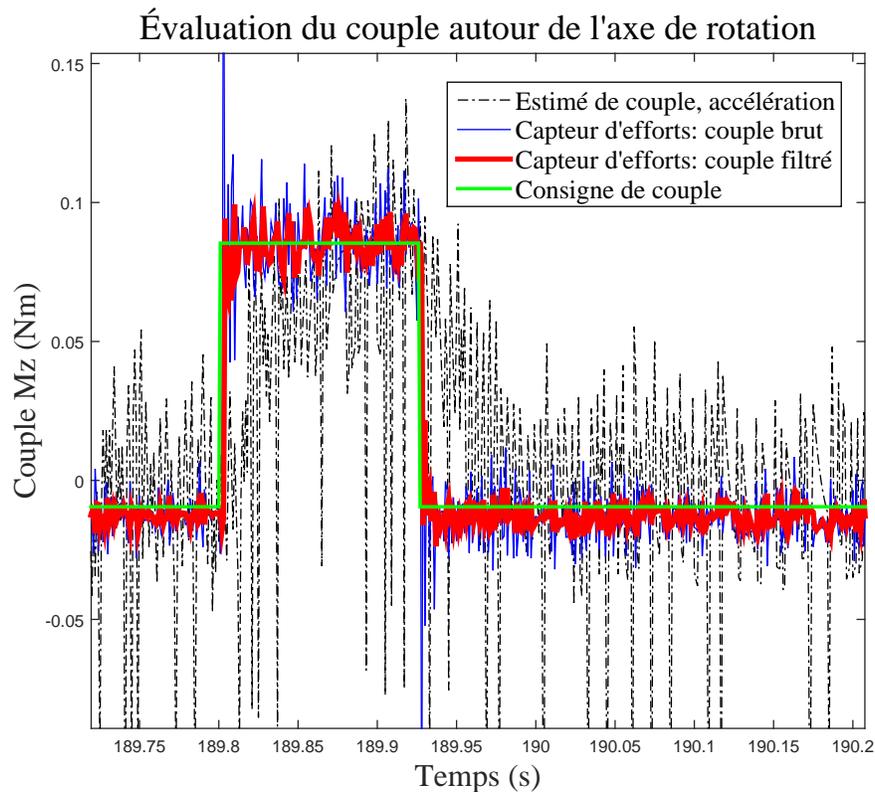


FIGURE 3.5 – Comparaison entre les couples obtenus par différentes sources. Le couple consigne est comparé au couple mesuré par la cellule de charge, avec et sans filtrage (1^{er} ordre à 100 Hz). Le couple mesuré est validé par sa correspondance à l'estimation à partir de l'accélération angulaire du système.

3.2.2 Délais et constantes de temps

Lors des essais avec le système, un délai entre l'entrée et la sortie du signal est observé. Ce délai est estimé à environ 3 ms et est explicable par la chaîne d'échantillonnage. En effet, la cadence d'asservissement du nœud en temps réel est de 1 kHz, soit une période de 1 ms. Il convient de considérer une période d'échantillonnage par étape de transmission, soit une évaluation pessimiste de la chaîne de temps réel. Or, si on additionne les délais d'envoi du signal à l'alimentation moteur (1 ms) et le délai d'acquisition analogique provenant du capteur d'effort (1 ms), il reste un délai de 1 ms réparti dans la chaîne source/mécanisme/capteur.

Pour estimer le temps de montée, le début des deux courbes est aligné dans le domaine temporel pour corriger le délai de la chaîne d'acquisition. Le temps de montée du couple à 90% est mesuré à 1 ms. Ce temps de montée est satisfaisant pour les durées d'exposition de stimulus, pour que la portion de montée n'occupe qu'une partie mineure du signal haptique. Puisque les signaux utilisés dans l'expérimentation ont une durée minimale de 6.6 ms, la montée représente au maximum 15% de la durée d'exposition. Pour les calculs, le signal haptique est approximé à sa valeur d'exposition consigne sur toute la durée d'exposition, incluant le temps de montée.

3.2.3 Gains

La relation théorique liant le couple τ et le courant entrant d'un moteur I est donnée par

$$\tau = K_t I \quad (3.4)$$

avec K_t la constante de couple du moteur. La constante de couple nominale du moteur est 36.9 mNm/A selon la fiche technique du moteur.

Or, les constantes de couple, ou gains, sont rarement symétriques dans les deux directions. Cela s'explique par les imperfections de fabrication, où les capteurs à effet Hall et les phases sont désaxés. Cette erreur d'angle, même légère, change la cadence de commutation et peut créer une perte d'efficacité dans une direction ou l'autre. Cette problématique peut être corrigée par un réaligement mécanique des moteurs, ce qui n'est pas envisageable, ou alors par un ajustement artificiel des gains pour chaque direction. Cette dernière option a été retenue : l'étalonnage a été réalisé indépendamment dans les deux directions pour obtenir des gains permettant de relier le courant au couple.

La friction de roulement est elle aussi une perturbation à cette relation théorique. La friction est étudiée en observant le ralentissement mécanique naturel du système. La linéarité de la courbe de vitesse dans le temps démontre un ralentissement à accélération constante. Le mode de friction dominant est donc un frottement statique, ou indépendant de la vitesse. La friction est donc approximée selon un modèle de friction statique. Connaissant l'inertie en rotation J , la vitesse initiale ω_i et le temps requis pour l'arrêt complet t , on obtient

$$\tau_{fr} = J \frac{\omega_i}{t} \quad (3.5)$$

avec τ_{fr} le couple de friction moyen. De cette manière, τ_{fr} est estimé à 1.74 mNm pour le système. Ce couple étant relativement faible par rapport aux couples haptiques produits (de l'ordre de 50 mNm, la friction est négligée dans les calculs.

Pour obtenir davantage de précision, une avenue possible aurait été une identification avec un modèle complet de friction. L'accélération et la vitesse angulaire sont définis comme α , et ω respectivement. On peut alors écrire

$$\tau = k_s \times \text{sign}(\omega) + k_c |\omega| + J\alpha \quad (3.6)$$

où k_s et k_c sont les coefficients de friction statique et cinématique. Connaissant les états du couple, de l'accélération et de la vitesse angulaire, les coefficients peuvent être estimés par une régression aux moindres carrés. Une raison majeure prévenant l'usage de cette technique est justement la difficulté d'estimer la vitesse angulaire et l'accélération angulaire avec le mécanisme proposé et son encodeur de faible résolution. Les niveaux de bruit numérique, en particulier sur l'accélération, rendent ces lectures inutilisables pour cet algorithme d'identification.

Puisque le couple est produit en boucle ouverte durant l'opération, les gains de couple sont étalonnés au préalable pour que leur valeur moyenne durant le stimulus corresponde à la valeur commandée. Les couples mesurés par la cellule de force sont comparés aux couples désirés durant un test standardisé. Cette séquence de test est composée d'excitations réparties uniformément dans la plage de travail. La valeur moyenne du couple produit τ durant la phase de stimulation t_h est comparée à la valeur commandée. Le gain effectif est calculé par une moyenne des gains obtenus dans chaque scénario individuel du test standardisé.

Les gains dans les deux directions sont différents : 63 mNm/A dans le sens horaire et 58.5 mNm/A dans l'autre direction. Ces deux constantes sont relativement proches l'une de l'autre, mais très différentes de la valeur nominale. La Fig.3.6 montre les résultats de l'étalonnage. La valeur de gain est calculée pour minimiser la variance de l'erreur sur l'intervalle des stimuli haptiques.

Le gain final est ensuite adapté pour avoir une performance polyvalente parmi l'étendue des stimuli produits. La condition de fixation, en main ou fixée, n'influence pas notablement la valeur moyenne. Sur un test incluant un ensemble de signaux variant dans toute la plage dans les deux directions, l'erreur moyenne de couple est de -0.72 mNm et l'écart-type de l'erreur est 4.86 mNm. Cette erreur est acceptable, considérant que les couples des stimuli haptiques sont supérieurs à 40 mNm et le requis d'erreur inférieure à 10% énoncé ci-haut.

Les tests d'étalonnage ont été effectués avec l'alimentation Topward et avec les batteries de Panasonic, pour valider que la tension de la source n'influence pas le couple produit. Les tests ont montré qu'il n'y a pas de différence notable causée par la tension d'entrée. En effet, le contrôle intégré de courant de la source de puissance Elmo assure une régulation adéquate qui compense cette variation à l'entrée. Cette notion est d'autant plus importante que la tension fournie par un système de batteries est variable en fonction de la décharge.

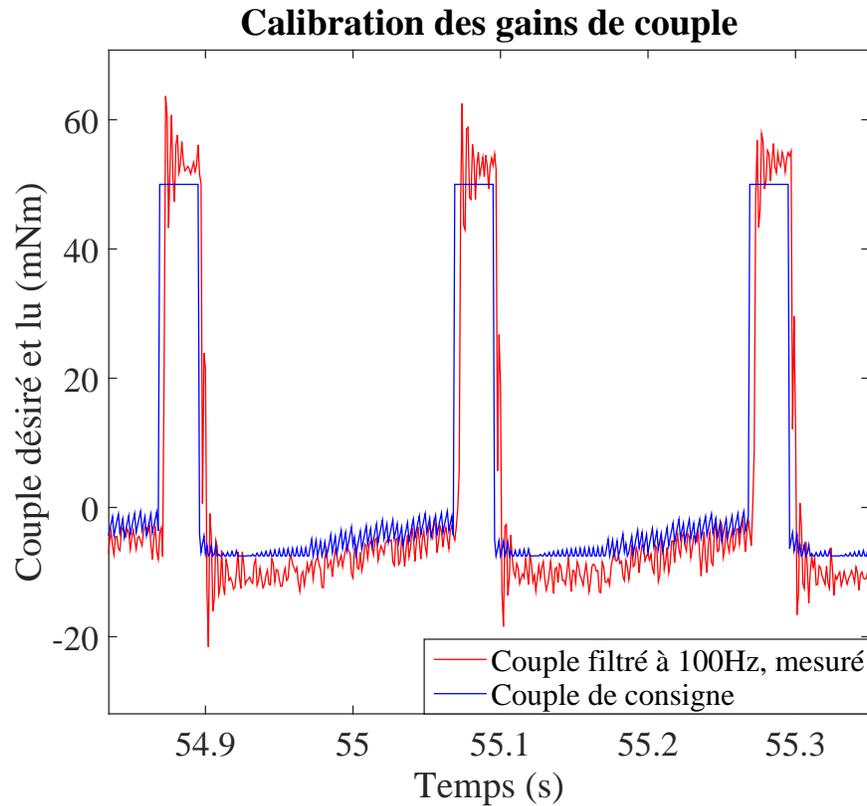
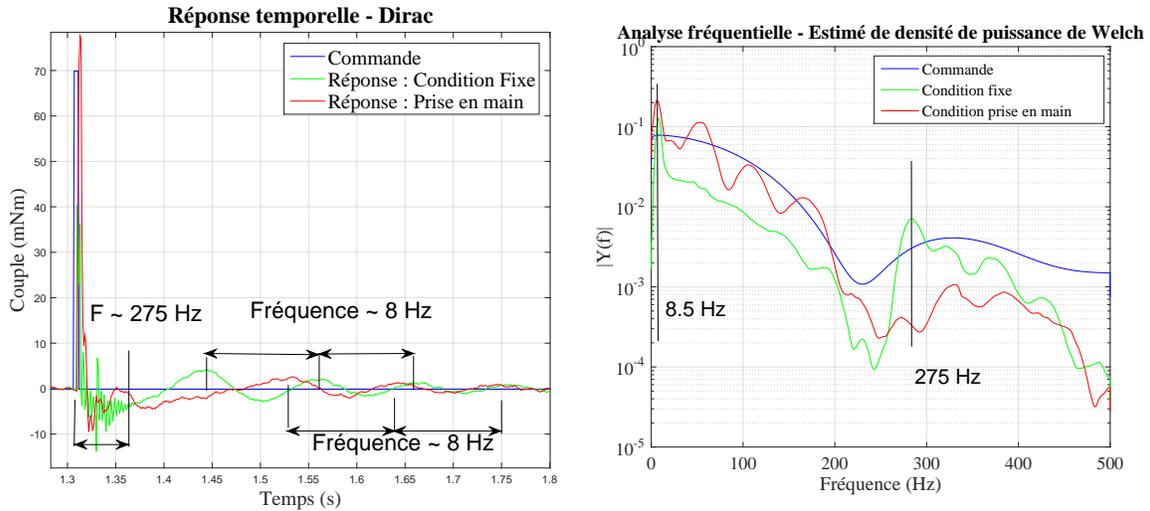


FIGURE 3.6 – Extrait d’un test d’étalonnage des gains de couple.

3.2.4 Vitesse à l’équilibre

Une autre limitation à la relation théorique est le couple d’encochage (cogging torque), ou le couple requis pour tourner le moteur sans courant. Cette perturbation est causée par l’interaction magnétique entre les aimants permanents du rotor et les pôles du stator. Le couple en fonction de l’angle est donc une fonction oscillante à l’approche et l’éloignement de chaque pôle, avec une amplitude estimée de 1.5 – 2 mNm. Cette perturbation peut être évitée par plusieurs méthodes :

- Une conception de moteur différente permet de réduire considérablement cet effet. Elle est inapplicable ici, puisque la mécanique interne du moteur ne peut pas être modifiée.
- Une compensation active de la fonction de couple en fonction de l’angle du moteur est possible. Cependant, les capteurs à effet Hall utilisés pour le retour angulaire ne sont pas assez précis, puisqu’ils détectent justement le magnétisme sur les pôles avec une résolution de seulement 48 comptes par tour. Cette solution pourrait être applicable mais requiert un encodeur de précision et un contrôleur complexe à développer Van [2013], Yim [2014].
- Finalement, puisqu’il s’agit d’un effet local, le bilan de la fonction oscillante de couple sur un tour complet est nul. Une approche utilisée pour contourner le problème est de conserver une vitesse de consigne non-nulle, de telle sorte que l’inertie en rotation entraîne le système au-delà des pics de couple d’encochage. Lorsque le système n’est pas à l’arrêt, les variations locales de



(a) Réponse temporelle du système à une impulsion, dans les deux conditions de support. (b) Analyse fréquentielle de la réponse à l'impulsion, calculée avec la transformée de puissance de Welch.

FIGURE 3.7 – Analyse fréquentielle de la réponse des systèmes dispositif-fixe et dispositif-main.

couple sont donc amorties par l'inertie en rotation en exploitant la propriété de bilan nul de la perturbation.

En conséquence, la vitesse de référence est déterminée par essai-erreur à 150 rpm. Il s'agit d'un compromis entre une vitesse basse pour minimiser les effets gyroscopiques parasites et une vitesse haute pour diminuer les oscillations du couple d'arrêt.

3.2.5 Fréquence naturelle

Il est important de connaître les fréquences naturelles, puisqu'elles peuvent avoir un effet sur la capacité de perception. Il n'est pas clair si la réponse amplifiée du système est favorable à la perception ou si au contraire sa proximité de la résonance produit une atténuation de l'effet asymétrique des stimuli. Cette question demeure une source potentielle d'amélioration du dispositif, par l'adaptation personnalisée des stimuli aux propriétés vibratoires du système dispositif-main propres à chaque utilisateur.

Pour étudier les fréquences naturelles du système et les distinguer des conditions d'appui, les pics des analyses fréquentielles dans les deux conditions de support, fixe et pris en main, sont comparés. La réponse à l'impulsion, à la Fig.3.7 montre la réponse la plus claire pour l'analyse fréquentielle. Puisque la fréquence de 8.5 Hz est présente dans les deux conditions de support, cela correspond à la fréquence de résonance du dispositif autour de l'axe de rotation du moteur.

Deux autres protocoles expérimentaux, la réponse à l'échelon et le balayage fréquentiel, ont été testés et sont moins clairs sur la fréquence dominante. Ils présentent comme désavantage d'être perturbés par le bruit de fonctionnement du roulement et des couples d'encoche, tandis que la réponse à l'impulsion est claire juste après l'excitation.

3.2.6 Débalancement

L'une des sources importantes de sensations parasites dues au mécanisme, pouvant gêner la sensation haptique, est l'excentricité du rotor. En effet, l'excentricité d'une masse en rotation m_r cause une vibration alternative symétrique, de la même manière que les moteurs de vibration dans les manettes de jeux vidéo. Cette vibration peut masquer la rétroaction ou diminuer son contraste.

Ces vibrations doivent être limitées par le design mécanique de telle sorte qu'elles demeurent sous la limite sensorielle des utilisateurs. Dans Bolanowski [1988], le plus petit déplacement cutané causé par la vibration δ_p détecté par l'humain en fonction de la fréquence est montré à la Fig.3.8. Le prototype est limité mécaniquement à 100 Hz. Dans la plage de fréquences atteignables, la fréquence critique pour être sous le seuil perceptible est à 50 Hz, où une amplitude vibratoire de plus de $\delta_p > 1.25 \mu\text{m}$ crête à crête (peak) est ressentie. Le déplacement δ_p du dispositif peut être calculé par la relation entre le facteur de débalancement u et la masse totale du prototype m_t ,

$$\delta_p = \frac{u}{m_t} \quad (3.7)$$

Le débalancement admissible pour être sous le seuil de sensation pour un design à toutes les vitesses dans la plage atteignables 0-6000 r/min (100 Hz) peut être estimé à $u_{adm} = 0.357 \text{ gmm/kg}$, avec $m_t = 325 \text{ g}$.

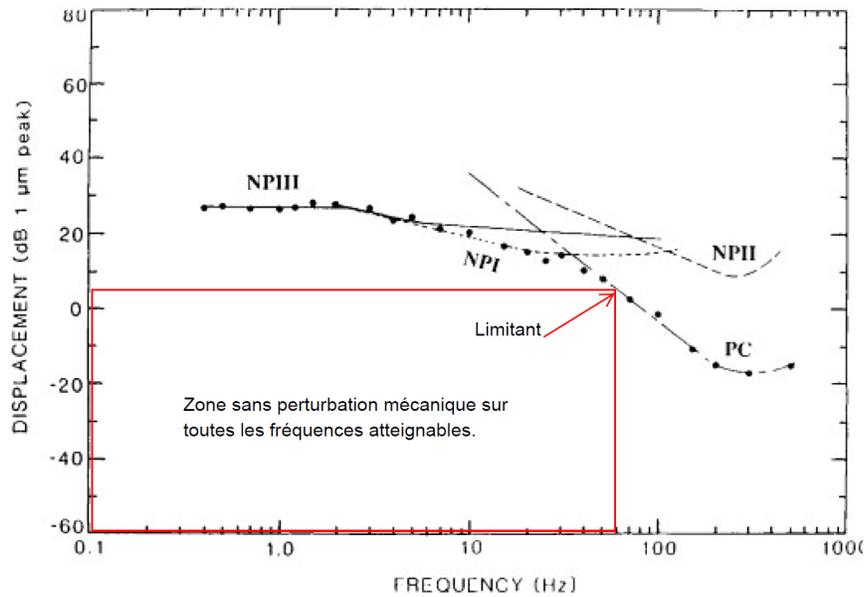


FIGURE 3.8 – Limite sensorielle minimale de la vibration en fonction de la fréquence. Cette limite combine les caractéristiques de sensibilité des différents types de récepteurs tactiles, sur la plage de fréquences. Tiré de Bolanowski [1988].

En pratique, cette imperfection du balancement est mesurée à partir de la force centripète F_c lue par le capteur d'efforts lors d'une rotation à vitesse constante ω . Le débalancement est occasionné par la

masse en rotation m_r et une distance r à laquelle l'imperfection se trouve. La Fig.3.9 a été utilisée pour montrer les courbes de forces dans les axes latéraux et les couples autour des axes perpendiculaires, suivant la relation

$$F_c = m_r r \omega^2 = u \omega^2 \quad (3.8)$$

où u , le facteur de débalancement, englobe $u = m_r r$. L'utilisation d'un facteur u est prescrite par la norme ISO 1940/1 :2003 pour comparaison avec d'autres systèmes mécaniques. Avec des mesures graphiques de force résultants à plusieurs vitesses connues, analogues à la Fig.3.9, la valeur moyenne du débalancement mesurée est $u = 8.7$ gmm. Le déplacement du dispositif $\delta(t)$ peut ensuite être déduit par la double intégrale de l'accélération dans une direction x donnée :

$$a_c x(t) = \frac{F_c x}{m_t} = \frac{u \omega^2 \sin(\omega t)}{m_t} \quad (3.9)$$

puis en passant au déplacement :

$$\delta(t) = \int \int a_c x(t) dt = \frac{-u \sin(\omega t)}{m_t} \quad (3.10)$$

et d'où est finalement extraite l'amplitude maximale de déplacement δ_p .

L'équilibrage du prototype n'est donc pas adéquat pour éviter totalement les bruits mécaniques lors de la rotation du moteur. L'approche d'oscillations asymétriques permet cependant de réduire cet effet, puisque le moteur oscille autour d'une vitesse constante basse de 150 rpm (2.5 Hz). De plus, à cette fréquence, l'équilibrage est théoriquement satisfaisant pour passer sous le seuil sensoriel de vibration, qui requiert un mieux que $u \leq 102.77$ gmm.

Par ailleurs, la relation entre les forces centripètes f_c et les couples τ_c est donnée par

$$\tau_c = f_c * h \quad (3.11)$$

où h est la hauteur moyenne de la force centripète par rapport à sa base. Cela correspond à la hauteur du débalancement dans le dispositif, ce qui donne un indice de la distribution de ce débalancement total entre la roue d'inertie et le rotor du moteur. Le débalancement provient ainsi à toutes fins pratiques à part égales du rotor du moteur et de la roue d'inertie, comme montré à la Fig.3.10. Une attention particulière doit donc être portée aux spécifications de balancement de l'actionneur choisi.

3.3 Conclusion

Ce chapitre a montré la stratégie de rétroaction utilisée ainsi que les étapes d'étalonnage nécessaires à une rétroaction haptique en boucle ouverte, notamment par l'ajustement des gains. La connaissance de la dynamique du système a permis de négliger les temps de montée ainsi que les effets de friction. Les bruits mécaniques potentiels par le débalancement, le couple d'encoche et la résonance sont également pris en considération et des mesures sont suggérées pour les atténuer. L'étalonnage est satisfaisant pour l'utilisation en boucle ouverte, d'après les requis adaptés aux capacités sensorielles tactiles.

Déphasage 90 deg

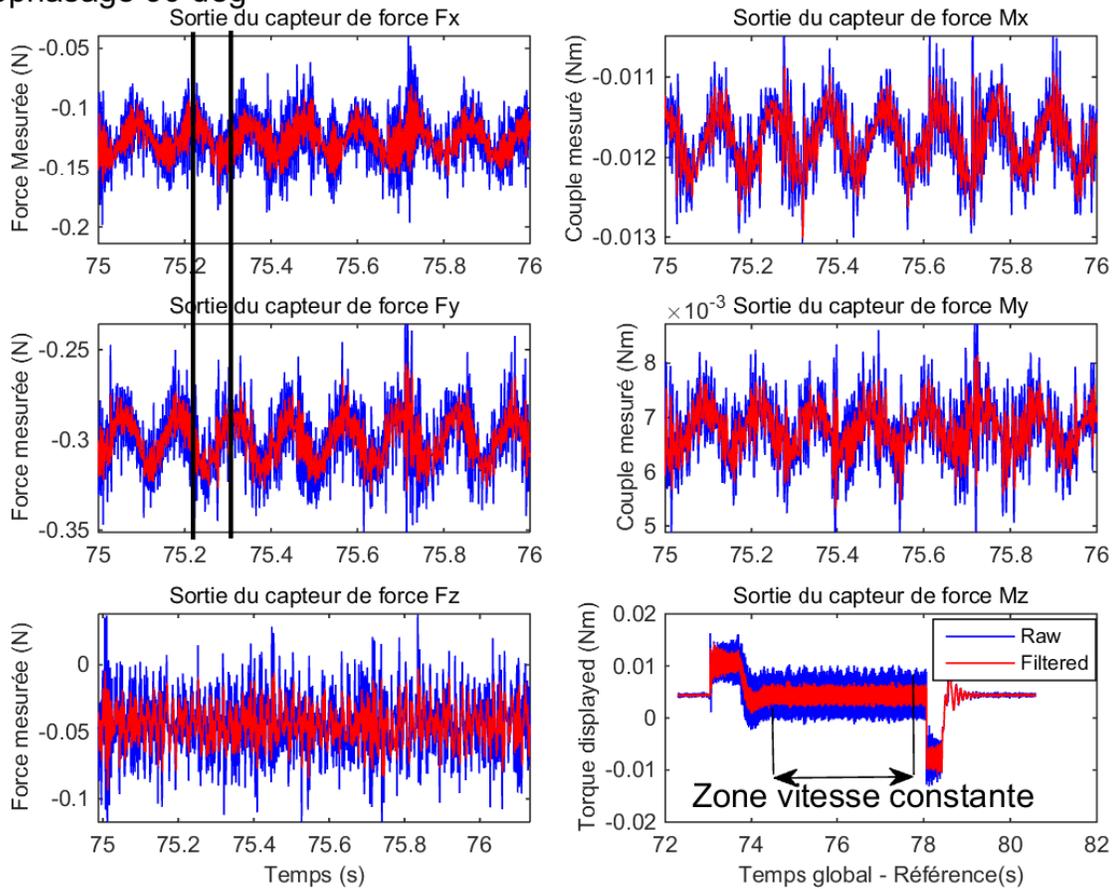


FIGURE 3.9 – Lectures des efforts de débalancement pour une rotation à vitesse constante. À droite, les forces F_x et F_y représentent les vibrations transversales, alors que le poids est supporté dans l’axe de F_z . M_z correspond à l’axe de rotation du moteur et le couple sert à maintenir la vitesse constante. Le couple autour des autres axes est causé par le débalancement des pièces mobiles. La moyenne des valeurs est ramenée à zéro pour le calcul.

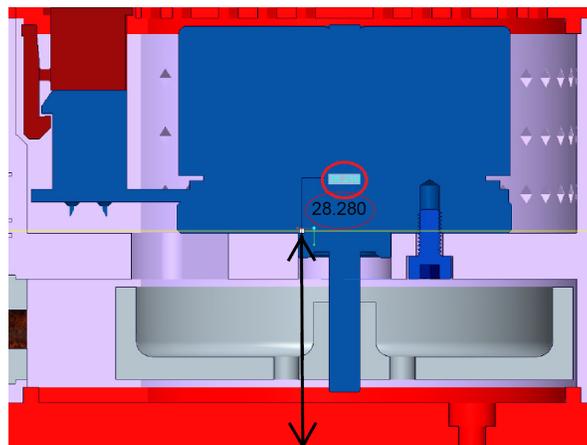


FIGURE 3.10 – La hauteur du débalancement h montrée avec le prototype. La source du débalancement est partagée entre la roue d’inertie et le rotor du moteur.

Chapitre 4

Évaluation des stimuli

La communication entre la boussole et l'ordinateur est dépendante des caractéristiques du signal haptique de rétroaction. Pour déterminer un mode de rétroaction efficace, on présente à des volontaires une variété de signaux. Plutôt que de comparer seulement la détection des signaux, comme dans [Antolini et al. \[2011\]](#) et [Amemiya \[2013\]](#), les tests sont bâtis pour mesurer aussi la performance pour la tâche spécifique d'orientation. L'évaluation des performances des signaux pour une tâche spécifiquement d'orientation donne une réponse plus représentative pour l'utilisation réelle [[Jones and Tan, 2013](#)], [[Kortum, 2008](#)].

Dans une première phase expérimentale, des plages de fréquences et de couples sont identifiées comme performantes pour la tâche. Le test suivant démontre l'efficacité d'un signal variable proportionnellement à la grandeur de l'erreur d'orientation, dans ces mêmes plages.

4.1 Éthique expérimentale

Dans les expériences impliquant avec des sujets humains, les questions d'éthique ont été prises en compte sous plusieurs aspects. En ce sens, les expérimentations à chaque étape du projet ont reçu l'approbation du comité d'éthique de l'Université Laval. Les protocoles expérimentaux n'impliquent virtuellement aucun risque de nature technique pour les utilisateurs, seuls demeuraient des requis de nature administrative. Ainsi, des formulaires de recrutement et de consentement ont été présentés aux sujets. Ceux-ci ont pour but d'assurer le consentement des participants et d'expliquer l'utilité de la recherche, leur permettant de comprendre comment les données seront utilisées et protégées. Un système de gestion confidentielle des données dénominatives a aussi été mis en place, avec des modalités de destruction à la fin du projet.

4.2 Évaluation multivariable

Ce test a permis d'identifier une plage de fréquences performante entre 5 et 15 Hz et de couple entre 40 et 100 mNm). Les résultats peuvent aussi être utilisés pour améliorer les paramètres de retour à

l'équilibre, en plus d'étrenner la méthode expérimentale.

4.2.1 Objectifs

Un test pilote avait exploré l'espace global des paramètres atteignables avec le prototype proposé. Il a permis d'identifier un sous-espace de paramètres où les stimuli sont ressentis adéquatement. Cependant, ce test ne permettait pas de connaître l'impact individuel de chaque paramètre. Donc, cette évaluation multivariable est conçue pour évaluer les tendances individuelles de chaque paramètre, un à la fois, à partir d'un stimulus de référence. Ce stimulus est tiré du sous-espace à haut taux de succès identifié précédemment.

L'approche expérimentale est une recherche exploratoire dans chaque direction autour du point de référence sur l'espace des paramètres. L'objectif est d'en dégager une méthode pratique pour la conception des stimuli. Il s'agit de trouver les plages d'opération où le succès est le plus élevé pour chaque paramètre : en fréquence f , couple τ et pente du pic δ . Le paramètre δ , expliqué en détail plus loin, représente une variante de forme de la fonction d'excitation.

4.2.2 Sujets

Dix volontaires, 9 hommes et 1 femme, tous âgés entre 21 et 50 ans, ont participé à l'expérience. Tous ont affirmé ne pas avoir connaissance d'un désordre des systèmes sensoriels tactiles ou kinesthésiques. Aucun n'était impliqué directement dans le projet. Trois d'entre eux avaient participé au test pilote auparavant.

Les séances expérimentales débutaient systématiquement par une présentation générale du projet et de son impact potentiel pour la société. Les sujets étaient informés de l'objectif de l'expérience : déterminer si le stimulus haptique présenté est efficace ou non pour la tâche spécifique d'orientation. En conséquence, ils étaient conscients qu'il n'y a ni bonne ni mauvaise réponse, puisque les stimuli sont le sujet d'évaluation, non pas leurs capacités sensorielles individuelles. Pour renforcer ce concept, il est mentionné que certains stimuli fournis sont volontairement sous le seuil sensoriel pour fins de validation. Toutes ces précautions ont pour objectif que le sujet ne se sente pas jugé pour ses performances et pour offrir un cadre propice pour qu'il réponde librement, en toute honnêteté.

Pour cette expérience, les sujets sont assis et leur orientation est représentée par la rotation d'un bouton. Cette approche a été choisie pour simplifier le montage expérimental et accélérer la prise de résultats. Le système de caméras tridimensionnel Vicon mentionné plus tôt est utilisé ultérieurement dans la preuve de concept.

Le potentiomètre choisi pour être attaché au bouton qui représente l'orientation lors des essais fixes a une amplitude angulaire d'environ 320° . En l'utilisant comme un diviseur de tension dont la tension analogique variable est lue par le contrôleur Elmo, l'information peut être filtrée et utilisée dans le contrôleur RT-Lab. La tension est transformée en orientation relative à un point de base, dont la référence peut être rafraîchie à l'aide d'une commande dans l'interface.

Les participants agrippent le prototype à une main, généralement la main dominante. Avec l'autre main, il leur est demandé d'orienter le bouton réponse dans la bonne direction, à l'aide de la boussole qui les dirige vers la gauche ou la droite. Pour les mettre dans le contexte, ce bouton rotatif est une représentation virtuelle de leur orientation, corrigée par la boussole. Le retour du bouton émule donc l'orientation virtuelle du participant dans un environnement virtuel.

Le montage est montré à la Fig.4.1. Le test débute par une brève période d'entraînement, afin de se familiariser avec l'utilisation du bouton et comprendre le comportement de la rétroaction. Cet apprentissage dure aussi longtemps que nécessaire pour être confortable (généralement 2 – 3 min), mais pas plus de 5 min. Les sujets pouvaient voir et entendre durant le test. Ils n'étaient pas informés des mesures spécifiques qui évaluent leur performance. Pour chaque stimulus, la tâche consiste à trouver la bonne orientation, dans laquelle la boussole cesse d'envoyer une rétroaction de correction. Ensuite, il leur était demandé d'évaluer qualitativement le stimulus entre 10 (excellent) et 1 (mauvais) à la question : « Quelle était l'utilité de ce signal pour trouver la bonne direction ? ». Le choix d'utiliser un bouton au lieu de l'orientation corporelle est justifié par la simplicité de développement de cette solution ainsi que leur similarité conceptuelle. En effet, dans l'optique de décortiquer le problème en sous-composantes, la qualification de stimuli tactiles est distincte de la conception d'un capteur de l'orientation. Afin d'accélérer le processus de design haptique, un capteur de rétroaction simple initialement permet de compiler rapidement des résultats sur les sens tactiles. La similitude conceptuelle pour l'utilisateur est élevée, puisqu'il s'agit de déceler, comprendre et agir sur l'orientation dans les deux cas. Ainsi, ces considérations permettent de considérer que les tendances globales seront les mêmes et que les résultats peuvent être transposés avec discernement.

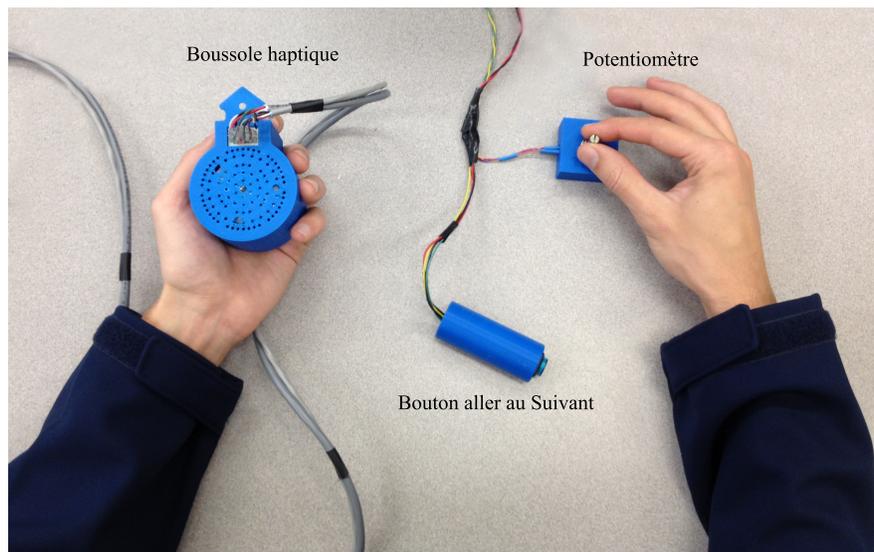


FIGURE 4.1 – Montage expérimental pour la qualification des stimuli. La boussole produit les signaux haptiques et donne une rétroaction sur l'orientation du bouton jusqu'à ce que la direction consigne soit atteinte.

4.2.3 Stimuli présentés

Puisqu'il s'agit d'explorer l'espace des paramètres haptiques, chaque variable est manipulée indépendamment autour du point de référence. Ce jeu de paramètres a été préalablement identifié dans le test pilote à $\tau = 30$ mNm, $f = 1$ Hz, $\delta = 0$ mNm, $\tau_w = 7.5$ mNm. Chaque variable est testée dans les plages suivantes :

- Amplitude du couple τ , entre 2.5 et 70 mNm. Ces limites sont déterminées par les limites mécaniques du prototype.
- Couple de retour à l'équilibre τ_w , déterminé avec $\tau_w = \tau/4$. Ce ratio utilisé est choisi d'après son efficacité reportée dans Antolini et al. [2011].
- Fréquence f , entre 0.5 et 30 Hz. La limite inférieure permet de conserver un jeu relativement au temps maximal d'exposition du couple t_{max} . Le maximum de 30 Hz est déterminé suite à la baisse marquée de sensation directionnelle pour les fréquences au-delà.
- La pente du pic de couple δ , entre -30 et $+30$ mNm entre le début et la fin du temps d'exposition. Le couple moyen produit demeure à $\tau = 30$ mNm. En termes de saccade (« jerk »), cette variation représente par exemple 150 mNm/s pour un stimulus à 1 Hz.

L'échantillonnage choisi pour chaque variable porte le nombre total de signaux testés à 30 essais. Cette grande quantité de combinaisons de paramètres a contraint la recherche à une seule présentation de chaque signal par sujet. Ce nombre donne un total insuffisant d'essais par stimulus pour une analyse statistique formelle, mais fournit des tendances utiles pour le design. Déjà avec une présentation par signal, le temps total de l'expérience est de 30 minutes, incluant l'installation, la pratique et l'acquisition de données en tant que telle.

Afin de réduire l'éventuel effet d'apprentissage sur les résultats, chaque sujet a effectué l'une des trois séries distinctes de tests. L'ordre dans chacune de ces séries avait été déterminé aléatoirement, de telle sorte que l'apprentissage est réparti relativement équitablement parmi les tests. Il aurait été possible d'utiliser un ordre aléatoire individuellement pour chaque test, une approche qui finalement n'a pas été retenue pour des considérations techniques.

4.2.4 Critères d'analyse

Pour évaluer la performance spécifique à la tâche d'orientation, des indices de performance ont été créés. Ainsi, trois critères principaux ont été identifiés ci-dessous pour déterminer si la tâche d'orientation est couronnée de succès. Une analyse type d'un essai est présentée à la Fig.4.2.

- Le premier mouvement est dans la direction correcte, ce qui montre que la sensation directionnelle est adéquate.
- Le temps de convergence est bas, ou si le sujet réussit à converger à l'orientation consigne en moins de 13 s. Cette valeur trouvée dans le test pilote permet de différencier s'il s'agit d'une recherche guidée par le dispositif ou par essai-erreur.

Essai typique

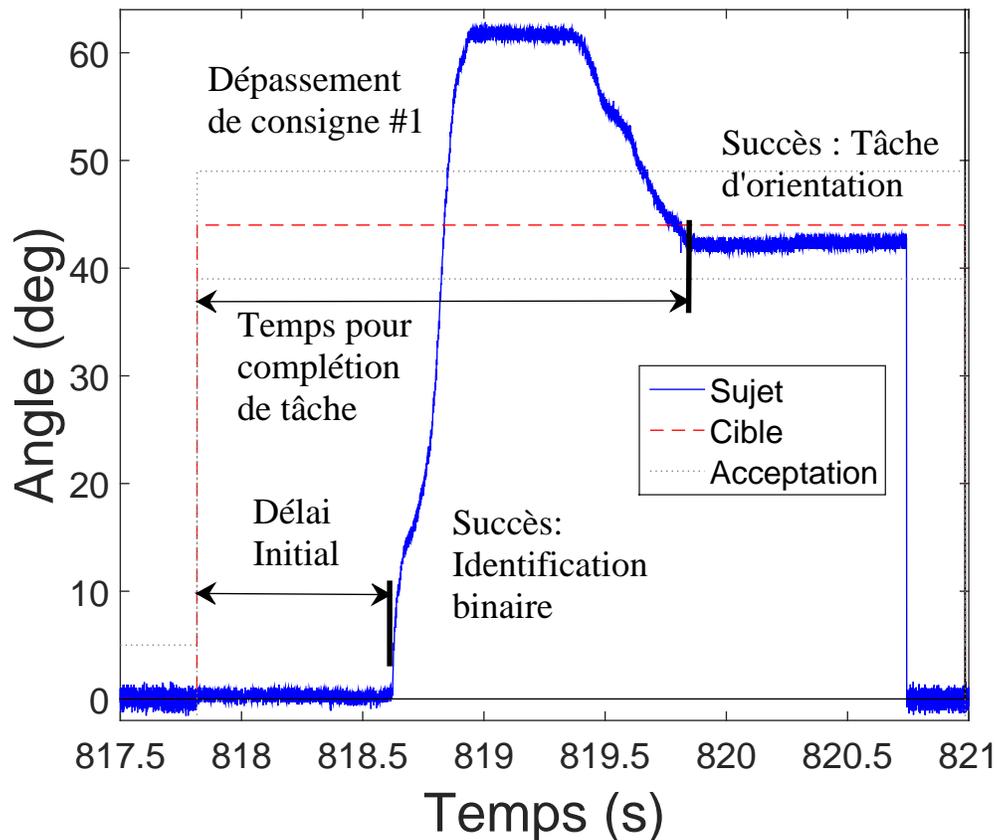


FIGURE 4.2 – Extraction des critères d'évaluation de la tâche d'orientation à partir du parcours en angle du bouton, représentant l'orientation du sujet. Ici, la consigne d'angle représente un déplacement de 45° vers la droite. Le sujet complète la tâche en environ 2 s.

- Le nombre de changements de direction (overshoots) est inférieur à quatre, ce qui montre que l'utilisateur discerne le changement de rétroaction caractéristique au dépassement de l'objectif.

La bonne direction dès le premier mouvement est interprétée comme une identification binaire, c'est à dire qu'un signal « aller à gauche » entraîne une réponse de mouvement vers la « gauche ». L'identification binaire est identique à la condition de test à deux alternatives et choix forcé (two-alternative forced choice) utilisée par Antolini et al. [2011], Amemiya [2013]. Le critère de succès de la tâche d'orientation est dérivé de ces critères principaux, il demande un succès sur chacun dans tous les aspects de la tâche. Les résultats d'identification binaire et de succès de la tâche sont tous deux présentés afin de permettre une comparaison plus facile avec la littérature.

Le temps de convergence à l'objectif (ou temps de fin de tâche) et le temps avant le premier mouvement (ou délai d'hésitation) ont tous deux été mesurés et sont des indicateurs de la capacité de déduction d'informations à partir du stimulus haptique. Le délai d'hésitation représente le temps que met l'utilisateur à réagir à partir du signal de rétroaction. Pour une communication efficace, ce délai

est idéalement le plus bas possible. Le temps de fin de tâche est l'un des critères du succès de la tâche d'orientation, s'il est inférieur à la limite de 13 s. Il s'agit également d'un indice très révélateur sur l'efficacité à accomplir cette tâche. En effet, dans un contexte d'orientation en environnement réel, une rapidité d'exécution de la réorientation se traduit directement en diminution du temps de transport.

Finalement, les évaluations qualitatives allant de 1 à 10 sont transformées en évaluation par catégories pour chaque participant pour éviter les biais de centrage, contraction et d'espacement Jones and Tan [2013]. En effet, lorsqu'un participant qualifie son expérience, il n'utilise pas nécessairement la même valeur moyenne (centrage), ni la même plage de valeur qu'un autre participant. Par exemple, un participant A pourrait donner une valeur de 7 à la plupart des tests, 9 aux meilleurs et 5 au pire test. Le participant B, lui, donne 5 à la plupart des tests, 4 au pire et 7 au meilleur. Il est évident qu'une moyenne arithmétique ne donne pas une représentation de la signification de ces valeurs. Pour ce faire, pour chaque participant, les résultats sont triés en catégorie « meilleurs » (20%), « moyen » (60%) et « mauvais » (20%). Ce calcul permet de réduire les biais entre les personnes en donnant une évaluation relative entre les signaux, mais diminue la résolution de l'évaluation. Une moyenne est finalement effectuée sur chaque signal en donnant un pointage par catégorie : meilleur (3), moyen (2) et mauvais (1).

4.2.5 Résultats

À partir des critères d'analyse développés plus haut, les résultats colligés et présentés sont les suivants :

- Le taux d'identification binaire, qui montre, pour un stimulus donné, la proportion de sujets dont les réponses directionnelles sont cohérentes avec la sensation envoyée dès le début du test.
- Le taux de succès pour la tâche d'orientation, tel que défini ci-haut, est l'amalgame de trois critères.
- Le temps de convergence à l'objectif moyen, qui donne un estimé de l'efficacité pour arriver à l'objectif.
- Le délai d'hésitation initial moyen, qui donne une idée globale du temps nécessaire à réagir suite à l'exposition au stimulus.
- L'évaluation qualitative pondérée parmi les sujets.

Ces résultats sont étudiés pour les variations de chaque paramètre afin de déterminer le domaine efficace pour la tâche.

Pente du pic de couple

L'effet de la pente du pic de couple est étudié autour des paramètres de référence avec $\tau = 30$ mNm, $f = 1$ Hz, $\delta = 0$ mNm, $\tau_w = 7.5$ mNm. Le couple moyen τ demeure constant à $\tau = 30$ mNm. L'éventail de pentes testées va entre ± 30 mNm, donc dans les deux directions. Cette variation est linéaire sur la durée du pic d'environ 0.2 s, soit quelque ± 150 mNm/s. Un exemple de valeur positive de pente δ sur le stimulus haptique est montré à la Fig.3.3.

Les variations de δ n'a pas d'effet notable sur les résultats. Les résultats moyens pour les δ positifs, constants (i.e. $\delta = 0$) et négatifs sont montrés dans la Tab.4.1. L'évaluation qualitative est elle aussi indifférente aux différentes pentes.

TABLE 4.1 – Effet de la pente du pic de couple, δ , sur le taux de succès de la tâche d'orientation et d'identification binaire, les temps de complétion de la tâche et d'hésitation initial ainsi que sur l'évaluation qualitative.

Regroupement par type de pente δ			
Taux d'identification binaire	0.967	1	0.967
Taux de succès de la tâche	0.833	0.85	0.867
Temps de complétion de tâche	8.4	9.6	10.2
Temps d'hésitation initial	3.4	3.2	3.5
Évaluation qualitative	2.3 / 3	2.4 / 3	2.2 / 3

Fréquence

Les fréquences testées varient entre 0.5 Hz et 30 Hz. L'influence de la fréquence à laquelle les impulsions sont produites sur les deux taux de succès est montrée à la Fig.4.3. Les taux d'identification binaire sont d'au moins 90 % pour l'intervalle 0.5 – 15 Hz et décroissent graduellement pour les fréquences supérieures. Le taux de succès pour la tâche d'orientation est d'au moins 80% dans la plage de 5 à 15 Hz.

Les temps moyens d'hésitation initiale et de réalisation de la tâche en fonction de la fréquence sont illustrés à la Fig.4.4. Le temps avant le premier mouvement montre peu de variation sur l'étendue des fréquences testées. Le temps requis pour compléter la tâche d'orientation est en moyenne de 7.5 s dans l'intervalle le plus couronné de succès, avec un minimum apparent autour de 12.5 Hz. Les temps requis augmentent aussi significativement lorsque la fréquence diminue sous 5 Hz.

Les évaluations qualitatives moyennes sont au-dessus de la moyenne (2.2 / 3) pour l'étendue de 0.5 Hz à 15 Hz. Au-delà de 20 Hz, les résultats qualitatifs sont tous inférieurs ou égaux à (1.8 / 3).

Amplitude du couple

L'amplitude des couples est systématiquement testée dans l'intervalle entre 2.5 mNm et 70 mNm. Les taux de succès d'identification binaire et de réalisation de la tâche sont affectés, comme le montre la Fig.4.5. Le taux d'identification binaire est d'au moins 90% pour les amplitudes supérieures à 10 mNm. La tâche d'orientation est réussie à $\geq 80\%$ lorsque les amplitudes sont supérieures à 50 mNm.

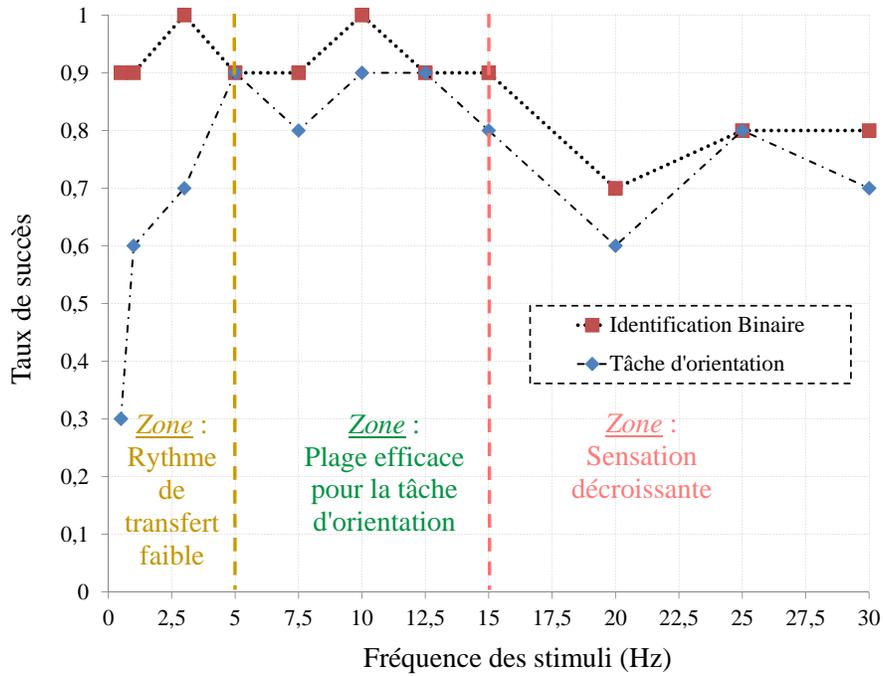


FIGURE 4.3 – L’effet de la fréquence des impulsions f sur les taux d’identification binaire et de succès pour la tâche d’orientation. Les autres paramètres sont maintenus à $\tau = 30$, $\delta = 0$ et $\tau_w = \tau/4$.

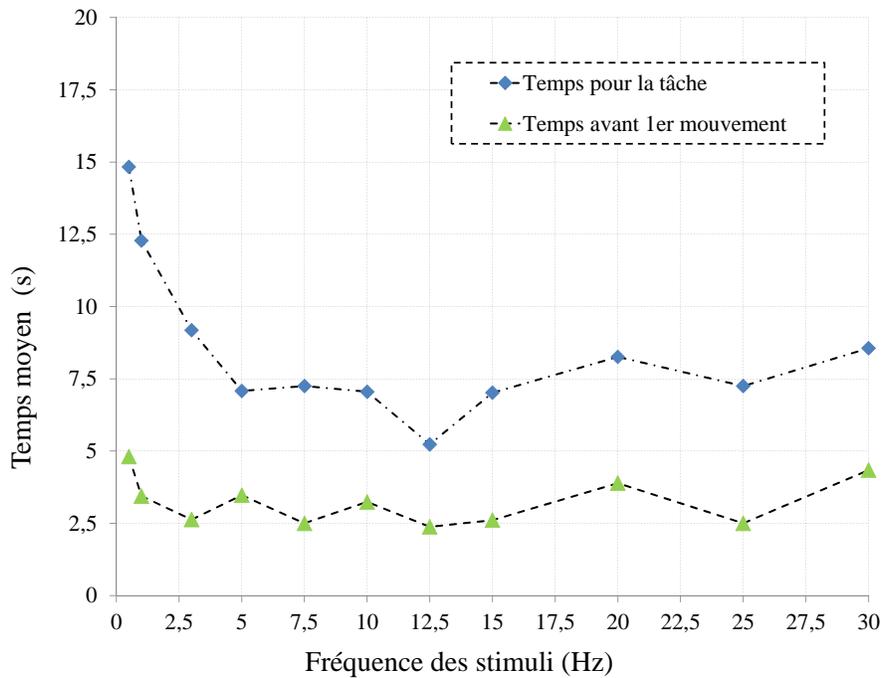


FIGURE 4.4 – L’effet de la fréquence des impulsions f sur le temps d’hésitation initial et les temps de complétion de la réorientation. Les autres paramètres sont maintenus à $\tau = 30$, $\delta = 0$ et $\tau_w = \tau/4$.

La mesure moyenne des temps en fonction de l'amplitude du couple est montrée à la Fig.4.6. Le temps d'hésitation est stable à environ 3 s pour les amplitudes de 20 à 60 mNm et s'élève jusqu'à 9 s à faible amplitude. Les temps moyens pour la convergence d'orientation aux amplitudes inférieures à 20 mNm sont supérieurs à 11 s. Ce temps requis pour la tâche décroît comme l'amplitude augmente et les meilleurs temps sont enregistrés aux amplitudes supérieures ou égales à 50 mNm.

Les résultats de l'évaluation qualitative pondérée par catégories montre que les amplitudes favorites sont élevées, avec un optimum apparent autour de 40 à 50 mNm. La courbe complète est montrée à la Fig.4.7.

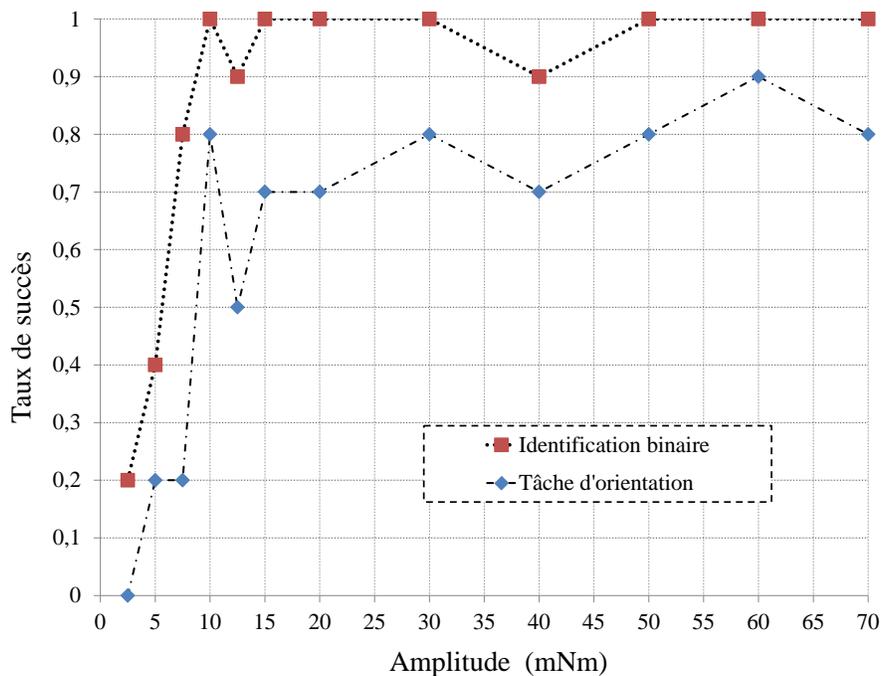


FIGURE 4.5 – L'effet de l'amplitude du couple τ sur le taux d'identification binaire et sur le taux de succès de la tâche d'orientation. Les autres paramètres sont maintenus constants à $f = 1$, $\delta = 0$ et $\tau_w = \tau/4$.

4.2.6 Discussion

Évaluation de la méthodologie

En premier lieu, les participants étaient en mesure de voir et d'entendre durant le test. La combinaison de l'haptique avec ces autres sens peut donner des indices supplémentaires qui aideraient à la tâche. L'impact des déductions multi-sensorielles devrait être pris en considération et est à atténuer lors d'expériences futures, puisque l'objectif est de déterminer l'impact de la rétroaction haptique.

Ensuite, bien que la plupart des sujets saisissent le dispositif en main comme à la Fig.2.2, ils étaient libres de la prendre à leur guise. Différentes prises de la main peuvent certainement se refléter dans les résultats entre les sujets, puisque l'interaction entre la boussole et le système sensoriel en est affecté.

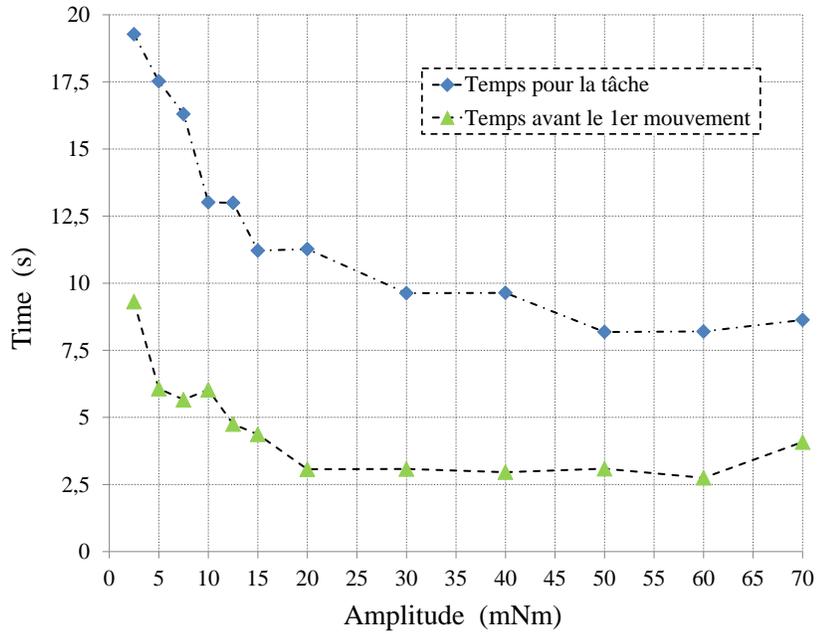


FIGURE 4.6 – L’effet de l’amplitude du couple τ sur le temps d’hésitation initial et les temps de complétion de la réorientation. Les autres paramètres sont maintenus constants à $f = 1$, $\delta = 0$ et $\tau_w = \tau/4$.

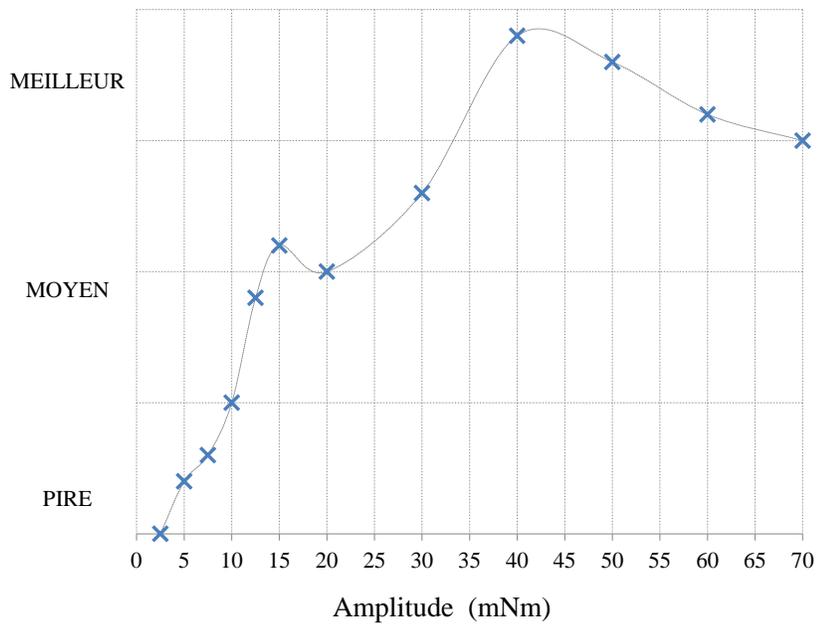


FIGURE 4.7 – Évaluation qualitative sur l’utilité de la rétroaction haptique pour s’orientation en fonction de l’amplitude du couple τ . Les autres paramètres sont maintenus constants à $f = 1$, $\delta = 0$ et $\tau_w = \tau/4$.

La posture globale durant ces tests est assise à un bureau, typiquement avec un coude appuyé au bureau. Il est possible que la sensation soit affectée par une position du corps différente, par exemple en position debout ou lors de la marche avec ou sans support du bras. Cette problématique potentielle est validée ultérieurement dans l'expérience complète, avec les tests concluants en situation de marche.

Cette expérimentation visait à établir des lignes directrices pour la conception de dispositifs haptiques à vocation d'orientation humaine. Chaque stimulus était présenté une seule fois par sujet. À partir de ces résultats, la recherche de paramètres idéaux pour les stimuli de rétroaction peut être réduite à ce sous-domaine dans une étude ultérieure. Une trentaine de répétitions d'un nombre réduit de conditions de tests pourraient alors être effectuées dans une durée de test raisonnable, afin de les discriminer avec une robustesse statistique satisfaisante. En conséquence, ces résultats doivent être considérés uniquement comme des tendances macroscopiques dans une recherche de paramètres dans l'espace global des paramètres. Les conclusions sont donc utiles pour la conception de dispositifs haptiques portatifs générant des signaux asymétriques. En effet, cette expérience met en lumière des plages de fréquences et de couples permettant un taux de succès élevé pour la tâche d'orientation, ainsi que pour la problématique plus globale de transmission d'informations haptiques entre la machine et l'humain.

Effet de la pente du pic de couple

Les résultats ne montrent pas d'effet significatif de la pente du pic du couple δ autour des paramètres de référence. Il semble, à priori, que la dérivée du couple soit d'importance dans la sensation tactile, bien que ce résultat n'en prouve rien. La fréquence utilisée dans ces essais était de 1 Hz : une recherche exhaustive dans l'espace des paramètres pourrait révéler d'autres tendances. Une plus grande représentativité statistique pourrait aussi permettre de discerner une tendance significative.

Effet de la fréquence

Les résultats montrent que le prototype proposé devrait produire une rétroaction haptique d'orientation dans la plage de 5 à 15 Hz.

L'ensemble des fréquences inférieures à 15 Hz sont ressenties clairement. Cependant, la lenteur des signaux sous la barre des 5 Hz augmente proportionnellement le temps requis pour la tâche d'orientation. Cela peut s'expliquer par le concept de taux de transfert d'information, qui est affectée linéairement par la fréquence de transmission Stanney [2002]. Il en résulte qu'une communication lente réduit l'efficacité pour accomplir la tâche. Au sujet des fréquences les plus basses, des utilisateurs commentaient qu'ils se sentaient continuellement en attente de l'information, ce qui ralentissait l'orientation.

C'est d'ailleurs principalement un excès de temps pour accomplir la tâche qui explique une diminution nette du taux de succès pour les fréquences les plus basses. En effet, le taux d'identification binaire à basse fréquence demeure élevée, ce qui prouve que la sensation directionnelle demeure claire et n'est conséquemment pas en cause.

Quant à eux, les résultats à partir de 20 Hz montrent une diminution de la sensation directionnelle.

Le test pilote corrobore aussi ces résultats, puisque les taux d'identification binaire étaient inférieurs à 60% aux fréquences de 35 et 50 Hz. Ces résultats montrent résolument que la sensibilité haptique directionnelle diminue lorsque la fréquence d'excitation augmente au-delà d'une certaine limite [Amemiya et al., 2008].

Effet de l'amplitude du couple

Les couples haptiques de conception à privilégier pour la tâche d'orientation devraient inclure des amplitudes τ supérieures à 40 mNm.

Les amplitudes sous 5 mNm semblent être complètement sous le seuil de sensation tactile, puisque moins de 50% des identifications binaires sont correctes. À ces niveaux d'amplitude, les perturbations du système mécanique ont un effet important qui peut nuire à la clarté du signal. La confiance à accorder à ces conclusions doit être modulée en conséquence. En effet, la friction 1.74 mNm, les couples d'encoche de 2.5 mNm y sont des forces dominantes et perceptibles. Or, le seuil acceptable dans les requis avait été fixé à 10% de l'amplitude, suivant la fraction de Weber de l'ordre de 10% Jones and Tan [2013].

Les couples situés entre 5 et 15 mNm sont dans une zone de transition où la perception est incertaine. Ce résultat mitigé a comme source la nature statistique du seuil sensoriel, situé à un taux prédéfini de succès, typiquement entre 70% et 80% Jones and Tan [2013]. D'autre part, il peut s'expliquer par la variabilité du seuil sensoriel dans la population des utilisateurs. Ces couples seront donc à éviter si l'intention de conception est la fiabilité de la communication haptique. Cette transition s'étend dans l'intervalle de 15 – 30 mNm, où la direction est ressentie clairement par les participants, mais où l'interprétation de l'information est plus fastidieuse, comme en témoignent les temps d'hésitation initiale plus élevés. Les sujets avaient aussi tendance à traverser l'orientation objectif sans ressentir le changement de direction de la rétroaction immédiatement. Cette observation est confirmée par le nombre relativement plus grand de dépassements d'objectif (overshoot) pour les couples dans cet intervalle.

Les essais avec des couples élevés, comme à 70 mNm, voient apparaître un léger déclin de performance. Cette tendance légère est également mise en relief par la diminution des évaluations qualitatives et l'augmentation du délai avant le premier mouvement. Cette observation contraste avec la littérature Amemiya [2013] et ne se reflète pas dans le taux d'identification binaire. Une cause possible de cette contre-performance est l'emploi d'un ratio constant entre le couple du signal haptique τ et le couple de retour τ_w . La relation posée à $\tau/\tau_w = 4$, était proposée par Antolini et al. [2011] comme un facteur d'importance pour la performance de l'identification directionnelle avec des couples asymétriques, ou identification binaire. Cependant, les expériences conduites par Antolini et al. [2011] n'emploient que des couples $\tau \leq 60$ mNm et $\tau_w \leq 17$ mNm. Or, la plage de couples atteignables par le prototype ici proposé s'étend au-delà de ce cadre expérimental, puisque les couples sont testés jusqu'à $\tau = 70$ mNm. En conservant ce même ratio de 1 : 4 pour le couple de retour τ_w , il est probable que

celui-ci dépasse le seuil de perception humaine autour de 10 – 15 mNm. L'utilisateur pourrait donc ressentir la poussée dans les deux directions, atténuant l'illusion asymétrique. En conséquence, le ratio entre le couple d'excitation τ et le couple de retour τ_w doit être adapté de telle sorte que τ_w demeure sous la limite sensorielle même avec de grandes amplitudes d'excitation.

4.2.7 Résumé des déductions

Cette expérience fournit des lignes directrices utiles pour la conception ultérieure de stimuli haptiques pour la tâche d'orientation. Elle couvre un vaste espace de paramètres, avec 30 combinaisons de paramètres testées. Il en ressort que la pente du pic semble avoir peu d'effet sur la performance, que la fréquence f devrait se situer autour de la plage 5-15 Hz et que l'amplitude du couple τ doit être supérieure à 40 mNm, avec un couple de retour τ_w adapté.

4.3 Stimulus Proportionnel

Au lieu de continuer l'évaluation multivariable dans les plages restreintes trouvées pour lui donner davantage de valeur statistique, un autre concept de rétroaction a été exploré. La connaissance de l'efficacité des paramètres avec une approche statistique aurait nécessité des ressources importantes pour un faible gain escompté de performance pour la tâche. La stratégie originale, soit mieux connaître les propriétés sensorielles dans les zones de design, a donc été remplacée par la stratégie d'utiliser un stimulus variable en fonction de l'écart d'orientation jusqu'à l'objectif. Cette option a été jugée plus pertinente à tester, puisque un signal variable transmet une informations plus riche, ce qui améliorerait la performance à priori.

4.3.1 Objectifs

L'évaluation multivariable décrite précédemment a mis en évidence des intervalles d'amplitude et de fréquence utiles pour la tâche d'orientation. Se basant sur les résultats précédemment obtenus, les paramètres de couple τ supérieurs à 40 mNm et de fréquence f dans l'intervalle 5 – 15 Hz sont utilisés dans la construction de la rétroaction haptique. Ce test démontre l'efficacité d'une stratégie à stimulus variable proportionnellement à l'écart d'orientation par rapport à la consigne.

4.3.2 Sujets

Dix volontaires, 8 hommes et 2 femmes, tous âgés entre 23 et 28 ans, ont participé à l'expérience. Ils ne présentaient aucun désordre du système sensoriel tactile connu. Certains d'entre eux avaient déjà participé à une expérience précédente. Le protocole de test a été approuvé par le comité d'éthique de l'Université Laval.

Les sujets sont informés de l'objectif de l'expérience, soit de déterminer si le signal haptique présenté est efficace ou non pour la tâche d'orientation. Comme précédemment, il est clair qu'il n'y a pas de jugement relatif à leur performance individuelle.

À chaque test, leur tâche est d'atteindre une orientation donnée à l'aide de la rétroaction tactile fournie par le prototype de boussole. Trois types de signaux distincts sont comparés : uniforme, proportionnel positif et proportionnel négatif. Ces signaux sont expliqués en détail à la section suivante. Une période d'entraînement initial de ± 5 min avec le dispositif permet de se familiariser avec les signaux tactiles, à l'usage du potentiomètre et de l'appareillage de test. Les trois types de signaux sont aussi testés durant cette pratique afin de bien comprendre leur fonctionnement. Les sujets ne sont pas au courant des mesures spécifiques ni des critères de performances évalués.

Les participants tiennent le dispositif à une main, généralement la main dominante. Leur orientation est représentée par le bouton réponse (potentiomètre), manipulé par l'autre main. Aussi, le bouton suivant permet de passer au test suivant lorsque la consigne est atteinte.

4.3.3 Stimuli présentés

Les stimuli présentés sont asymétriques et similaires à ceux utilisés jusqu'à présent. La stratégie de rétroaction implique un changement de fréquence et de couple proportionnelle à l'erreur d'orientation. Les fréquences f et les couples τ sont déterminés avec les relations suivantes :

$$f = p_f \varepsilon + b_f, \tau = p_\tau \varepsilon + b_\tau \quad (4.1)$$

avec ε l'erreur d'orientation et b_f, b_τ des constantes. Trois types de proportionnalités sont comparées : positive ($p_x > 0$), négative ($p_x < 0$) et constante ($p_x = 0$). Une variante de ces modes est aussi testée : soit seule la fréquence suit cette règle de proportionnalité, ou la fréquence et le couple sont tout deux proportionnels à l'erreur d'angle ε . Pour le mode constant, les paramètres haptiques sont fixés à $f = 5$ Hz et $\tau = 50$ mNm, avec $p_f = p_\tau = 0$.

Les modes de proportionnalité sont illustrés à la Fig.4.8 pour les fréquences. Le même principe est utilisé pour les amplitudes. La zone morte au centre correspond à la tolérance d'acceptation de la réponse.

Afin d'expliquer ces concepts à l'utilisateur dans un langage simple, une analogie est faite entre le comportement de ces signaux et un modèle mental préexistant. La conception de ces types de signaux est calquée sur des expressions culturelles familières pour en simplifier la compréhension pour l'utilisateur. Le signal négatif (« brûlant ») peut être associé aux indications données lorsqu'une personne cherche un objet et s'en approche : « tu brûles, tu brûles ». De la même façon, l'intensité du signal à proportionnalité négative (f et τ) augmente graduellement à l'approche de l'orientation recherchée. Le signal de positif (« calme »), à l'inverse, est présenté comme s'il fallait apaiser le dispositif en lui donnant ce qu'il veut. Ainsi, le signal à proportionnalité positive s'atténue comme il s'approche de l'objectif, jusqu'à être complètement passif. Il devient donc calme, ou « refroidit ». Dans les deux cas, la rétroaction haptique est nulle lorsque l'orientation est dans la zone d'acceptation. L'expérimentation a montré que décrire la sensation en termes d'intensité globale est aisément compréhensible par les sujets, à l'aide de ces références.

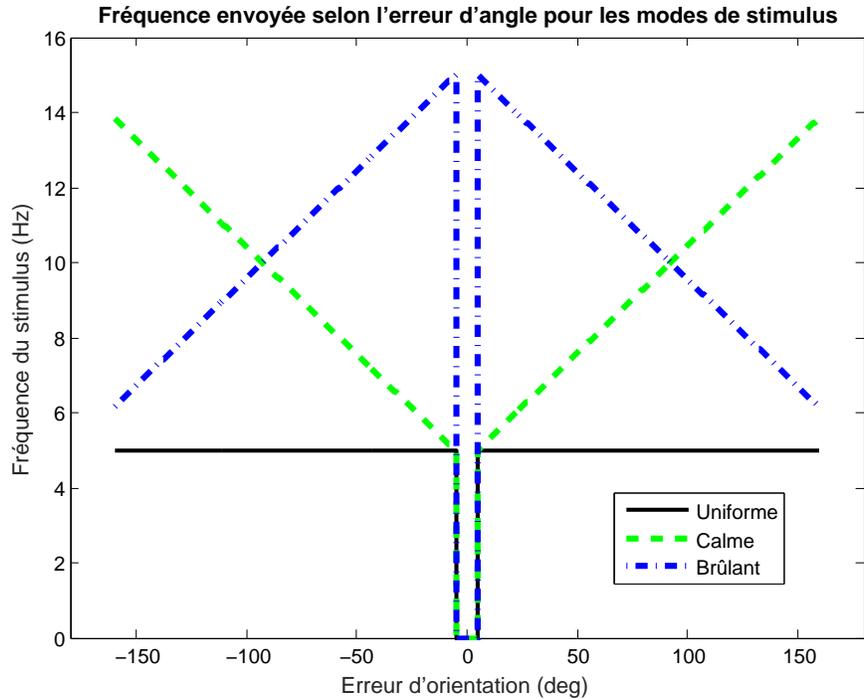


FIGURE 4.8 – Les trois types de stimuli étant comparés dans l’expérience : constant sans égard à l’erreur d’orientation, positif (calme) et négatif (brûlant). Dans tous les cas, le signal s’arrête complètement lorsque la bonne orientation est rejointe.

Dans un autre ordre d’idées, on peut remarquer que les modes explorés utilisent une valeur p_f et p_τ du même signe. Cela signifie que l’intensification ou l’adoucissement du signal est dans la même tendance pour la fréquence et le couple. Ces combinaisons de tendances opposées n’ont pas été incluses à l’expérience puisqu’elles étaient contre-intuitives lors des essais de préliminaires. Par exemple, une amplitude de couple croissante à l’approche de la consigne tandis que la fréquence diminue n’était pas utilisable intuitivement.

Le test est séparé en 6 blocs consécutifs contenant le même nombre de stimuli présentés, pour distribuer l’effet de l’apprentissage équitablement. Chaque bloc est composé de séquences comme suit, avec 25 essais par bloc pour un total de 150 essais :

- 5 essais avec stimuli constants, où la fréquence et le couple demeurent constants,
- 5 essais en mode positif, la fréquence est proportionnelle et le couple demeure constant,
- 5 essais en mode positif, la fréquence et le couple sont proportionnels positivement,
- 5 essais en mode négatif, la fréquence est proportionnelle et le couple demeure constant,
- 5 essais en mode négatif, la fréquence et le couple sont proportionnels négativement.

Un couple τ constant est fixé à 50 mNm. Un couple variable est contenu dans la plage entre 40 et 95 mNm. Une fréquence f constante est fixe à 5 Hz. Une fréquence variable est contenue dans la plage entre 5 et 15 Hz.

Les participants sont informés verbalement par l'expérimentateur du type de rétroaction qui sera fournie, au début de chaque séquence. L'orientation à rejoindre est déterminée aléatoirement à chaque essai et se trouve entre $35 - 95^\circ$ à gauche ou à droite. Le participant tente de trouver la bonne direction en tournant le bouton réponse et appuie sur le bouton « suivant » lorsqu'il croit avoir convergé. L'essai suivant débute après une pause de 2 s.

4.3.4 Critères d'analyse

Comme dans les tests précédents, l'évaluation de la performance des signaux est basée sur l'efficacité pour accomplir la tâche d'orientation. Les critères de mesure sont les mêmes que dans l'évaluation multivariable et sont expliqués à la Fig.4.2. Les critères d'identification binaire, de succès de la tâche, du temps d'hésitation et le temps de convergence à l'objectif sont extraits à partir du signal du bouton d'orientation.

4.3.5 Résultats

Les valeurs moyennes des résultats expérimentaux pour chaque critère observé sont présentés dans la Tab.4.2. Les résultats montrés sont les moyennes, mais la distribution intégrale est utilisée pour déterminer si les performances des types de rétroaction sont significativement différentes entre elles.

En effet, les résultats sont comparés en utilisant l'analyse de variance, ou ANOVA, avec un plan à blocs complètement aléatoires. Le type de stimulus est considéré comme un facteur fixe et le sujet est un facteur aléatoire. Les résultats sont considérés significatifs lorsque $p < 0.05$, ce seuil étant typique dans la littérature sur l'haptique.

L'analyse ANOVA est réalisée avec le soutien technique du Service de Consultation Statistique de l'Université Laval. Des consultants qualifiés dans le domaine de la statistique ont guidé le choix des tests à effectuer (ANOVA) et guidé le choix du plan à utiliser en fonction de la problématique. Le calcul est effectué à l'aide du logiciel SAS 9.4, un logiciel de statistiques recommandé par ce service.

L'analyse ANOVA des taux de succès pour la tâche montre une différence significative entre les types de stimulus ($p < 0.021$). Une seconde analyse sur les temps de complétion de la tâche indique également une différence significative entre les types de signaux ($p < 0.0001$). Le type de signal n'a par contre pas d'impact significatif sur le taux d'identification binaire.

Pour étudier davantage les différences entre les signaux, chaque paire est combinée comme un ensemble et comparée avec ANOVA. Cette technique permet de mettre en évidence lesquels des ces sous-ensembles sont confondus et lesquels sont significativement distincts. Par la suite, avec un triage croissant en fonction de la valeur moyenne, un classement des types de signaux est possible. Ce classement n'est cependant pas un ordre distinct, puisque certains types de signaux sont confondus. Ce principe est illustré graphiquement à la Fig.4.9.

Le type de signal constant est seul dans sa catégorie, la moins performante de tous les signaux. Les

TABLE 4.2 – Valeurs moyennes des essais et de sujets pour les critères de succès de la tâche, par type de stimulus.

Type	Taux d'Identification Binaire	Taux de succès de la tâche d'orientation	Temps d'hésitation initial (s)	Temps de complétion de la tâche (s)
Constant	0.900	0.822	1.133	4.396
Positif - f	0.887	0.830	1.079	3.516
Positif - f & τ	0.950	0.933	0.921	2.758
Négatif - f	0.894	0.835	1.008	3.324
Négatif - f & τ	0.911	0.898	0.965	2.875

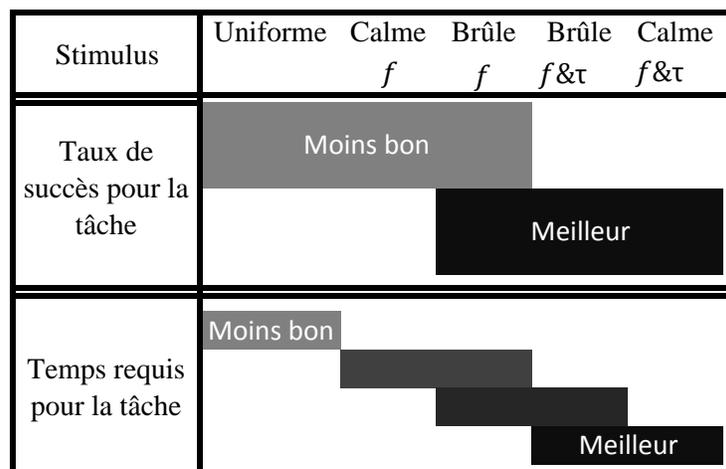


FIGURE 4.9 – Classement des types de signaux par les valeurs moyennes, en indiquant les sous-groupes où les résultats sont confondus. Chaque barre transversale montre que ces sous-ensembles ne présentent pas de différence significative ($p < 0.05$). Le classement est montré pour les taux de succès (dessus) et pour les temps de complétion (dessous) de la tâche.

types de stimulus utilisant seulement une proportionnalité de la fréquence f et un couple τ constant sont confondus entre eux. Ils sont cependant distincts des tests où la fréquence et le couple sont tous deux variables. Les signaux positifs et négatifs où le couple et la fréquence varient proportionnellement apparaissent dans le sous-groupe le plus efficace autant pour le temps de convergence que pour le taux de succès de la tâche. Il n'y a pas de différence significative entre ces deux types de rétroaction.

4.3.6 Discussion

Évaluation de la méthodologie

L'expérimentateur a pu s'assurer que les sujets conservent les yeux fermés en tout temps durant les essais, ce qui empêche l'utilisation du visuel. Cependant, puisqu'il fallait indiquer verbalement aux sujets quel type de rétroaction allait être utilisé, ils avaient la possibilité d'entendre tous les bruits ambiants. Ainsi, les sons produits par le prototype peuvent être une source d'erreur, puisque le sujet peut alors faire des déductions en combinant ces sens.

Le bouton « suivant » permet aux participants de contrôler le rythme de l'expérience, ce qui a été apprécié. Cela a également réduit le temps moyen passé pour chaque essai, passant à 7.2 s par essai, contre 22 s par essai dans les expériences précédentes. Cette amélioration permet de diminuer la durée totale de l'expérience et ainsi d'atténuer l'effet de fatigue.

Les combinaisons de couples et de fréquences à tester ont été choisies après quelques tests préliminaires. Alors qu'ont été testés les signaux où rien ne varie, la fréquence seule, la fréquence et le couple : la seule combinaison manquante est le couple variant seul. Dans ces tests, tout portait à croire qu'une variation seule du couple τ n'était pas bien ressentie. Avec du recul, il aurait cependant été intéressant de tester cette combinaison avec une approche statistique, afin de pouvoir démontrer si oui ou non une variation seule du couple est efficace pour la tâche.

Richesse d'interaction haptique

Les résultats montrent qu'une interaction haptique proportionnelle à l'erreur améliore les performances d'orientation pour les taux de succès et le temps de convergence. À partir de la rétroaction proportionnelle, les utilisateurs pouvaient distinguer à la fois la direction et estimer l'erreur d'orientation jusqu'à l'objectif. De plus, plusieurs participants ont aussi témoigné verbalement qu'ils utilisent la variation des fréquences et couples pour obtenir plus d'information. En d'autres termes, les sujets ont intuitivement assimilé comment utiliser la dérivée première de l'erreur d'orientation à partir de la rétroaction proportionnelle.

Les signaux où la fréquence et le couple étaient proportionnels montrent des performances distinctes et supérieures à ceux où seule la fréquence varie en conservant le couple constant. Cela s'explique vraisemblablement par une sensation de variation accrue lorsque le signal change selon les deux aspects.

Le débit d'information de la communication avec une rétroaction proportionnelle est plus élevé qu'avec un signal constant. En d'autres mots, le mode de communication est plus riche en informations. Le signal constant contient le message : « aller à gauche/droite ». Le signal proportionnel contient simultanément : « aller à gauche/droite » et « tu es à X degrés de l'objectif à gauche/droite ». L'utilisation de la dérivée de cette information d'angle, selon le mouvement de l'utilisateur, permet aussi de déduire les messages suivants : « tu te rapproches », « Mauvaise direction ». Ces messages sont d'ailleurs sé-

mentiquement similaires à « tu brûles », « tu te refroidis », ce qui renforce le caractère intuitif de ces expressions. Avec toute action de réorientation, ils reçoivent ainsi en continu une « rétroaction instantanée » qui informe si ces mouvements sont corrects ou non. Les deux permettent aussi de produire une information « arrivée », ici représentée par l'absence de signal.

De plus, ce signal plus riche ouvre la porte à un éventail de stratégies supplémentaires pour réussir la tâche d'orientation. En mode de proportionnalité positive, les participants ont témoigné faire la recherche plus rapidement puisqu'ils étaient confiants de pouvoir sentir s'ils dépassaient l'objectif (overshoot). Pour eux, l'augmentation d'intensité en cas de dépassement, était un indicateur majeur permettant de détecter ce dépassement. Il s'agit d'une stratégie que l'on pourrait nommer « aller rapidement jusqu'à dépasser l'objectif ». Dans le mode négatif, cette stratégie est aussi utilisée, mais ils repèrent cette fois l'endroit où le signal change de direction, ce qui est évident puisque l'intensité est maximale.

Une autre stratégie observée est une « exploration locale », où certains sujets tournaient légèrement dans les deux directions pour sentir par où aller lorsqu'ils étaient perdus. D'autres stratégies sont uniques à certains participants et ne sont pas rapportés, ou alors n'ont pas pu être comprises par l'expérimentateur.

Toutes ces observations concordent aussi avec l'observation que le succès de l'identification binaire n'est pas affecté par le type de stimulus utilisé. Cela conforte l'hypothèse selon laquelle ce critère d'évaluation dépend seulement de la capacité sensorielle à identifier la direction où aller, soit une seule information binaire. Il ne tire donc pas profit d'un débit d'information supérieur, ou d'une communication plus riche, ce qui concorde avec les résultats obtenus.

Évaluation qualitative

Lors du post-mortem après l'expérience, tous les sujets ont rapporté qu'ils préféraient soit le signal positif ou négatif, comparativement à celui constant. Le signal positif était perçu comme plus naturel, intuitif et plus relaxant pour une période d'utilisation prolongée.

Quant à lui, le signal négatif était décrit comme vigoureux et tranché, spécialement à proximité de l'objectif. Par contre, avec ce dernier, il était difficile d'estimer correctement la valeur de l'erreur actuelle. En effet, cette perception d'erreur est proportionnelle au signal maximal, mais que les sujets ne connaissent pas dans l'absolu. Pour les signaux de type positif, l'arrêt est facilement concevable dans l'absolu : il s'agit de l'arrêt.

Le signal préféré qualitativement change selon les sujets interrogés. Ultérieurement, il s'agit d'une préférence qui pourrait être personnalisée au goût par l'utilisateur.

Deux participants ont rapporté éprouver une certaine fatigue ou une diminution de leur acuité tactile à la fin d'environ 18 min de tests ininterrompus. Ce phénomène d'engourdissement doit être investigué plus en profondeur en vue d'un usage commercial, où des sessions prolongées d'utilisation durant la

marche sont la norme.

4.3.7 Résumé des déductions

L'hypothèse formulée quant à l'efficacité d'une rétroaction proportionnelle à l'erreur d'angle pour la tâche d'orientation est démontrée. L'étude statistique démontre que ces signaux variables (fréquence f ET couple τ) améliorent les performances pour la tâche, qu'il soit de type positif (« calme ») ou négatif (« brûlant »). Cette performance peut être expliquée par le débit supérieur d'informations contenue dans la rétroaction haptique, ou richesse du signal. Ces informations supplémentaires ont permis aux utilisateurs de développer intuitivement de nouvelles stratégies d'orientation, améliorant du coup la performance.

4.4 Conclusion

Avec le prototype, une séquence de procédures expérimentales a été réalisée afin d'identifier des paramètres de rétroaction efficaces pour la tâche d'orientation. Les résultats montrent un taux de succès pour la tâche de l'ordre de 90% avec les meilleurs paramètres. Pour y parvenir, l'amplitude du couple et la fréquence doivent tous deux varier proportionnellement à l'erreur d'orientation. Quant aux paramètres, une plage de fréquences de 5 à 15 Hz combinée à des couples supérieurs à 40 mNm présente des résultats convaincants.

Bien que les tests aient été réalisés avec un participant statique qui bouge le bouton réponse, ces tests ont permis d'apporter un éclairage critique sur la méthodologie. Une méthodologie améliorée et les signaux développés les plus performants pourront être employés dans l'expérience complète afin de valider le concept.

Chapitre 5

Expérience d'orientation complète

Le chapitre précédent, portant sur développement du signal de rétroaction, avait pour objectif d'obtenir une communication machine-utilisateur efficace pour la tâche d'orientation. Avec les signaux développés, une preuve de concept similaire aux conditions en milieu ouvert est nécessaire pour vérifier que le système est réellement efficace. Au lieu d'être assis à un bureau et d'utiliser un bouton représentant leur orientation, les sujets marchent et tournent dans leur environnement pour trouver un objectif géographique défini.

5.1 Montage expérimental

Afin de réorienter le sujet vers un point de repère dans l'espace de travail, il est nécessaire que le système calcule :

- Où est le sujet ?
- Dans quelle direction se dirige-t-il ?

Ces données sont transformées en erreur d'angle d'orientation pour générer la rétroaction haptique proportionnelle.

5.1.1 Technologies potentielles

Pour calculer la position et l'orientation actuelle de l'utilisateur, plusieurs technologies concurrentes ont été étudiées.

Dans un premier temps, une solution inertielle incluant des accéléromètres, gyroscopes et magnétomètres a été envisagée. Cette solution a l'avantage d'être portable et utilisable dans un contexte réel, mais requiert un développement coûteux en temps. En effet, le problème typique de ces solutions est la dérive de l'estimation d'angle à partir de la vitesse angulaire, ou la dérive de la position calculée par la double intégrale de l'accélération. Pour pallier à la dérive dans le temps de ces capteurs inertiels, la technique utilisée est la fusion de capteurs, typiquement via un filtre de Kalman [Dudek and Jenkin, 2010]. De plus, une centrale inertielle seule n'aurait pas de sensation extéroceptive de position

et devrait être couplée à un système de GPS. Un tel système doit par la suite être validé avec une procédure expérimentale. En bref, ce système a l'avantage d'être complètement portable et autonome. Cependant, la précision du système est limitée et le calcul des variables d'intérêt par fusion de données requiert un travail important. Les précisions atteignables sont typiquement de l'ordre de 5 m en position et de quelques degrés en orientation.

À l'opposé, un ensemble de caméras tridimensionnelles comme le Vicon permet d'obtenir une précision de l'ordre du millimètre en position et de 0.3° en orientation. Par contre, puisque les caméras sont positionnées en périphérie de la zone à observer, le système délimite un espace de travail fixe dans lequel le marcheur peut se déplacer librement. De plus, l'intégration de ce système est beaucoup plus simple que le système inertiel, puisqu'il est déjà étalonné et prêt à l'emploi. Seul le module de communication et l'adaptation à l'application spécifique restaient à développer. Par contre, ce système n'est pas mobile et ne peut pas être réutilisé pour un déploiement à grande échelle, pour un parcours extérieur par exemple.

5.1.2 Implémentation logicielle

Le système Vicon a été choisi pour ce test, puisque la portabilité n'est pas une priorité à ce stade de cette preuve de concept. En effet, le contrôleur en temps réel utilisé est un nœud de calcul est un ordinateur de gros format et n'est pas portable en lui-même. Le test est donc limité à un environnement restreint : l'expérimentation sur parcours extérieur est donc considérée comme une phase ultérieure. Cette étape requerrait l'utilisation d'un contrôleur embarqué de petite taille et la mise en œuvre la solution inertielle fusionnée à un GPS.

Avant de procéder à l'expérimentation en soi, plusieurs étapes ont été nécessaires pour assurer une cohésion du système de caméras dans la boucle de contrôle. Dans un premier temps, un logiciel de transition a été développé pour transférer les informations jusqu'au nœud en temps réel, comme illustré à la Fig.5.1.

Ce système utilisait un câble de transmission de données entre le nœud de calcul et la source de puissance. La latence totale de la boucle du système de calcul est estimée à ≤ 13 ms. La précision est estimée à ≤ 0.1 mm en position et $\leq 0.3^\circ$ en orientation, calculées à partir des résultats d'un test de caractérisation effectué antérieurement. La précision d'un tel système de caméras est variable dans l'espace de travail, influencée principalement par le nombre de caméras participant à la triangulation pour un marqueur donné.

Espace de travail

Un problème typique rencontré avec le système de caméras est la perte de signal. En effet, les objets peuvent cesser d'être détectés lorsqu'ils sortent de la zone de visibilité ou lorsqu'il y a occlusion. Un algorithme de détection de ces pertes de signal a été programmé. Dans ces circonstances, le logiciel maintient la dernière valeur captée avant que le signal soit perdu. Cela permet d'améliorer la robustesse

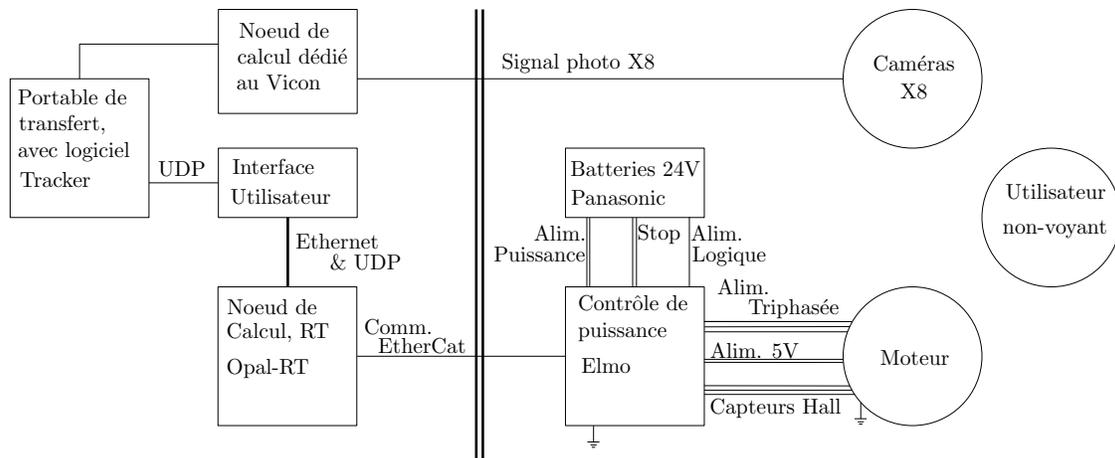


FIGURE 5.1 – Schéma des branchements du système incluant les caméras Vicon. Dans la section de gauche, les ordinateurs calculent le signal tactile à produire et sont alimentés par le réseau mural. À droite, toutes les composantes sont embarquées et transportées sur le sujet pour le transport de signaux analogiques.

du système, en conservant une rétroaction haptique cohérente lors d'une perte de détection courte (<1 s). Aussi, suite à l'expérimentation, les rares tests où le signal a été perdu durant plus de 0.5 s sont exclus des résultats, puisqu'on considère qu'il y a eu défaillance du système.

La zone de travail est caractérisée afin de s'assurer que les points de repère à rejoindre y sont inclus. Après la phase d'étalonnage des caméras, un assistant portant tous les marqueurs se déplace en bordure de l'espace de travail pour en déterminer la dimension. L'inclusion de chaque point requiert que la détection se fasse dans toutes les directions : l'assistant effectue un tour complet sur lui-même à chaque localisation. Cette évaluation est essentielle pour valider le niveau de détection, peu importe l'occlusion de la boussole par le corps. En tout temps, un objet est détecté si au moins 3 marqueurs sont détectés sur l'objet, où au moins 2 caméras doivent voir chaque marqueur.

L'espace de travail utilisé pour l'expérience peut être représenté par un cercle de 4.6 m de diamètre. Les 8 caméras l'entourent, disposées aux 4 coins et 4 aux centres des segments. L'orientation des caméras est adaptée pour que les cônes de vision génèrent un volume d'intersection maximal.

Calcul d'orientation

Aussi, un calcul géométrique est programmé pour calculer la correction d'angle pour la rétroaction. La position de l'utilisateur \vec{P}_u est donnée par la position 3D du bandeau sur la tête, ce qui correspond après ajustement à un point au centre de la tête et sur l'axe de rotation du cou. Avec cette valeur et la position de l'objectif dans la pièce \vec{P}_t , on peut calculer le vecteur de trajet idéal \vec{R} avec $\vec{R}_1 = \vec{P}_t - \vec{P}_u$.

L'orientation \vec{H}_r est calculée à partir du quaternion de l'orientation du repère étalonné de la boussole dans l'espace. Cette étalonnage assure que le repère mobile de la boussole passe par son centre et que l'axe $\vec{E}_x = [1\ 0\ 0]^T$ local pointe dans la même direction que la flèche et la pointe physique devant la

boussole. Le quaternion est transformé en matrice de rotation \mathbf{M}_r . On a ainsi $\vec{H}_r = \mathbf{M}_r \vec{E}_x$.

Ces vecteurs sont ensuite projetés sur le plan du sol, puis transformés en vecteurs unitaires. L'écart d'angle avec l'objectif ε_θ est calculé avec

$$\varepsilon_\theta = \text{atan2}(\|\vec{W}\|, \vec{R} \cdot \vec{H}_r) \times \text{sign}(w_z) \quad (5.1)$$

où $\vec{W} = \vec{R} \times \vec{H}_r = [w_x \ w_y \ w_z]$. La fonction *atan2* est utilisée puisque celle-ci produit un angle compris dans l'intervalle $-\pi < \varepsilon_\theta < \pi$.

Évitement de discontinuité

Cette valeur ne peut par contre pas être utilisée directement à cause de la discontinuité de la fonction *atan2* à $\pm 180^\circ$. Cette discontinuité provoquerait un saut abrupt de sensation haptique pour l'utilisateur lors du passage au dessus de cette valeur. Pire, le bruit numérique de lecture d'angle ou de légers mouvements autour de cette direction causeraient une instabilité dans la rétroaction envoyée. L'approche classique est d'utiliser un algorithme de déroulement qui assure une continuité dans l'angle parcouru. Or, cette technique pose une incongruité pour la tâche d'orientation. En effet, un sujet pourrait se retrouver aligné vers l'objectif, mais la valeur virtuelle d'erreur dans le système a une erreur de 360° . La technique utilisée est donc un déroulement de l'angle, mais limité à $\pm 235^\circ$, comme illustré à la Fig.5.2. Ainsi, il ne peut y avoir d'oscillation autour de la discontinuité à 180° . Le signal demeure cohérent dans la même direction, jusqu'à ce qu'il devienne sensiblement plus court de passer par l'autre côté. Il est à noter que des discontinuités sont toujours présentes dans le signal, mais qu'elles ne peuvent pas créer d'instabilité. En effet, les valeurs charnière sont suffisamment éloignées l'une de l'autre, considérant la nature du système utilisateur-rétroaction, pour permettre qu'une instabilité de discontinuité survienne.

Un autre avantage de cette technique, par rapport à un filtre, est qu'elle n'ajoute pas de constante de temps ni de délai sur la réponse du signal de rétroaction. Or, rappelons que la chaîne des délais entre le mouvement et la rétroaction doit être minimisée pour maintenir la sensation d'instantanéité pour l'utilisateur.

Sensibilité angulaire

Autour de la coordonnée à rejoindre, une zone d'acceptation de 30 cm de diamètre a été testée comme suffisamment large pour permettre la convergence. Un test pilote a aussi permis d'observer que l'erreur angulaire change très rapidement lorsque le sujet passe à côté de cette zone dans la mauvaise direction. Ce phénomène est ressenti par les sujets comme une instabilité, puisque la sensation haptique est très réactive au moindre geste. Cela peut être expliqué par le concept de « sensibilité angulaire », ou le changement d'erreur pour un pas d'une longueur donnée à une orientation donnée. Ce gain pas-angle converge à $(180^\circ/\text{pas})$ comme la distance de l'objectif diminue, donnant une réaction importante au moindre mouvement de l'utilisateur. Cette rétroaction instable peut aussi s'illustrer comme une « singularité ». À l'opposé, à grande distance de l'arrivée, la sensibilité est très faible et converge à

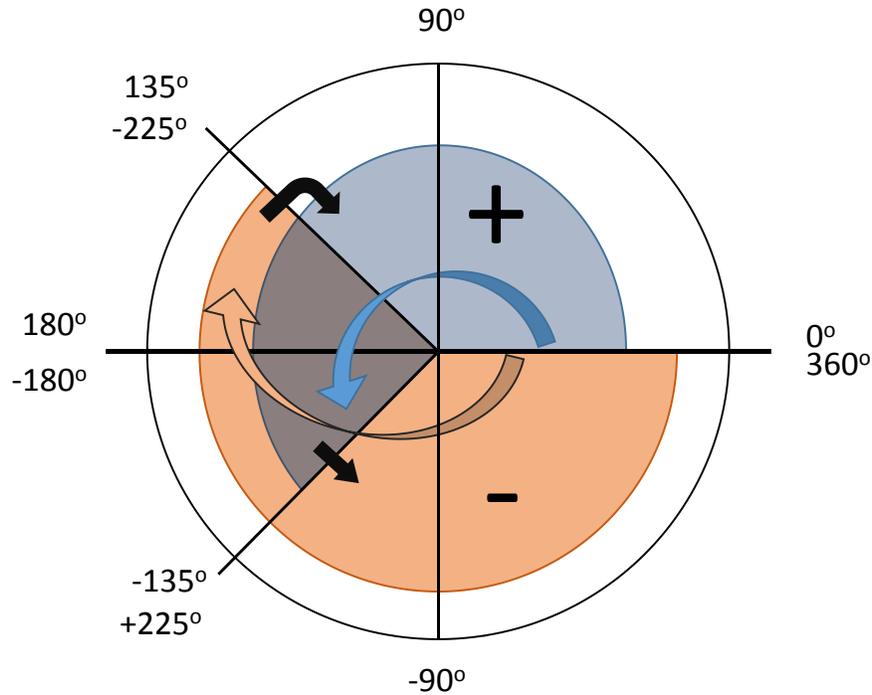


FIGURE 5.2 – Technique de déroulement d’angle adaptée à la tâche de réorientation. Tout dépendant d’où le sujet arrive, le passage à une instruction de l’autre côté ne se fait que lorsqu’il dépasse un seuil de 90°.

une sensibilité nulle. Dans ces circonstances, tous les mouvements possibles du sujet résultent en une variation infinitésimale de l’erreur d’angle : il peut aller dans la mauvaise direction sans modification perceptible de la rétroaction.

La sensibilité angulaire est définie par la variation d’angle $\delta_\alpha = \varepsilon_{\theta_2} - \varepsilon_{\theta_1} = \theta_2 - \theta_1$ pour un pas de longueur δ_s à l’orientation $\theta_i = \varepsilon_f + \varepsilon_{\theta_i}$. La distance entre l’utilisateur et le point à rejoindre notée r_i est la variable d’intérêt dans le calcul, puisque c’est d’elle dont dépend la sensibilité pour un même pas donné. La sensibilité est calculée avec l’équation 5.2, avec le diagramme montré à la Fig.5.3.

$$\sin \delta_\alpha = \frac{\delta_s \sin \theta_1}{\sqrt{r^2 + \delta_s^2 - 2r\delta_s \cos \theta_1}} \quad (5.2)$$

5.1.3 Mise en route et caractérisation

Afin d’assurer un déroulement naturel des tests, les mêmes deux parcours sont prédéfinis et présentés à tous les sujets dans le même ordre. Ces parcours sont déterminés aléatoirement, en utilisant des angles aléatoires de $\pm 120^\circ$ par rapport à l’orientation actuelle pour simuler des rotations à droite/gauche similaires à celles rencontrées dans un contexte réel d’utilisation. La distance jusqu’au prochain objectif est générée aléatoirement entre 1.5 et 4 m, en autant que la contrainte d’inclusion dans l’espace de travail est respectée.

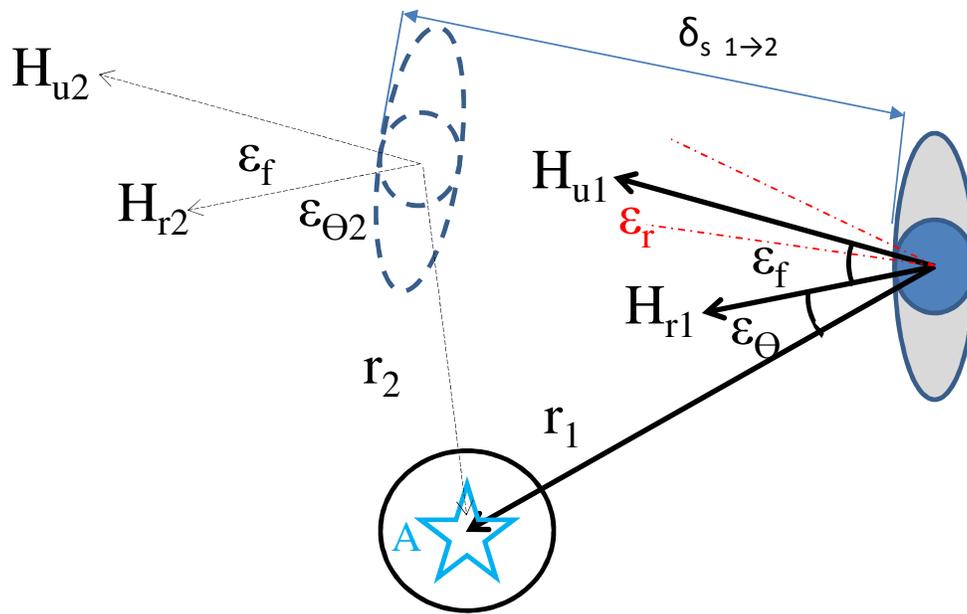


FIGURE 5.3 – Paramètres et variables utilisés pour modéliser la tâche d’orientation avec la boussole haptique.

Les sujets étaient équipés de marqueurs à 4 endroits, comme illustré à la Fig.5.4 : le devant de la tête, l’arrière de la tête, au poignet et sur la boussole. Les marqueurs étaient vissés à une plaque d’aluminium rigide insérée à l’intérieur des bandeaux élastiques de sport. Puisque ces groupes de marqueurs sont fixes entre eux, ils sont identifiés comme des corps rigides par le logiciel Tracker. Ces objets étant pré-enregistrés dans le système et de géométrie étalonnée, cette approche permet une meilleure estimation de la précision ainsi qu’une discrimination des corps entre eux. La meilleure précision s’explique par la plus grande quantité de points utilisés, ce qui permet de réduire l’erreur résultante. L’agencement caractéristique de marqueurs sur chaque objet permet de les différencier les uns des autres de façon robuste, essentielle à la continuité de la boucle de rétroaction.

La position est calculée avec l’avant et l’arrière de la tête, avec l’origine déplacée de telle façon qu’elle intersecte l’axe de rotation de la tête. Ce placement permet qu’une rotation de la tête n’influence pas la position de l’utilisateur. Les coordonnées d’orientation sont données par la boussole. L’appareillage utilisé dans l’expérience est montré à la Fig.5.4.

Les utilisateurs portaient un bandeau devant les yeux pour restreindre la vision. Ils ne pouvaient pas entendre le dispositif, puisqu’ils portaient des écouteurs sans-fil qui jouent une musique de fond. L’expérimentateur avait à sa disposition un microphone pour leur transmettre des instructions ou des avertissements dans le cas éventuel d’une collision imminente. Dans une expérimentation préliminaire avec du bruit rose ou une trame sonore de trafic en ville, plusieurs testeurs s’étaient plaints que ces sons causaient une grande fatigue intellectuelle, d’où l’idée d’une musique de fond.

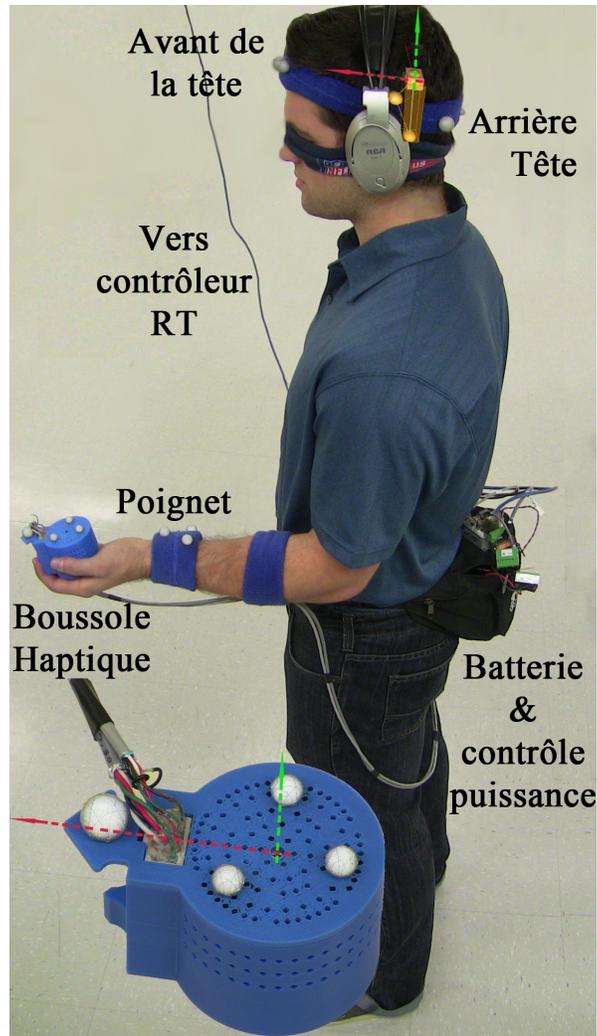


FIGURE 5.4 – Appareillage fourni aux participants pour l’expérience d’orientation. Le câble transmet des informations digitales seulement entre le nœud de calcul en temps réel et la source de puissance. Les marqueurs fixés à la tête sont utilisés pour calculer la position actuelle et la direction pointée par la boussole correspond à l’orientation (vue agrandie au bas).

5.2 Procédure expérimentale

5.2.1 Objectifs

Alors que les tests précédents utilisent un potentiomètre pour émuler l’orientation, ce test se veut plus réaliste. Les sujets se meuvent et déambulent dans un environnement ouvert, comme dans un contexte d’utilisation réelle. Les participants doivent donc naviguer dans l’environnement et suivre une route virtuelle, en utilisant seulement la rétroaction de la boussole haptique.

La performance du déplacement séquentiel entre des points de repère est paramétrisée et évaluée. En évaluant la vitesse de marche moyenne et l’égarement latéral par rapport à la trajectoire idéale, il est possible de comparer les performances obtenues avec d’autres types de technologies d’aide à

l'orientation.

Suite aux tests, les sujets remplissent un sondage anonyme informatique pour récolter leurs opinions qualitatives et leurs commentaires sur leur expérience d'utilisation de la boussole haptique. Des questions plus particulières portaient sur la facilité d'apprentissage, la qualité de la rétroaction tactile et l'aisance d'utilisation.

5.2.2 Sujets

Dix-neuf volontaires, 14 hommes et 5 femmes, tous âgés entre 23 et 52 ans, ont participé à l'expérience. Aucun d'eux n'avait de désordre sensoriel haptique connu. Environ la moitié avaient déjà participé à une ou l'autre des expériences avec la boussole haptique. Le protocole a été approuvé par le comité d'éthique de l'Université Laval.

Les participants doivent parcourir un trajet virtuel aléatoirement généré, découpé en une série de points de repère successifs. Une vibration uniforme à la sensation similaire à un téléphone cellulaire est envoyée lorsqu'ils arrivent à un point de repère. Après une courte pause de 2 s, les instructions les dirigent vers le prochain point de repère. La fin du parcours, divisé en 15 sous-objectifs, est marquée de 3 vibrations symétriques successives. L'expérience est constituée de deux parcours différents séparés d'une pause de 5 min, pour un total de 45 min.

Avant de débiter le test, les sujets disposent d'une période de familiarisation avec le signal de rétroaction à proportionnalité positive et avec l'équipement, pour un total d'environ 5 min. Le sac de transport est ajusté à leur taille et tous les bandeaux sont installés confortablement. Le test débute lorsque l'utilisateur est en confiance avec l'équipement et après un test de communication au travers des écouteurs. Ils sont informés que le bandeau à la tête et la boussole sont utilisés pour déterminer leur position et leur orientation, respectivement. Afin de laisser toute la place à leur intuition primaire, ils reçoivent des informations seulement sur le fonctionnement intrinsèque de la boussole. Aucune information sur l'utilisation ou sur les stratégies d'emploi n'est fournie, afin d'observer des réactions développées spontanément.

5.2.3 Stimuli présentés

En fonction des résultats obtenus dans l'expérience proportionnelle précédente, les signaux de rétroaction sont de type positif. La fréquence et le couple décroissent d'intensité à l'approche de la bonne orientation.

Pour que les sujets puissent comprendre le déroulement du test, il est impératif qu'un signal supplémentaire indique l'arrivée à un point de repère. Dans les tests préliminaires sans cette fonctionnalité, un changement brusque du signal avait une signification ambiguë : cela pouvait représenter que le sujet a fait une erreur majeure, ou au contraire qu'il a bien réussi et que le système a passé à l'objectif suivant. Pour y remédier, le stimulus d'arrivée, a été développé et testé pour être à la fois très distinct des autres et simple à expliquer conceptuellement. Le signal choisi est donc similaire à celui d'un

téléphone cellulaire, puisqu'il est simple à comprendre et que les utilisateurs peuvent se le représenter à partir de leur historique personnel. Cette vibration est un signal symétrique de ± 20 mNm à une fréquence de 50 Hz. La combinaison de haute fréquence et de mouvement alternatif simple est à la fois distincte des rétroactions et similaire aux sensations tactiles produites par un moteur à vibration classique.

5.2.4 Critères d'analyse

La position et l'orientation des tous les marqueurs sur le corps, tête avant, tête arrière, poignet et dispositif, sont enregistrés en temps réel pour permettre leur analyse ultérieure. La reconstruction des mouvements est analysée et les critères d'évaluation de la performance pour la tâche sont extraits, comme dans les expériences précédentes. Toutes les positions et orientations sont projetées de l'espace tridimensionnel vers le plan du sol, puisque seules ces données sont prises en compte dans l'analyse. Autant la trajectoire est séparée en points de repère, autant l'évaluation est découpée par cible individuelle. Pour chacune de ces étapes, les résultats d'analyse suivants sont extraits et colligés :

- Le délai d'hésitation initial, mesuré entre le moment où le parcours passe au prochain point et le moment où le sujet débute sa manœuvre de réorientation.
- Le temps d'orientation, caractérisé par une phase d'orientation dominante et un déplacement en translation mineur. La distance entre le sujet et sa cible est pratiquement constante, puisque cette phase se termine lorsque le sujet fait un pas vers l'objectif.
- Le temps de déplacement, ou la durée du mouvement avant qui correspond à la marche vers le repère, jusqu'à ce qu'il soit atteint ou dépassé. Durant cette phase, l'erreur d'orientation présente habituellement de faibles variations autour de zéro, la vitesse totale est plus élevée que durant les phases précédentes et la distance jusqu'à l'objectif diminue rapidement.
- Le temps de complétion de l'essai, ou temps d'essai, représente la durée totale requise pour atteindre l'objectif à partir du moment où le point de repère devient actif.
- La largeur de déviation latérale, ou corridor, mesure la distance maximale entre les extrémums à gauche et à droite de la trajectoire rectiligne idéale. Il s'agit d'une indication de l'égarement des sujets dans l'environnement ouvert.
- Le succès pour la tâche d'orientation est défini différemment des expérimentations précédentes, où les participants manipulaient un bouton. Cette fois, le critère de succès correspond à rejoindre une zone définie par les coordonnées de la cible. Un échec serait ainsi causé par une incapacité à se repérer et à se rendre au point d'arrivée à l'intérieur d'un délai de 120 s. Ce délai est dosé de telle sorte qu'il laisse la chance aux sujets moins performants d'aller à leur rythme, tout en éliminant la possibilité de trouver la cible par pur hasard.

Ces critères d'évaluation sont aussi illustrés plus en détail à la Fig.5.5. Dès le début des tests, le phénomène d'égarement dans la singularité à proximité de la cible est apparu comme problématique. Le temps passé dans cette phase a été comptabilisé séparément et soustrait des résultats, puisque la problématique peut être réglée, comme expliqué ultérieurement. Cette phase est caractérisée par une

Métriques d'évaluation - Expérience complète

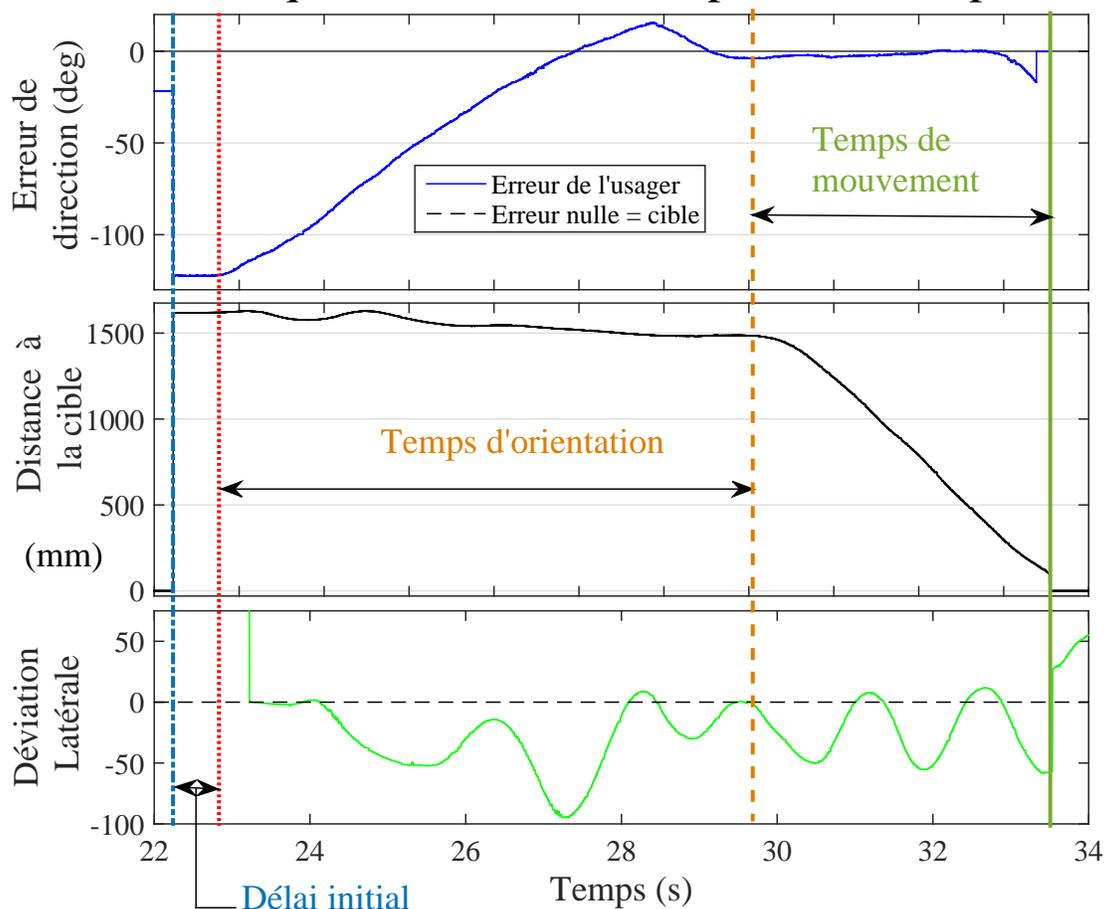


FIGURE 5.5 – Courbe typique de résultats avec l'extraction des critères de performance. Courbes de haut en bas : Erreur d'orientation, distance euclidienne jusqu'au point de référence, déviation latérale de la trajectoire rectiligne. Ces tracés permettent de mesurer le délai initial, le temps d'orientation et le temps de mouvement ainsi que de calculer la largeur maximale du corridor.

augmentation soudaine de l'erreur d'orientation, causée par l'instabilité, ainsi qu'un éloignement de l'objectif comme le sujet passe à côté.

Le temps de marche avant est donc filtré pour exclure ces temps perdus. L'objectif du filtrage est de mieux comprendre le comportement des utilisateurs en le décortiquant en étapes.

5.2.5 Résultats

Tous les sujets ont réussi à parcourir tous les points de repère sur les deux trajets testés. Cela signifie un succès total pour la tâche d'orientation, aussi décrite comme la convergence dans la zone d'acceptation. La Fig.5.6 montre un exemple d'essai et illustre le concept de largeur de corridor.

Les durées de chaque phase sont mesurées pour chaque essai en utilisant les courbes de position

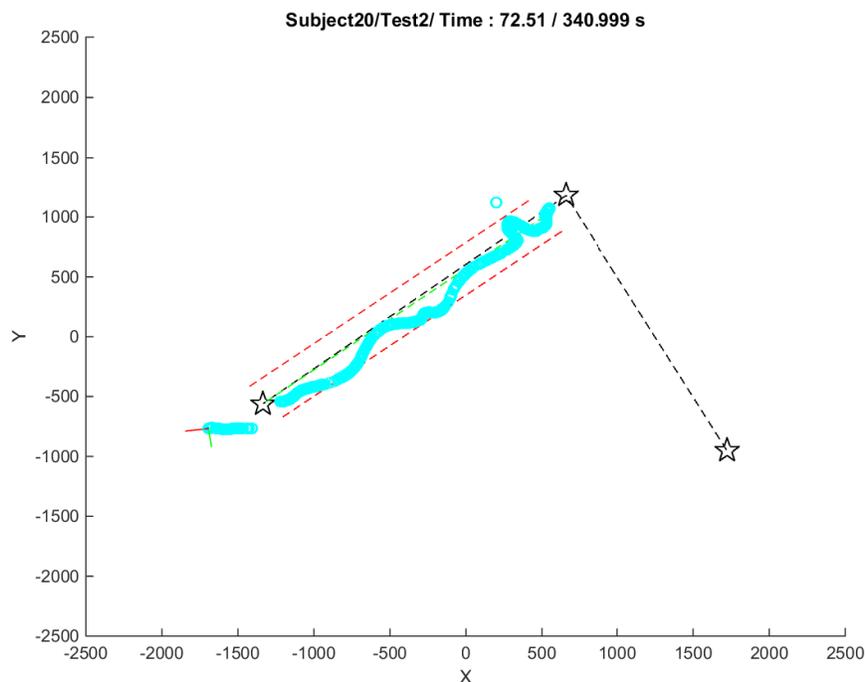


FIGURE 5.6 – Vue du dessus de la trajectoire parcourue durant l’expérience, bordée par la dimension maximale du corridor (pointillé rouge). Les dimensions de l’espace de travail sont en mètres. L’utilisateur s’oriente et doit rejoindre le prochain point de repère (étoile).

TABLE 5.1 – Critères d’évaluation de la performance pour la marche avec la boussole haptique. Les résultats présentés sont une moyenne parmi tous les essais et les sujets.

Critères d’évaluation	Valeurs moyennes	Écarts-types
Délai d’hésitation initial	0.73 s	0.41 s
Temps de réorientation	4.44 s	3.24 s
Temps de déplacement	10.44 s	6.69 s
Temps de complétion de tâche	18.13 s	10.36 s
Vitesse de marche moyenne	0.27 m/s	0.14 m/s
Largeur du corridor	0.39 m	0.23 m

et d’orientation montrées à la Fig.5.5. Les valeurs extraites sont ensuite compilées parmi tous les sujets pour obtenir les résultats présentés dans la Tab.5.1. Tous les critères d’évaluation montrent des distributions approximativement normales, bien qu’elles ne soient pas affichées exhaustivement.

La distribution des déviations latérales maximales est d’un intérêt particulier, puisqu’elle permet de mieux visualiser la prévalence des essais qui auraient été complétés sans incident sur un trottoir. Cette distribution comparée à la limite du trottoir est montrée à la Fig.5.7.

Pour mieux comprendre la relation entre la vitesse de marche et le temps requis pour atteindre la

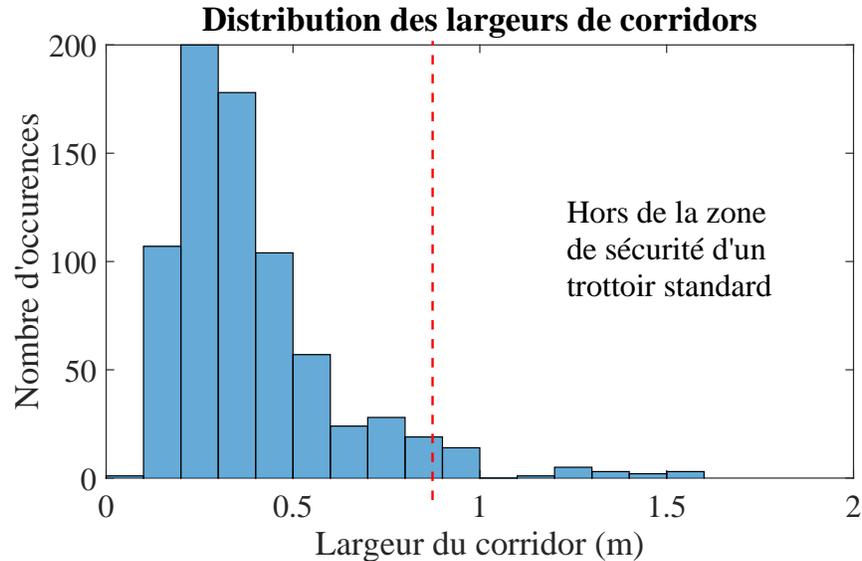


FIGURE 5.7 – Distribution des déviations latérales maximales, ou corridors, parmi tous les essais et tous les participants. Les valeurs sont en mètres (m).

cible, le temps d’essai brut et le temps de déplacement filtré sont tous deux comparés à la distance à parcourir à la Fig.5.8. La corrélation entre la distance à parcourir et le temps de déplacement filtré est considérée comme significative ($p < 0.05$), en utilisant le Coefficient de Corrélation produit-moment de Pearson (deux queues ou « two-tailed »). Cependant cette relation n’est pas significative entre le temps d’essai total brut et la distance parcourue.

Le découpage des temps perdus dans la région où la sensibilité angulaire est instable, ou singularité, est requis dans 19,4% des essais. Afin d’évaluer l’impact de ce filtrage, la variance du temps de convergence total brut est comparée avec la variance de la somme de toutes les étapes excluant ces temps perdus dans la singularité. Le résultat est que le temps perdu dans la singularité compte pour 48% de la variance totale du temps de convergence brut.

L’évaluation qualitative a été obtenue par un questionnaire en ligne rempli après l’expérimentation, avec un taux de participation de 100%. Les résultats sont présentés dans la Tab.5.2. Le questionnaire était en anglais seulement, la traduction des questions ci-présente est à titre indicatif :

- Affirmation 1 : Apprendre à utiliser la boussole haptique était facile. (It was easy to learn how to use the Haptic Compass),
- Affirmation 2 : Les sensations de gauche/droite étaient intuitives pour réussir à s’orienter. (This left/right sensation was intuitive to achieve orientation),
- Affirmation 3 : La rétroaction tactile fournie était claire et perceptible. (The feedback provided was clear and perceivable),
- Affirmation 4 : J’ai eu de l’aisance à trouver mon chemin pour traverser le parcours (I could easily find my way through the path),

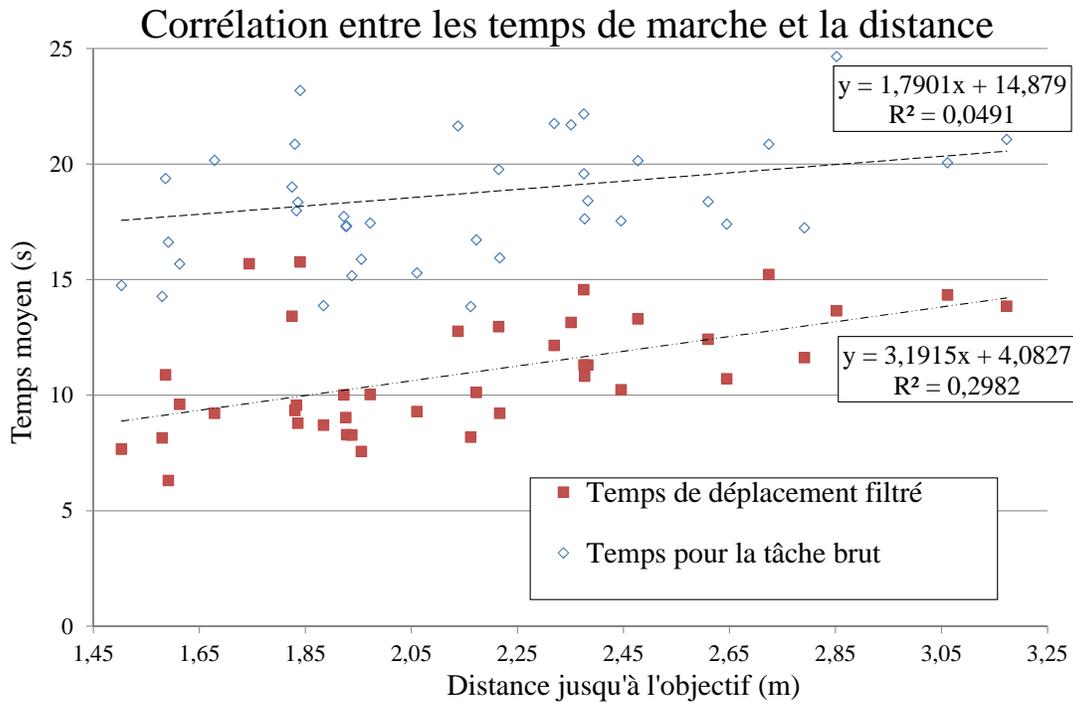


FIGURE 5.8 – Temps d’essai brut et le temps de déplacement filtré en fonction de la distance à parcourir durant l’essai.

- Affirmation 5 : La boussole était agréable d’utilisation. (The use of the device was pleasant),
- Affirmation 6 : J’apprécierais avoir ce genre de sensations directionnelles dans mes objets intelligents (ex : portable, GPS, montre ...). (I would like to have this kind of directional sensations in my smart/wearable objects (ex : smart phone, GPS, watch...)).

TABLE 5.2 – Résultats du sondage qualitatif en ligne concernant l’expérience des utilisateurs avec la boussole haptique.

Affirmation no.	Fortement en désaccord -2	En désaccord -1	Neutre 0	En accord 1	Fortement en accord 2	Moyenne Pondérée
1	0	0	0	31.58 %	68.42 %	1.68
2	0	5.26 %	0	78.95 %	15.79 %	1.05
3	0	0	0	45.11 %	57.89 %	1.58
4	0	5.26 %	5.26 %	42.11 %	47.37 %	1.32
5	0	0	15.79 %	47.37 %	36.84 %	1.21
6	5.26 %	0	10.53 %	52.63 %	31.58 %	1.05

Tous les essais durant lesquels le signal d’orientation ou de position provenant du Vicon est perdu

durant plus de 0.5 s sont rejetés. Dans le traitement statistique, les valeurs à l'extérieur de 4 écarts-types sont considérées comme des aberrations et sont éliminées.

5.2.6 Discussion

Évaluation de la méthodologie

Cette expérience a été conçue pour être aussi représentative que possible de la marche dans un contexte d'environnement ouvert réel. Ainsi, un itinéraire virtuel est généré aléatoirement et divisé en points de repère à atteindre jusqu'à destination. Les utilisateurs s'orientent et se déplacent avec tout leur corps, ce qui est plus naturel que l'émulation avec le bouton rotatif utilisé précédemment.

Néanmoins, l'utilisation du système de caméras Vicon et d'un nœud de calcul de grand format ont imposé une limitation de portabilité. Ainsi, un câble acheminant les consignes de couple était relié à l'utilisateur, ce qui est une cause d'erreur sur les trajectoires naturelles des sujets. En effet, le câble s'est enroulé à l'occasion autour des utilisateurs, leur imposant un tour complet ou un pas de côté pour éviter cet obstacle avant de reprendre leur tâche. Ainsi, ce facteur d'erreur peut avoir augmenté les largeurs de corridors et les temps pour la tâche.

Dans un autre ordre d'idées, les instructions ont été données soit en anglais ou français, selon le participant, ce qui peut avoir entraîné des disparités dans les instructions fournies initialement. Ces subtilités de traduction peuvent avoir un impact important sur la compréhension du fonctionnement et, ultimement, sur les stratégies utilisées. De plus, certains participants avaient des connaissances préliminaires différentes, ayant participé dans les expériences précédentes.

Les participants étaient des voyants à qui on a bandé les yeux, pour des raisons de coûts et de simplicité. Il est très probable que des utilisateurs malvoyants aient une perspective différente sur l'ergonomie et les manières d'utiliser le dispositif. Ils ont vraisemblablement une meilleure compréhension des contraintes de la navigation spatiale dans un contexte réel, de par leur expériences. Par exemple, ils auraient pu fournir des opinions constructives sur la possibilité de combiner la rétroaction obtenue par la boussole et la détection d'obstacle avec une cane blanche. En d'autres mots, leur stratégie de navigation combinerait probablement le signal de la boussole haptique et la proximité de points de repère au sol, ce qui diffère des utilisateurs aux yeux bandés. [Van der Linden et al. \[2011\]](#) présente à ce sujet des observations sur les différences de stratégie de navigation et les évaluations qualitatives entre des groupes non-voyants et des voyants aux yeux bandés.

En conséquent, il aurait été très intéressant de répéter ces expérimentations avec un groupe test de malvoyants, si le temps l'avait permis.

Interactions entre les paramètres

Puisque l'expérimentation est restreinte à l'espace de travail disponible, les critères de performance doivent viser à comprendre ce qui adviendrait dans un contexte de grands espaces. L'attention se porte

alors sur le temps requis pour se rendre à un objectif éloigné, ainsi que le niveau d'errance rencontré par rapport à une trajectoire idéale.

Comme mentionné plus haut, les pertes de temps reliées à la confusion dans la singularité ont été filtrées des temps de marche, pour qu'il soit plus représentatif d'une situation réelle. En effet, dans un contexte d'utilisation normal, les points de référence sont espacés de plusieurs dizaines de mètres, ce qui diminue l'importance relative des temps d'orientation et d'égarement dans la singularité par rapport au temps de déplacement vers l'objectif. Ces durées peuvent être représentées lorsque des durées fixes au début et à la fin du test, qui deviennent négligeables comme la distance augmente. Avec ces considérations, le facteur de performance le plus pertinent et représentatif est la vitesse moyenne de marche. La corrélation avérée entre le temps de déplacement filtré et la distance de déplacement rend plausible l'utilisation d'une vitesse moyenne de marche.

À l'inverse, le temps total brut pour compléter la tâche n'a que peu d'intérêt, puisqu'il n'est pas corrélé à la distance parcourue. L'approche de découper un essai en plusieurs phases de mouvement caractéristiques (délai initial, délai d'orientation et temps de mouvement) est la clef pour comprendre le comportement de l'utilisateur. Cette approche permet également de comprendre lesquelles des étapes comportent le plus de variance et de quelle façon est répartie la tâche dans le temps

Aussi, l'utilisation d'une phase distincte pour les moments où les sujets tournent autour du pot, ou dans la singularité, est une clef importante pour filtrer les phases de mouvement. En effet, ce phénomène explique à lui seul 48% de la variance du temps de complétion de la tâche. Le calcul en phases permet donc de filtrer cette source de variabilité des résultats et d'estimer avec une meilleure confiance la vitesse moyenne de marche, qui est d'intérêt. La vitesse de marche moyenne observée durant le test est de 0.27 m/s, pour des distances parcourues allant de 1.5 à 3.2 m. Extraire et déduire cette phase du calcul est d'autant plus pertinent que des solutions sont proposées pour l'éliminer dans la pratique aussi. En effet, l'élimination de cette phase d'égarement est possible en régulant la sensibilité angulaire durant le mouvement avec une stratégie de planification de trajectoire, notamment celle d'horizon défilant expliquée dans la section 6.4.

La régression linéaire entre toutes les variables est établie de façon matricielle et les corrélations significatives sont observées avec les coefficients de corrélation. Les résultats montrent que la largeur de corridor est reliée au temps d'orientation, au temps de marche et au temps d'essai brut. Puisqu'un corridor plus large implique de s'être éloigné de la trajectoire idéale, cela peut expliquer pourquoi ce détour augmente la durée de la tâche par la même occasion.

La largeur de corridor est aussi reliée au temps de réorientation, au temps de marche et au temps total pour l'essai. Cette relation peut s'expliquer par la forme des trajectoires, puisqu'un éloignement latéral supérieur de la trajectoire optimale implique un détour, prenant ainsi plus de temps. Il n'y a pas de corrélation significative entre l'erreur d'angle initial pour rejoindre le prochain point et le temps requis pour ladite orientation. Ce constat suggère que l'utilisation d'une vitesse angulaire moyenne de réorientation n'est pas un paramètre d'évaluation fiable.

On peut toutefois remarquer une nette augmentation des temps de réorientation entre cette expérimentation et les précédentes. Le temps d'orientation moyen est de 4.44 s, alors qu'il était de 2.76 s avec le même stimulus (f & τ positifs) dans l'expérimentation utilisant le potentiomètre comme retour de l'utilisateur. Une explication plausible est que la rotation du bouton avec les doigts requiert moins d'effort et est une opération de plus haute dextérité, par rapport à pivoter le corps au complet. Bien que la valeur du temps requis change entre les deux tests, le bouton de retour d'orientation demeure une solution simple et utile pour obtenir les tendances et discriminer les signaux haptiques entre eux, basés sur la performance de la tâche.

Les résultats montrent une corrélation significative entre le numéro de l'essai et le temps requis pour l'orientation, ce qui peut s'expliquer par un effet d'apprentissage. À partir des régressions linéaires, les temps d'orientation se sont améliorés de 37.9% au cours du test. Les vitesses de marche se sont elles aussi améliorées de 19.1% en moyenne entre le début et la fin, bien que la corrélation ne soit pas significative.

Cet effet d'apprentissage est normal et attendu, d'après la littérature. Une étude prolongée sur plusieurs semaines avec quelques sujets permettrait d'explorer la courbe d'apprentissage jusqu'à un éventuel plafonnement, afin de voir quelle est la meilleure performance atteignable et combien de temps d'entraînement est requis.

Performance du système

La vitesse de marche moyenne mesurée de 0.27 m/s est sensiblement plus basse que les valeurs typiquement observées pour les individus avec déficit visuel. En comparaison, des vitesses d'environ 1.2 m/s sont rapportées dans Clark-Carter et al. [1986] pour la marche avec une canne. Cette étude met aussi en lumière que les participants adaptent leur vitesse de marche en fonction de la grandeur de la zone de perception (« preview distance »). Il s'agit donc d'ajuster la vitesse de marche pour conserver le temps de réaction nécessaire pour l'évitement d'obstacles, sachant qu'ils sont détectés avec une avance donnée.

Sachant que la vitesse de marche est adaptée au délai de réaction pour l'évitement d'obstacle, il est normal que l'expérience menée ici présente une vitesse basse. En effet, l'espace de travail réduit fait en sorte que les points de repères sont situés à quelques 2 à 4 mètres de distance seulement. Cette courte distance à parcourir encourage implicitement à marcher lentement pour ne pas dépasser les objectifs ou tomber dans la zone de singularité. En conséquence, il est raisonnable d'envisager que les vitesses de marche vont augmenter à un niveau fonctionnel avec la pratique et pour des trajets de longueur réelle.

Puisque les largeurs maximales de corridor sont une mesure de déviation latérale, elles sont intéressantes à comparer avec les largeurs typiques des espaces de marche dans un contexte réel. Comme les trottoirs ont typiquement une largeur de 1.5 m¹ et en considérant le diamètre du marcheur à 0.7 m,

1. recommandée par l'IRD PQ comme standard municipal à Québec <https://www.ville.quebec.qc.ca/>

des corridors de 0.8 m seraient suffisants à eux seuls pour marcher sur une rue. Avec la distribution montrée à la Fig.5.7, 89.45% des essais pourraient remplir ce critère. Néanmoins, puisque la fiabilité est critique dans un contexte de marche dans les rues, il demeure impératif d'utiliser une seconde source d'informations, comme une canne.

Pour des environnements de champ et de forêt, ou ouverts et sans repères fixes secondaires, quelques études utilisant des ceintures avec des moteurs de vibration ont des performances intéressantes auxquelles il est intéressant de se comparer. Dans ces études, les largeurs de corridor rapportées sont de l'ordre de 15 m Heuten et al. [2008] et 20 m Elliott et al. [2010], pour des distances parcourues de centaines de mètres. La boussole haptique ici présentée produit de plus petits corridors, mais une expérience en environnement de grande dimension est requise pour confirmer que la performance se maintient sans égard à cette distance. Pour mieux comprendre comment le système humain-boussole se comporte sur de longues distances, un modèle de la marche est présenté au chapitre 6 et permet d'obtenir un estimé des performances auxquelles on pourrait s'attendre.

Personnalisation

Il y a des disparités importantes entre les utilisateurs, autant en ce qui a trait à leurs performances, leurs courbes d'apprentissage et leurs préférences personnelles. En comparant la différence des moyennes personnelles des utilisateurs les plus habiles par rapport aux moins habiles, on observe des différences majeures de vitesses de marche (+425%) et de largeur de corridor (+180%). Ces différences peuvent être causées par plusieurs facteurs, avec des solutions possibles :

- Le niveau de clarté de la sensation reçue, corrigé en adaptant les sensations à chaque individu dans une phase préliminaire. Ainsi, les limites minimales et maximales de couples et de fréquences seraient adaptables au sens tactile d'un utilisateur, qui sont inévitables dû à la variabilité sensorielle dans la population.
- Le niveau de confiance dans le prototype, ce qui s'améliore avec une période de pratique plus extensive et avec l'utilisation.
- Les stratégies employées sont plus ou moins efficaces, améliorables par une formation sur les meilleures pratiques d'utilisation.
- Il y a des erreurs de proprioception entre le membre qui tient la boussole et la direction de la marche, dont le détail est expliqué ci-bas.

L'erreur de proprioception est probablement celle qui crée la plus grande disparité entre les utilisateurs, puisqu'elle engendre une erreur statique entre la lecture d'orientation du système Vicon et l'orientation réelle de l'utilisateur. Cette erreur est vraisemblablement la combinaison de deux facteurs.

Dans un premier temps, il y a une variation dans la façon de prendre la boussole en main, la prise. Les individus sont libres de choisir la prise en fonction de leur confort, et pas systématiquement pour

accessibilite/guide_normes.aspx, consulté le 7 janvier 2016

favoriser l'alignement de la boussole avec le bras ou un autre repère corporel. Cette problématique est principalement causée par la forme symétrique et circulaire de la boussole. Cette géométrie avait été conçue pour pouvoir être utilisée de n'importe quelle main et par le plus large public possible. Pour un patient donné, une solution simple serait la personnalisation de la géométrie du boîtier afin d'améliorer la répétabilité de la prise. Les principaux paramètres à considérer pour cette personnalisation sont : la main utilisée, la dimension confortable de prise et la localisation approximative des doigts et du pouce.

De plus, la posture générale des utilisateurs est laissée à la discrétion des individus. On définit cette posture comme une expression d'une configuration du corps naturellement confortable. Concernant les variations de posture, la position du bras par rapport au corps varie selon les participants et induit une déviation, comme montré à la Fig.5.9. Dans la position la plus courante le bras est parallèle au corps avec le coude plié à environ 90° et la boussole est parallèle au plan du sol. Des variantes peuvent inclure une supination du poignet, le coude fléchi jusqu'à quelque 45° ou le bras en extension complète. Certains tiendront même la boussole à deux mains. Les variations précédentes ne posent pas intrinsèquement de problème, puisque tous les vecteurs sont projetés dans le plan du sol.

En revanche, une rotation interne entre l'avant bras et le corps crée une erreur statique de direction entre l'utilisateur et la boussole. L'impact dominant de ce paramètre par rapport aux autres variations de configuration est montré dans la section 6. Or, la connaissance de ce problème potentiel permet d'envisager une correction simple par un ajustement personnalisé pour l'individu. Parmi les solutions envisageables, on peut penser à une constante de correction qui serait étalonnée au préalable dans une phase de personnalisation. Une autre possibilité serait de calculer en temps réel un estimateur de cette erreur statique similaire à celui développé par [Ali et al., 2014]. Pour ce faire, il s'agit de comparer la direction de la trajectoire réelle parcourue avec celle pointée par le capteur. Ce résultat, soumis à un filtre passe-bas avec une constante de temps de l'ordre des minutes, permettrait d'obtenir un estimé somme toute constant et flexible.

Stratégies de navigation

Durant l'introduction et l'entraînement initial, une attention particulière avait été portée à n'expliquer aux sujets que le strict minimum afin de laisser s'exprimer leur intuition. Ainsi, ils étaient incités implicitement à développer leur propre stratégie d'utilisation de la boussole.

Il s'avère que les stratégies d'orientation ont une influence marquée sur le patron de mouvement, ou comportement des sujets. Les performances sont elles aussi influencées par la stratégie utilisée, ce qui contribue à expliquer les disparités entre les utilisateurs. Parmi les stratégies observées, quelques motifs dominants se recourent :

- La technique du « balayage alternatif » consiste à balayer à répétition la boussole pour sentir les « bordures » de la zone d'acceptation en angle. Cette approche permet en quelque sorte à l'utilisateur de compenser pour l'absence de rétroaction dans cette plage de $\pm 5^\circ$.

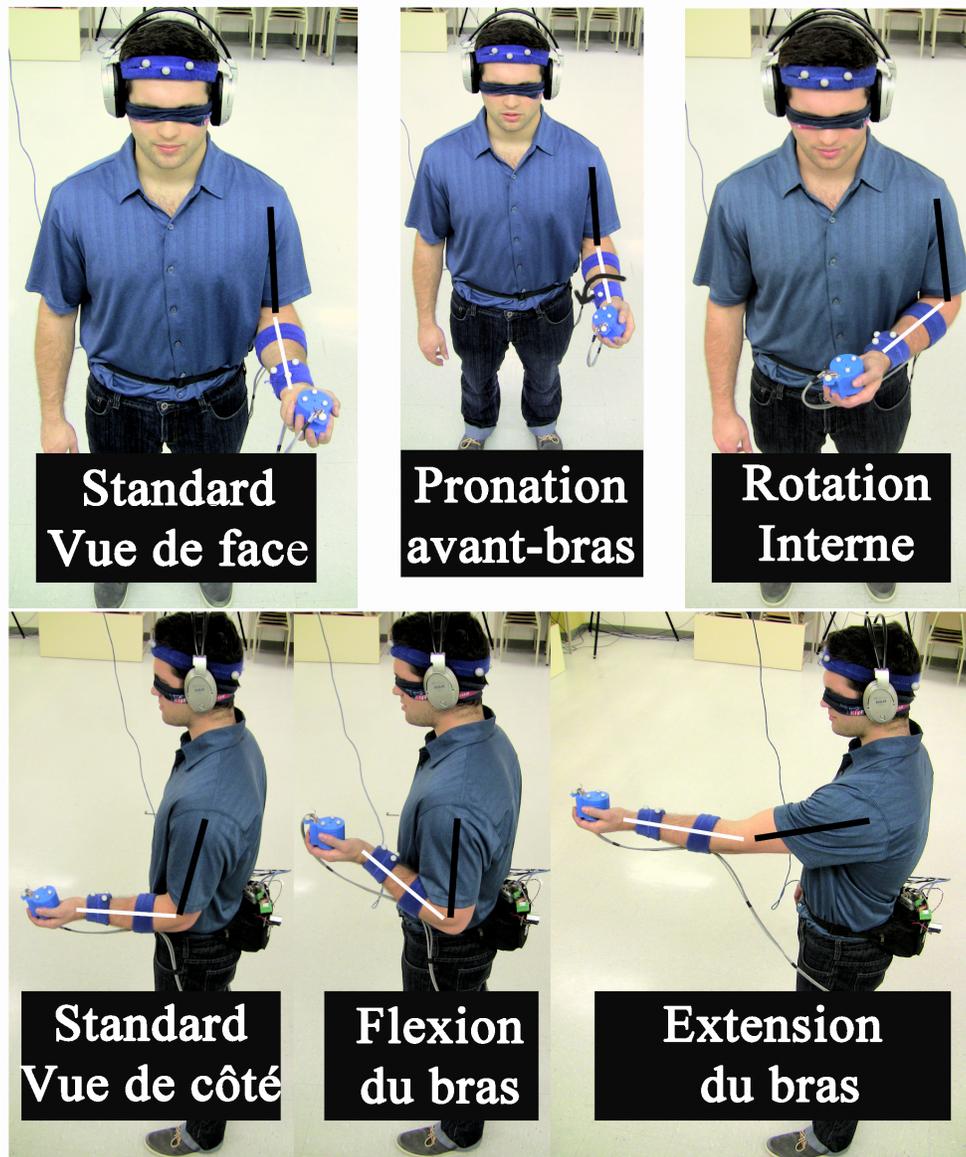


FIGURE 5.9 – Prise typique de la boussole haptique et les variantes observées expérimentalement.

- La « réorientation simultanée » consiste à démarrer l’avance vers l’objectif dès que l’utilisateur sent qu’il est à proximité de la bonne orientation. Ensuite, la correction est faite en continu durant la marche vers l’objectif, ce qui accélère le processus.
- La « réorientation séquentielle » est un patron itératif durant lequel le sujet alterne les réorientations parfaites et l’avance pas à pas. Cette stratégie ralentit significativement la vitesse de marche, mais assure d’éviter de tomber dans la zone de singularité.
- Le choix de longueur des enjambées, choisies inconsciemment, sont plus courtes que dans leur marche normale avec vision. Les observations montrent une augmentation des enjambées à mesure que l’expérience avance, ce qui peut dénoter un gain de confiance dans le dispositif.

Des pas plus allongés tendent à majorer la vitesse de marche, mais augmente la probabilité de passer à côté de la cible.

Même si elles sont difficilement prédictibles, les stratégies des utilisateurs doivent être prises en compte tôt dans le processus de conception pour permettre les meilleures interactions. Par exemple, un signal supplémentaire pourrait annoncer de commencer à marcher plus tôt pour favoriser la réorientation simultanée. Aussi, un signal d'arrêt à proximité d'un obstacle pourrait mettre les utilisateurs en confiance pour qu'ils augmentent leurs enjambées. À terme, les instructions données pour l'entraînement des utilisateurs devront contenir un sommaire des meilleures pratiques d'utilisation.

Dans le sondage qualitatif, les 19 utilisateurs conviennent qu'il était facile d'apprendre à utiliser la boussole tactile (100%). Ce résultat correspond avec l'impression que les rétroactions sont intuitives (95%), claires et perceptibles (100%). 90% des utilisateurs ont mentionné avoir eu de la facilité à trouver leur chemin. Le prototype était agréable à utiliser (85%) et ce genre de rétroaction serait apprécié dans d'autres objets intelligents (85%). Le sondage qualitatif montre une expérience des utilisateurs positive tout au long du processus expérimental.

5.3 Conclusion

Ce chapitre détaille le processus de choix de la technologie de localisation de l'utilisateur ainsi que son implémentation. Plusieurs adaptations ont été nécessaires pour les phénomènes de sensibilité angulaire et l'évitement d'instabilités dans la rétroaction fournie en temps réel. Le montage expérimental se veut le plus similaire à des conditions réelles d'utilisation, sauf pour la dimension de l'espace de travail.

Tous les utilisateurs ont réussi à converger à l'objectif dans tous les cas, ce qui montre un niveau de fiabilité excellent. L'extraction et le filtrage de paramètres d'évaluation de la performance qui ont une corrélation avec les paramètres du trajet, comme la vitesse moyenne de marche (0.27 m/s) et la largeur des corridors, permettent une éventuelle projection sur des distances plus longues. La largeur de corridor moyenne (0.39 m) est suffisamment serrée pour la marche sur les trottoirs avec l'aide d'une aide secondaire comme une canne. Afin d'améliorer encore les performances, une personnalisation est suggérée pour prendre en compte le type de prise en main et la posture générale de l'utilisateur.

Finalement, cette expérience démontre que le concept est fonctionnel et que la rétroaction choisie est intuitive. Avec une formation minimale, les sujets ont développé naturellement une stratégie d'orientation avec la boussole et ont réussi à s'orienter correctement.

Chapitre 6

Modèle de Marche et d'orientation

Les résultats expérimentaux précédemment obtenus permettent d'attester de l'efficacité du prototype dans un espace fermé et restreint. Pour permettre aux clients avec déficits visuels de se diriger dans un contexte réel, une méthode efficace d'estimation de leur comportement sur de longues distances est nécessaire.

Un modèle simulant la trajectoire potentielle des utilisateurs a été développé pour calculer des extrapolations de la performance sur le terrain. Aussi, il est utilisé pour identifier la sensibilité de la trajectoire empruntée à certains paramètres. Comme pressenti précédemment, l'effet de l'erreur statique entre l'orientation de l'individu et celle rapportée par le capteur a pu être identifié comme un paramètre de haute importance. Les phénomènes mis en relief par le modèle mènent à des suggestions pour la planification de trajectoire et la personnalisation à l'utilisateur.

6.1 Conception du modèle

Puisque l'objectif du modèle est d'obtenir des estimations et ordres de grandeur, l'approche de modélisation préconisée est celle de la simplicité. Pour ce faire, la conception se base sur un déplacement pas à pas. Chaque pas est modélisé comme un choix d'orientation uniquement dépendant du passé. L'assemblage successif des enjambées, d'index noté i , crée le parcours effectif.

Les paramètres géométriques du modèle sont montrés à la Fig.6.1. L'orientation vers l'objectif \vec{R}_i est la différence entre la position objectif \vec{P}_i et celle du marcheur $\vec{P}u_i$ (non-affiché sur la figure). L'écart entre l'orientation vers l'objectif et l'orientation mesurée par le capteur, notée $\vec{H}r_i$, donne le signal d'erreur ϵ_θ .

$$\vec{R}_i = \vec{P}u_i - \vec{P}_i \quad (6.1)$$

$$\cos(\epsilon_\theta) = \frac{\vec{H}r_i \bullet \vec{R}_i}{\|\vec{H}r_i\| \cdot \|\vec{R}_i\|} \quad (6.2)$$

En pratique, c'est cette valeur ϵ_θ qui gouverne le signal de rétroaction haptique. Pour la modélisation, on pose que l'utilisateur procède à un alignement entre chaque enjambée, de telle sorte que $\epsilon_\theta = 0^\circ$.

L'erreur statique d'orientation ε_f (pouvant aller jusqu'à 45°) est ensuite additionnée à ε_θ . L'angle ε_f représente donc la différence entre la direction de l'utilisateur réelle \vec{H}_u et celle mesurée par le capteur.

Cette dissonance entre la mesure et la réalité est composée de plusieurs facteurs :

- le type de prise en main du dispositif, à savoir s'il y a une rotation interne du bras, comme montré à la Fig.5.9,
- Des erreurs d'alignement lors de l'installation des marqueurs, à savoir l'interface entre les membres et le capteur,
- Un manque de précision lors de la l'étalonnage du système de capteurs.

Cette valeur, puisqu'elle varie peu durant le test, pourrait être corrigée par une personnalisation à l'utilisateur avant l'utilisation. Aussi, une méthode plus adaptative consisterait à calculer continuellement un estimateur à variation lente, en fonction des réactions observées ou d'un capteur secondaire. Cette valeur est différente selon chaque utilisateur et demeure sensiblement la même tout au long du test. Elle est déterminée par l'observation d'un ensemble de trajectoires parcourues. Si la trajectoire entre chaque point présente une déviation en arc de cercle, toujours du même côté, il est évident qu'il y a une erreur statique. L'amplitude de la déviation permet d'estimer la déviation fixe qui était présente durant le test. Par démarche itérative, les paramètres d'erreur fixes sont implantés dans le modèle et la comparaison de 10 courbes modélisées à la courbe actuelle permet de dire si les paramètres sont valides pour ce test particulier. Finalement, cet ensemble de paramètres d'entrée est validé lorsque l'ensemble des essais expérimentaux correspondent aux trajectoires modélisées.

Le modèle utilisé par la simulation procède par enjambées de longueur δ_s , marchées dans la direction effective \vec{H}_a , de telle sorte que

$$Pu_{i+1} = Pu_i + \delta_s \cdot \frac{\vec{H}_a}{\|\vec{H}_a\|} \quad (6.3)$$

Cette direction \vec{H}_a est calculée avec l'angle de déplacement effectif θ_{eff} comme suit :

$$\theta_{eff} = \varepsilon_\theta + \varepsilon_f + \varepsilon_r \quad (6.4)$$

$$\vec{H}_a = \begin{pmatrix} \cos(\theta_{eff}) & -\sin(\theta_{eff}) \\ \sin(\theta_{eff}) & \cos(\theta_{eff}) \end{pmatrix} \cdot \vec{H}r_i \quad (6.5)$$

La direction effective de marche \vec{H}_a prend donc en compte l'erreur d'orientation statique ε_f ainsi que l'erreur d'orientation aléatoire ε_r . L'erreur aléatoire est calculée à chaque itération dans une distribution uniforme et symétrique à gauche et à droite, avec limite maximale d'égarement angulaire. Sa valeur maximale est fixée comme la somme des sources d'erreur potentielles :

- L'absence d'information à l'intérieur de la zone d'acceptation (5°),
- Les erreurs de proprioception entre la sensation de direction du bras et la direction réelle,
- Les déviations à l'hypothèse posant $\varepsilon_\theta = 0$, soit que l'utilisateur fait une enjambée dans une direction qu'il sait être erronée,

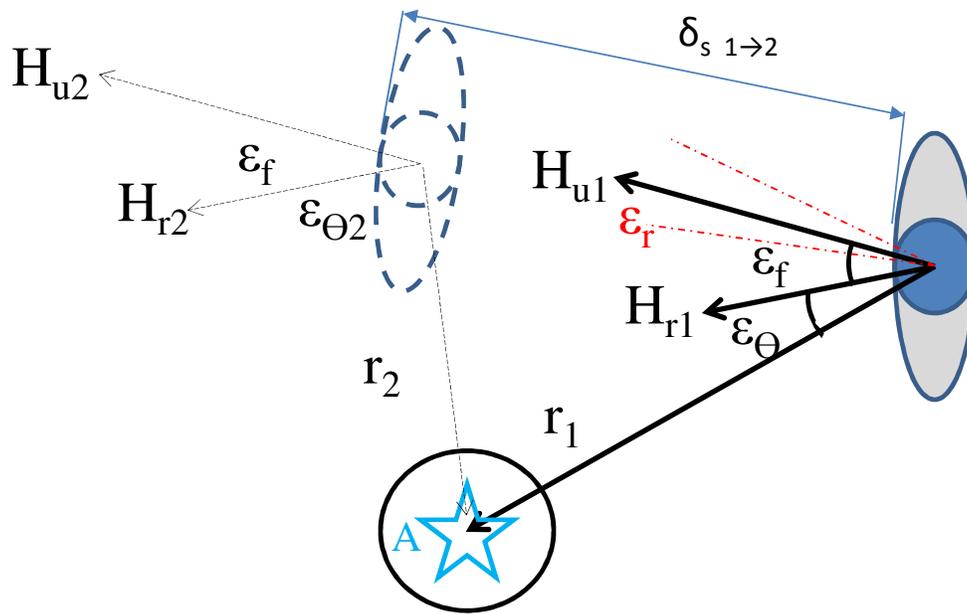


FIGURE 6.1 – Paramètres et variables utilisés pour modéliser la tâche d’orientation avec la boussole haptique.

- Les changements temporaires de la configuration de prise,
- La difficulté de coordination entre le déplacement du corps et la direction du bras,
- L’erreur sur la lecture du capteur Vicon ($\leq 1^\circ$),
- L’influence des stratégies utilisées, comme expliqué plus loin.

6.2 Validation du modèle

Le modèle étant basé sur une représentation paramétrique de la prise de décision pour un pas, il est important de valider au niveau macroscopique que l’accumulation des pas modélisés respecte la tendance observée. Pour ce faire, les trajectoires modélisées sont comparées aux trajectoires expérimentales en les superposant graphiquement et par une comparaison statistique des ensembles.

6.2.1 Comparaison par superposition

Les trajectoires générées par le modèle sont validées en les superposant avec les trajectoires expérimentales. Pour un sujet donné, un jeu de paramètres de modélisation est déterminé comme mentionné plus haut et permet de reproduire la tendance des comportements sur l’expérience complète. Des échantillons de tests expérimentaux avec deux sujets différents sont superposés avec les résultats du modèle à la Fig.6.2 et la Fig.6.3. Le sujet dont les résultats sont montrés à la Fig.6.2 tenait le dispositif avec une rotation interne importante, observée à environ 35° d’erreur entre la direction ou le dispositif pointe et celle du tronc.

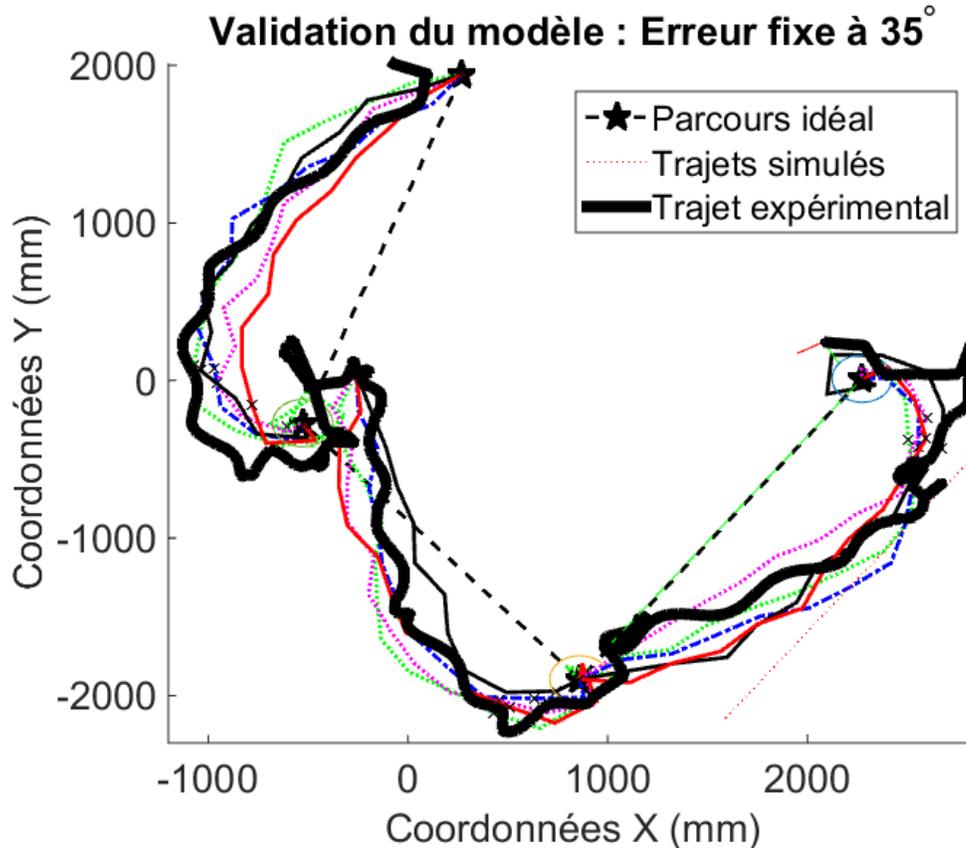


FIGURE 6.2 – Superposition de la trajectoire (sujet 20b) avec les résultats du modèle. L'erreur fixe ε_f est paramétrée à 35° , l'erreur aléatoire maximale ε_r est de 25° , la longueur des pas est de 0.25 m. Les 5 courbes sont générées aléatoirement par le modèle pour chaque essai successif.

Quant à lui, le sujet à la Fig.6.3 n'avait pas d'erreur statique notable due à la prise. Cet échantillon montre aussi que l'erreur statique est cohérente dans le temps, puisque les mêmes paramètres pour un individu permettent d'expliquer plusieurs essais consécutifs. La même constance peut être observée pour les autres sujets, en ajustant les paramètres à l'individu particulier. La tendance du modèle correspond aux trajectoires expérimentales, confirmant la validité de ce modèle pour décrire la tendance du phénomène observé.

6.2.2 Comparaison des distributions

Si les résultats précédents montrent que le modèle peut estimer la tendance de la trajectoire d'un utilisateur donné, une approche alternative de validation consiste à étudier les distributions statistiques des parcours simulés. Ainsi, on compare les distributions obtenues par l'échantillon d'utilisateurs expérimentaux avec les distributions d'une population simulée. La trajectoire type de comparaison est une ligne droite de 3 m, puisqu'il s'agit d'une longueur typique dans les essais expérimentaux. La population simulée est générée avec $n = 50000$ sujets où les paramètres sont assignés suivant une distribution normale de moyenne \bar{x} et d'écart-type σ_x pour chaque paramètre :

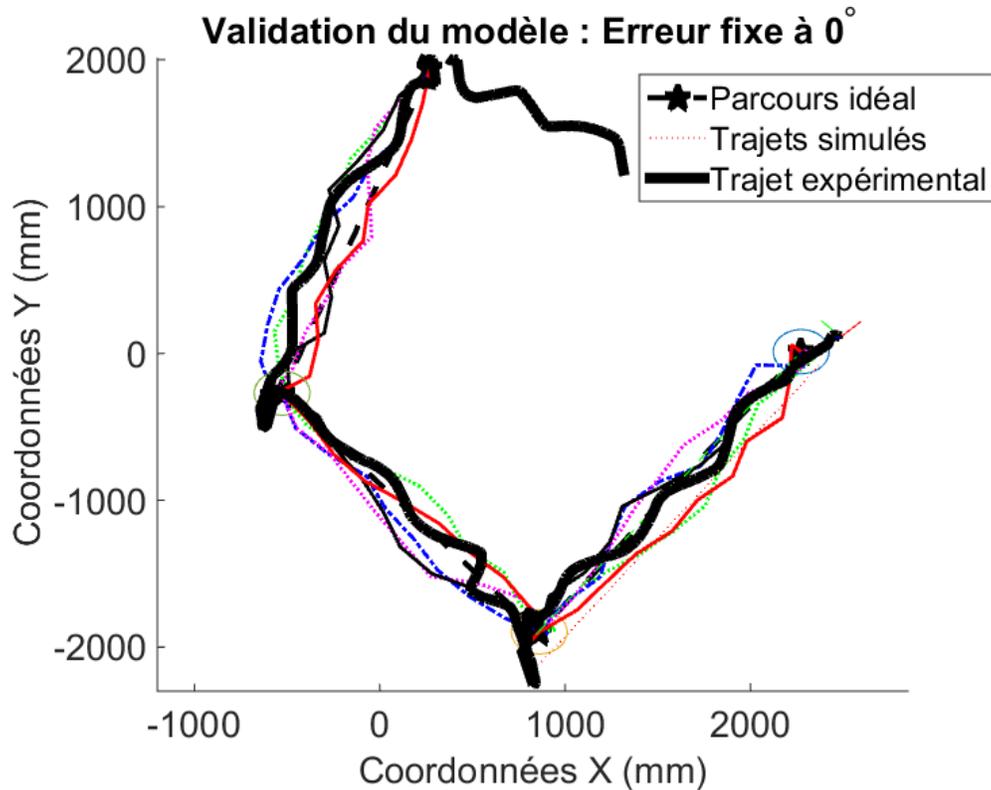


FIGURE 6.3 – Superposition de la trajectoire (sujet 7) avec les résultats du modèle. L’erreur fixe ε_f est paramétrée à 0° , l’erreur aléatoire maximale ε_r est de 25° , la longueur des pas est de 0.25 m. Les 5 courbes sont générées aléatoirement par le modèle pour chaque essai successif.

- La longueur d’un pas δ_s : $\bar{\delta}_s = 275 \text{ mm}, \sigma_{\delta_s} = 40 \text{ mm}$,
- L’erreur angulaire fixe ε_f : $(\bar{\varepsilon}_f = 12^\circ, \sigma_{\varepsilon_f} = 8.5^\circ)$,
- L’erreur aléatoire maximale ε_r est la même pour tous les sujets à 25° , puisque cette valeur est utilisée avec succès pour tous les sujets.

Les trajectoires obtenues subissent le même traitement qu’à l’expérimental pour obtenir les indices de performance pour la tâche. Il est à noter que les temps de convergence à l’objectif ne sont pas calculés, puisque les délais de décision et la vitesse de marche moyenne ne sont pas modélisés. Ainsi, seuls les corridors sont mesurés et comparés, puisqu’ils découlent directement de la trajectoire.

Les corridors modélisés sont une moyenne de $avg_m = 0.372 \text{ m}$ et un écart-type $std_m = 0.155 \text{ m}$. La distribution expérimentale parmi tous les essais a une distribution de $(avg_e = 0.39 \text{ m}, std_e = 0.23 \text{ m})$. Ces distributions sont comparées en utilisant un test statistique z-test Sprinthall [2011], afin de déterminer si l’échantillon expérimental peut être contenu à l’intérieur de la distribution modélisée. Les résultats montrent que ces deux distributions sont significativement distinctes l’une de l’autre ($p \leq 0.01$).

Bien que ce test montre une dissemblance entre les distributions, cela ne signifie pas pour autant que le modèle ne fonctionne pas. En effet, les paramètres d’entrée du modèle ont une influence majeure sur sa

sortie. Or, la population est modélisée aléatoirement et cette distribution des paramètres d'entrée n'est pas nécessairement représentative de l'échantillon d'utilisateurs. Néanmoins, ces estimés montrent que l'ordre de grandeur, ou la tendance, sont comparables. Il s'agit d'une erreur moyenne de l'ordre de 4.6% seulement. L'évaluation de la variance, pour sa part, n'est pas très représentative.

En résumé, ce modèle est validé par une superposition avec des tests expérimentaux, en utilisant un jeu de paramètres unique et cohérent pour un sujet donné. Un jeu de paramètres ajusté à un autre sujet permet de représenter adéquatement sa trajectoire également. La comparaison macroscopique des échantillons expérimentaux avec une population fictive générée aléatoirement n'est pas concluante, probablement à cause de la mauvaise représentativité d'une cette population fictive. Néanmoins, ce modèle semble suffisamment fidèle pour obtenir un ordre de grandeur des trajectoires et pour observer les tendances d'une variation de paramètres.

6.3 Sensibilité aux paramètres

Sachant que le modèle reproduit avec une certaine fiabilité le phénomène de déplacement, on peut l'utiliser comme outil pour tester l'effet des variables d'entrée.

Ainsi, une des utilités du modèle est d'évaluer l'impact individuel des différents paramètres d'entrée sur les trajectoires produites. Les résultats permettent aussi d'estimer la sensibilité de la sortie à ces paramètres individuels, identifiant ainsi les paramètres dominants.

Une seconde utilité est d'estimer les trajectoires pour des distances correspondant à un usage en milieu réel. Donc, il s'agit de calculer l'ordre de grandeur pour une extrapolation sur une longue distance. Le modèle est basé sur une trajectoire construite pas-à-pas, le modèle d'un pas étant indépendant de la distance totale à parcourir. Il est raisonnable que ce modèle demeure le même sans égard à la distance totale, puisque le comportement de marche demeure le même. Ce modèle permet donc d'obtenir l'ordre de grandeur des trajectoires pour des distances allongées avec un niveau de confiance intéressant. Au vu de la validation précédente, on peut s'attendre à ce que les tendances soient valides, ainsi que l'ordre de grandeur des résultats.

La sensibilité des paramètres est évaluée à partir d'une configuration de référence favorable. Les paramètres incluent donc une erreur fixe ε_f de 0° , avec $\varepsilon_r = 25^\circ$, $\delta_s = 0.3$ m dans une simulation de $N = 50\,000$ essais. Ces différentes configurations sont testées à plusieurs distances de parcours, afin de cerner leur importance dans une situation d'utilisation réelle. Au lieu de donner comme objectif la localisation finale à atteindre, la dernière distance affichée (*) utilise une technique d'horizon mouvant expliquée plus loin à la section 6.4. Les résultats sont présentés à la Tab.6.1.

Ce tableau montre clairement que l'erreur fixe ε_f est le paramètre qui engendre à lui seul le plus grand égarement du tracé optimal, soit la ligne droite. Ce phénomène s'accroît linéairement avec la longueur du trajet effectué, puisque les trajectoires sont à toutes fins pratiques homothétiques. Cette démonstration est conforme à l'hypothèse effectuée durant l'expérience complète, soit qu'elle a un

TABLE 6.1 – Sensibilité des corridors moyens aux paramètres d’entrée. Moyenne calculée sur $N = 50000$ trajectoires simulées. Les paramètres favorables de référence sont $\varepsilon_f = 0^\circ$, $\varepsilon_r = 25^\circ$, $\delta_s = 0.3$ m. Les autres jeux de paramètres ont pour seule variation la variable indiquée. La colonne (*) montre les résultats pour une simulation utilisant la stratégie d’horizon mobile sur l’objectif.

Distance parcourue	Corridors moyens (mm)			
	3 m	50 m	125 m	Horizon mobile 125 m*
Paramètres de référence	235.6	1150.6	1854.2	827.5
Erreur aléatoire ε_r @45°	442.3	2063.9	3326.9	1491.2
Longueur des pas δ_s @600 mm	347	1594.7	2586.6	1121.1
Erreur fixe ε_f @20°	492.2	6817.9	16752.5	1351.0
Erreur fixe ε_f @45°	1226.9	17268.6	42604.9	3189.8

grand impact sur les performances. Autant elle est à l’origine de l’égarement dans la singularité à proximité de l’objectif, autant elle a un effet à longue distance. Cette constatation permet de cibler cette problématique comme une priorité à régler par la personnalisation. En effet, une caractérisation initiale ou un estimateur en continu de ce paramètre permettrait de réaligner aisément la mesure et l’orientation effective de l’utilisateur. Le travail de Ali et al. [2014] pourrait être par exemple implémenté pour estimer le changement de repère entre l’utilisateur et le capteur (l’erreur fixe) en continu, permettant une flexibilité si la pose de l’utilisateur se modifie légèrement en cours de route. Le modèle démontre qu’une réduction de l’erreur fixe ε_f générerait une nette amélioration des performances d’orientation.

Le modèle confirme ainsi les observations expérimentales : les variations de l’erreur fixe et aléatoire nuisent à la performance du système. Les résultats montrent aussi que l’erreur aléatoire est de loin moins problématique que celle qui est fixe, spécialement à longue distance.

La distance parcourue, à elle seule, est un facteur de variabilité de la largeur des corridors. Cet effet peut s’expliquer par deux causes, une mineure et une dominante.

Une première explication est que la méthode de calcul du corridor, soit la valeur maximale d’égarement dans la trajectoire, peut causer cette variation en retenant seulement les extrêmes. En effet, si chaque pas a une part aléatoire et que l’éloignement maximal est fonction de la combinaison successive de pas malchanceux, alors un nombre de pas plus élevé augmente l’égarement maximal, statistiquement. Cet effet converge rapidement et se stabilise, puisque la probabilité d’occurrence d’une combinaison menant à un égarement encore plus grand diminue exponentiellement.

D’autre part, la sensibilité angulaire est affectée grandement par la distance à parcourir, ce qui cause un égarement majeur pour le scénario d’erreur fixe. En effet, la sensation d’erreur d’angle est quasi inexistante en début d’un parcours de 125 m, ce qui autorise une grande déviation absolue en distance latérale.

Une longueur des pas accrue augmente les corridors dans le modèle, certainement puisque les erreurs aléatoires créent des dents de scie plus prononcées. Cette segmentation en pas dans une direction unique est cependant une approximation du comportement de marche, puisque la trajectoire réelle de la marche suit une courbe lissée. L'impact réel des enjambées est ainsi inférieur à celui modélisé. Par rapport aux autres, ce paramètre a le moins grand impact sur l'égaré. Cette constatation est prometteuse pour l'utilisation en environnement réel, puisque l'augmentation des enjambées va de pair à une augmentation de la vitesse de marche.

6.4 Planification de trajet

Afin d'atteindre une destination donnée dans un environnement réel, le trajet doit être découpé en sous-instructions consécutives. Ces points de repère géographiques sont ainsi comparés à la position actuelle pour calculer la rétroaction d'orientation appropriée. À l'atteinte d'une de ces localisations, l'instruction suivante est activée. Un découpage de base consisterait à diviser une trajectoire complexe en segments de droite avec une instruction à chaque coin.

Or, ces segments peuvent être courts ou longs, selon le chemin à parcourir. Comme l'a démontré l'étude de sensibilité, la distance à parcourir entre la position actuelle et l'objectif a un impact important sur l'égaré latéral, ou corridor. L'explication principale est un manque de sensibilité angulaire lorsque le sujet est loin (voir la section 5.1.2).

6.4.1 Objectifs fixes aux coins

Puisque la sensibilité angulaire a un impact sur la performance d'orientation dans un environnement ouvert, elle doit être prise en compte lors de la planification de trajectoire. La stratégie de base pour la création d'un trajet complexe est de le séparer par tronçons reliant des points stratégiques, par exemple aux intersections des routes où l'on doit tourner. Or, cette technique de placement implique de grandes variations de sensibilité angulaire durant la navigation, puisque la distance entre ces points stratégiques n'est pas considérée. Aussi, le problème de singularité, ou sensibilité trop élevée à proximité des points stratégiques demeure entier.

Cette stratégie est utilisée en contexte forestier sans sentier, pour des sujets voyants, par Elliott et al. [2010]. Les tronçons sont des distances de 600 m et les corridors obtenus sont de l'ordre de 30 m. La Fig.6.4 montre une trajectoire obtenue expérimentalement.

Comme attendu, les courbes de trajectoire montrent des égarements en forme de banane et des déviations importantes juste après le départ d'un point de référence. Cela s'apparente aux résultats obtenus en simulation, puisque la sensibilité angulaire est plus faible à de longues distances. À l'approche des intersections, la sensibilité augmente et le sujet converge sur l'objectif local.

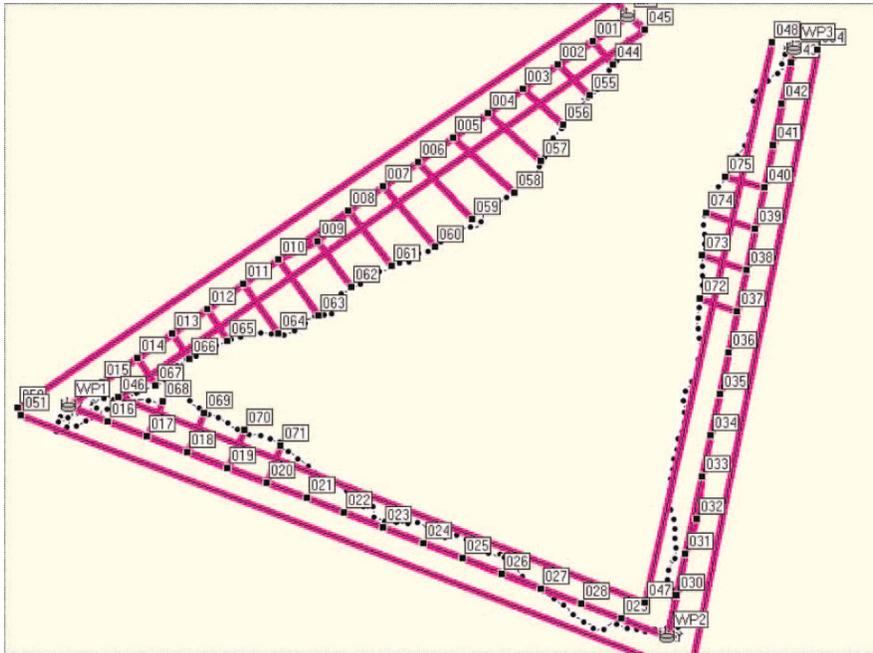


FIGURE 6.4 – Trajectoire obtenue par Elliott et al. [2010] avec une combinaison d’haptique et visuel, dans un espace de forêt.

6.4.2 Discrétisation des tronçons

Une amélioration à la méthode précédente consiste à utiliser une séquence de sous-objectifs le long du tronçon à parcourir. Cette séquence permet de réguler la sensibilité angulaire en uniformisant la distance à parcourir par discrétisation. Par exemple, dans la Fig.6.5, les points stratégiques de base sont le départ (1), le coin (5) et l’arrivée (6). Des points intermédiaires (2,3,4 et 6) sont ajoutés. L’espacement entre les points intermédiaires, ou niveau de discrétisation, influence l’uniformité de la sensibilité angulaire durant le parcours. Cette technique a comme propriété d’atténuer la variation de sensibilité, en fonction de l’intervalle de discrétisation choisi. Par contre, elle ne règle pas le problème de singularité à proximité d’un objectif.

Un problème supplémentaire commun à la méthode utilisant une suite de points déterminés est la condition de changement au prochain nœud local. Cette condition est d’arriver dans un rayon d’acceptation donné. Des incohérences peuvent survenir lorsque l’objectif local est dépassé latéralement, mais que la cible globale est devant. Une situation de dépassement local est illustrée à la Fig.6.5. Le passage d’un point à l’autre requiert donc un algorithme de changement de cible local intelligent et qui peut devenir complexe pour couvrir toutes les éventualités.

Cette technique est utilisée par Heuten et al. [2008] et est illustrée à la Fig.6.6. Cette ceinture haptique utilise des nœuds géographiques successifs placés à 15 m l’un de l’autre, principalement à cause de l’erreur importante du système de géolocalisation (GPS). La moyenne de l’égarement latéral sur le parcours est de 7.2 m, avec une maximum de l’ordre de 22.8 m. Fait intéressant, un test ultérieur a été

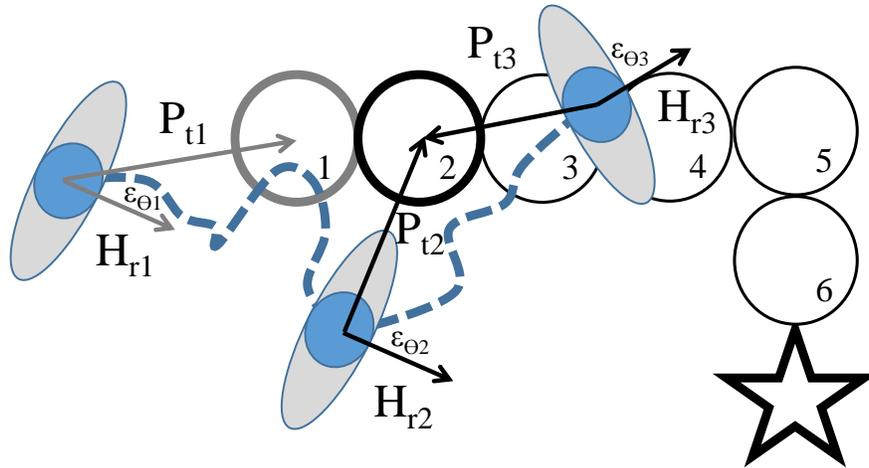


FIGURE 6.5 – Exemple de dépassement local qui n’en est pas un au niveau global. Le sujet passe à côté de la cible intermédiaire numéro 2 : les instructions le font revenir sur ses pas malgré qu’il l’ait dépassée et soit sur le bon chemin.

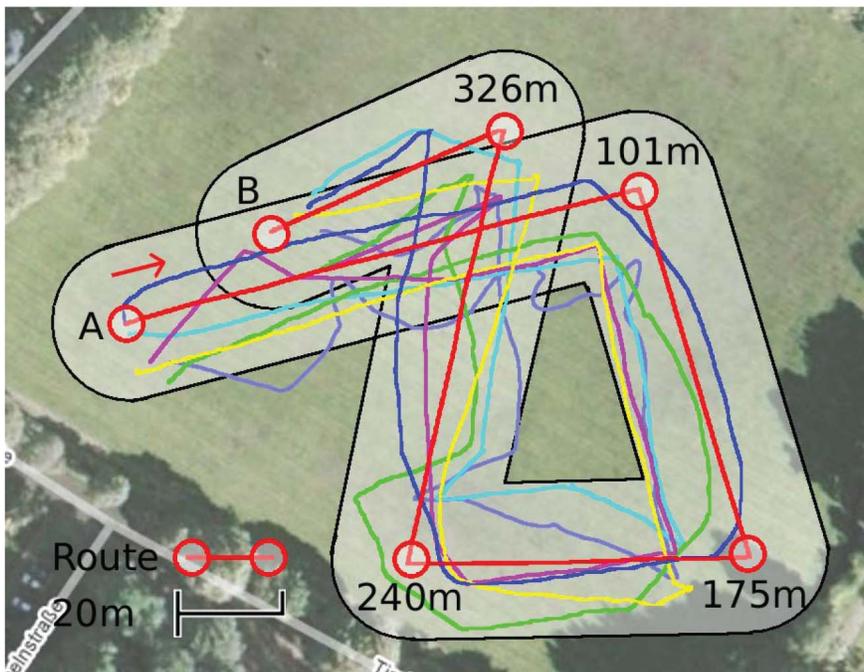


FIGURE 6.6 – Résultat de trajectoires avec des points de repère successifs et distanciés. Tiré de Heuten et al. [2008].

effectué avec des cibles plus rapprochées (5 m) et a obtenu de meilleures performances (moy=2.29 m, max=6.51 m). Cela corrobore l’affirmation que la sensibilité est mieux régulée avec une discrétisation plus fine.

6.4.3 Horizon défilant

La solution proposée pour régler ces problématiques de sensibilité, de singularité et de dépassement et d'utiliser une stratégie d'horizon défilant. La cible locale se déplace donc à distance définie de la position de l'utilisateur, projetée sur la trajectoire optimale.

Cette distance peut être ajustée pour être autour de 2 à 3 m pour obtenir un confort idéal. Ainsi, la sensibilité demeure constante et fournit une rétroaction dynamique, sans toutefois permettre l'arrivée dans une singularité. De plus, le dépassement d'un objectif local est impossible puisque celui-ci est adaptatif et non pas prédéfini.

L'avance à fournir à la cible défilante peut par ailleurs être ajustée selon plusieurs critères pour améliorer l'interaction avec l'utilisateur :

- En fonction des préférences de sensibilité de l'utilisateur, ce qui sera ressenti comme la « sensibilité » à l'erreur,
- Une adaptation automatique au rayon des tournants pour que la sensibilité sur un arc de cercle ne soit pas ressentie différemment,
- Un gain de sensibilité à proximité des obstacles pour favoriser leur évitement,
- Une adaptation selon les corridors requis pour l'environnement immédiat. Par exemple, une sensibilité élevée en bordure d'une route, moyenne sur une rue piétonne large et faible dans un parc gazonné. Cette flexibilité permet d'utiliser la pleine sensibilité lorsque nécessaire seulement et de laisser plus de latitude à l'utilisateur autrement.

Cette stratégie est testée par simulation dans la colonne notée « 125 m(*) Mobile » du Tab.6.1. La technique d'horizon défilant a un impact majeur sur les largeurs de corridors pour des trajets de longue distance. Cet effet est particulièrement marqué en présence d'une erreur fixe, où les gains sont les plus grands.

Avec cette méthode, les corridors convergent à une valeur limite sans égard à la distance finale, au-delà d'environ (≥ 10 m). En effet, puisque la sensibilité angulaire est régularisée, seule l'erreur aléatoire ϵ_r décrite plus haut entre en jeu, pour converger rapidement.

6.5 Conclusion

Un modèle de navigation spatiale simple par son approche pas à pas et le peu de paramètres requis a été présenté. Il est montré par superposition qu'il permet efficacement de reproduire la tendance des trajectoires expérimentales. Les résultats d'une étude de sensibilité de la trajectoire aux paramètres expérimentaux a permis de démontrer la dominance de la valeur fixe d'erreur entre la direction réelle de l'utilisateur et la lecture du capteur. Ce constat valide l'importance d'une personnalisation du dispositif à la physiologie et aux préférences de l'utilisateur.

De plus, le modèle est utilisé avec succès pour extrapoler le comportement d'orientation sur de longues distances. Les trajectoires modélisées montrent l'effet des longues distances sur les corridors, tout particulièrement lorsque le concept de sensibilité angulaire est négligé. Trois stratégies de planification de trajet sont ensuite présentées avec leurs caractéristiques respectives. Une approche d'horizon défilant du point courant à atteindre est proposée pour les trajets longs, puisqu'elle permet d'uniformiser la sensibilité angulaire et de régler la problématique des singularités.

Conclusion

Cette recherche présente un prototype de boussole haptique servant à faciliter les déplacements des marcheurs aux prises avec une limitation visuelle sévère. Les résultats expérimentaux valident la preuve de concept de l'approche proposée. Un essai dans un contexte réel d'utilisation reste à faire pour démontrer la fonctionnalité de cette technologie.

Le mémoire présente dans un premier temps une revue de la littérature connexe. Le contexte technologique actuel permet de mieux cerner le besoin. L'étude de la physiologie du toucher et des notions de psychophysique permettent d'orienter l'évaluation des stimuli. De plus, le survol et la catégorisation des technologies haptiques existantes avec leurs caractéristiques a permis de sélectionner un concept prometteur utilisant l'approche d'asymétrie.

Ensuite, la conception mécanique est détaillée afin de générer un prototype répondant aux requis de rendu haptique et d'ergonomie. Afin de permettre un asservissement de couple en boucle ouverte, ce prototype est étalonné et les perturbations mécaniques qu'il génère sont mesurées.

Afin d'optimiser la communication haptique, une série de tests successifs avec la boussole sont effectués avec des sujets. Les tests évaluent à la fois la réception perceptuelle des stimuli et leur efficacité pour la tâche spécifique d'orientation avec des critères quantitatifs. Une évaluation avec une approche multivariable permet de cibler une plage d'amplitudes et de fréquences performantes pour la conception de signaux haptiques. Ces plages sont subséquentement utilisés pour évaluer statistiquement la performance de signaux proportionnels à l'erreur d'orientation, positifs (« calmes ») ou négatifs (« brûlants »). Le signal retenu à l'issue de cette vague expérimentale est une stimulation positivement proportionnelle à l'approche de l'orientation objectif et employant un couple de 40 à 95 mNm et une fréquence entre 5 et 15 Hz.

Ce signal de rétroaction est utilisé dans un test en pleine grandeur où les sujets doivent suivre un parcours virtuel dans un environnement contrôlé. La position et l'orientation des sujets sont capturées par un système de caméras 3D Vicon et une rétroaction de correction est envoyée aux sujets via la boussole haptique. Les résultats de cette preuve de concept sont concluants, puisque l'ensemble des 19 sujets a réussi à parcourir le trajet et a donné une évaluation qualitative favorable de l'expérience utilisateur. Les performances quantitatives pour la tâche sont elles aussi évaluées : la vitesse moyenne de marche est de 0.27 m/s et la largeur moyenne de l'égarement latéral maximal moyen (corridors)

est de 0.39 m. L'analyse indique que des gains en termes de performance pourraient être réalisés par une personnalisation de la boussole à l'utilisateur.

Par ailleurs, puisque les tests se déroulent dans un espace restreint, un modèle de la navigation pédestre assistée a été développé pour estimer les performances probables sur de plus longues distances. Ce modèle est validé par sa concordance avec les parcours expérimentaux. Ces résultats peuvent être utiles pour déceler les tendances macroscopiques ainsi que l'allure globale des trajectoires. Le modèle est utilisé pour étudier la sensibilité des trajectoires aux paramètres d'entrée. L'analyse montre que l'erreur fixe d'orientation entre le capteur et l'utilisateur engendre les plus grandes déviations latérales. Finalement, une stratégie d'horizon défilant est proposée et permet d'amoindrir l'effet de la distance à parcourir sur la largeur des corridors de marche, car elle régule la sensibilité angulaire.

Au chapitre des développements ultérieurs, une validation expérimentale dans un environnement de marche réel est à effectuer. Pour ce faire, le nœud de calcul doit être remplacé par un contrôleur embarqué pour en permettre la portabilité. Aussi, une optimisation menant à la réduction de la taille et du poids de cette boussole est aisément envisageable avec les nouvelles données obtenues. Un protocole de personnalisation est à développer afin d'améliorer les performances pour chaque utilisateur spécifique.

L'ensemble de ces améliorations permettraient à la boussole haptique de cheminer vers le stade de développement pré-commercial, en étant par exemple intégrée à un GPS dédié aux utilisateurs avec des limitations visuelles. Une telle technologie haptique pourrait également trouver sa place dans les objets intelligents et connectés après une miniaturisation importante. À terme, cette boussole haptique contribuerait à améliorer l'ergonomie et la sécurité des dispositifs d'aide à l'orientation pour la clientèle présentant des difficultés visuelles.

Bibliographie

- A.S. Ali, J. Georgy, and D. Bruce Wright. Estimation of heading misalignment between a pedestrian and a wearable device. In *Localization and GNSS (ICL-GNSS), 2014 International Conference on*, pages 1–6, June 2014. doi : 10.1109/ICL-GNSS.2014.6934170.
- H. Amemiya, T. Gomi. Directional torque perception with brief, asymmetric net rotation of a flywheel. *Haptics, IEEE Transactions on*, 6(3) :370–375, July 2013. ISSN 1939-1412. doi : 10.1109/TOH.2012.38.
- T. Amemiya. Portable two-dimensional direction indicator with a pseudo-attraction force. In *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall), 2009 IEEE 70th*, pages 1–4, Sept 2009. doi : 10.1109/VETECF.2009.5378886.
- T. Amemiya and T. Maeda. Asymmetric oscillation distorts the perceived heaviness of handheld objects. *Haptics, IEEE Transactions on*, 1(1) :9–18, Jan 2008. ISSN 1939-1412. doi : 10.1109/TOH.2008.5.
- T. Amemiya and H. Sugiyama. Navigation in eight cardinal directions with pseudo-attraction force for the visually impaired. In *Systems, Man and Cybernetics, 2009. SMC 2009. IEEE International Conference on*, pages 27–32, Oct 2009. doi : 10.1109/ICSMC.2009.5346355.
- T. Amemiya, H. Ando, and T. Maeda. Hand-held force display with spring-cam mechanism for generating asymmetric acceleration. In *EuroHaptics Conference, 2007 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2007. Second Joint*, pages 572–573, March 2007. doi : 10.1109/WHC.2007.62.
- Tomohiro Amemiya and Taro Maeda. NOBUNAGA : Multicylinder-like pulse generator for kinesthetic illusion of being pulled smoothly. In Ferre, M, editor, *Haptics : Perception, Devices and Scenarios, Proceedings*, volume 5024 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 580–585. Univ Politecn Madrid, 2008. ISBN 978-3-540-69056-6. 6th EuroHaptics International Conference, Madrid, SPAIN, JUN 10-13, 2008.
- Tomohiro Amemiya, Hideyuki Ando, and Taro Maeda. Lead-me interface for a pulling sensation from hand-held devices. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 5(3) :15 :1–15 :17, September 2008. ISSN 1544-3558. doi : 10.1145/1402236.1402239.

- H Ando, M Sugimoto, and T Maeda. Wearable moment display device for nonverbal communications. *IEICE Transactions on Information and Systems*, E87D(6) :1354–1360, JUN 2004. ISSN 0916-8532.
- M. Antolini, M. Bordegoni, and U. Cugini. A haptic direction indicator using the gyro effect. In *World Haptics Conference (WHC), 2011 IEEE*, pages 251–256, June 2011. doi : 10.1109/WHC.2011.5945494.
- Akash Badshah, Sidhant Gupta, Daniel Morris, Shwetak Patel, and Desney Tan. Gyrotab : A handheld device that provides reactive torque feedback. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '12*, pages 3153–3156, New York, NY, USA, 2012. ACM. ISBN 978-1-4503-1015-4. doi : 10.1145/2207676.2208731. URL <http://doi.acm.org.access.bibl.ulaval.ca/10.1145/2207676.2208731>.
- Jr. ; Gescheider G. A. ; Verrillo R. T. ; Checkosky C. M. Bolanowski, S. J. Four channels mediate the mechanical aspects of touch. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84(5) :pp.1680–1694, 1988. doi : 10.1121/1.397184.
- A. Bolopion and S. Regnier. A review of haptic feedback teleoperation systems for micromanipulation and microassembly. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 10(3) :496–502, July 2013. ISSN 1545-5955. doi : 10.1109/TASE.2013.2245122.
- N.A. Bradley and M.D. Dunlop. Investigating context-aware clues to assist navigation for visually impaired people. 2002. Requires Template change to Chapter in Book/Report/Conference proceeding > Conference contribution : Proceedings of Workshop on Building Bridges : Interdisciplinary Context-Sensitive Computing.
- D. Braun, I. Tchouchenkov, and H. Worn. A framework for analysis and design of haptic interfaces. In *Mechatronics and Automation, 2008. ICMA 2008. IEEE International Conference on*, pages 261–267, Aug 2008. doi : 10.1109/ICMA.2008.4798763.
- D. Clark-Carter, A. Heyes, and C. Howarth. The efficiency and walking speed of visually impaired people. *Ergonomics*, 29(6) :779–789, 1986. doi : 10.1080/00140138608968314.
- T.R. Coles, D. Meglan, and N. John. The role of haptics in medical training simulators : A survey of the state of the art. *Haptics, IEEE Transactions on*, 4(1) :51–66, Jan 2011. ISSN 1939-1412. doi : 10.1109/TOH.2010.19.
- H. Culbertson, J.M. Romano, P. Castillo, M. Mintz, and K.J. Kuchenbecker. Refined methods for creating realistic haptic virtual textures from tool-mediated contact acceleration data. In *Haptics Symposium (HAPTICS), 2012 IEEE*, pages 385–391, March 2012. doi : 10.1109/HAPTIC.2012.6183819.

- Mark R. Cutkosky and John Ulmen. Dynamic tactile sensing. In Ravi Balasubramanian and Veronica J. Santos, editors, *The Human Hand as an Inspiration for Robot Hand Development*, number 95 in Springer Tracts in Advanced Robotics, pages 389–403. Springer International Publishing, January 2014. ISBN 978-3-319-03016-6, 978-3-319-03017-3. URL http://link.springer.com/acces.bibl.ulaval.ca/chapter/10.1007/978-3-319-03017-3_18.
- Nienke B. Debats, Idsart Kingma, Peter J. Beek, Jeroen B. J. Smeets, and Markus Lappe. Moving the weber fraction : The perceptual precision for moment of inertia increases with exploration force. *PLoS ONE*, 7(9) :1 – 9, 2012. ISSN 19326203. URL <https://acces.bibl.ulaval.ca/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=82445952&lang=fr&site=ehost-live>.
- Lionel Dominjon, Jérôme Perret, and Anatole Lécuyer. Novel devices and interaction techniques for human-scale haptics. *The Visual Computer*, 23(4) :257–266, 2007. ISSN 0178-2789. doi : 10.1007/s00371-007-0100-4. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00371-007-0100-4>.
- Gregory Dudek and Michael Jenkin. *Computational Principles of Mobile Robotics*. Cambridge University Press, New York, NY, USA, 2nd edition, 2010. ISBN 0521871573, 9780521871570.
- L.R. Elliott, J. van Erp, E.S. Redden, and M. Duistermaat. Field-based validation of a tactile navigation device. *Haptics, IEEE Transactions on*, 3(2) :78–87, April 2010. ISSN 1939-1412. doi : 10.1109/TOH.2010.3.
- Philippe Fuchs and Guillaume Moreau. Le traité de la réalité virtuelle–Volume 1 : fondements et interfaces comportementales. *Les presses de l’École des Mines*, 2003.
- C Gosselin, A Lecours, T Laliberté, and M Fortin. Design and experimental validation of planar programmable inertia generators. *The International Journal of Robotics Research*, 2013. doi : 10.1177/0278364913507612. URL <http://ijr.sagepub.com/content/early/2013/11/11/0278364913507612.abstract>.
- Florian Gosselin, Claude Andriot, Joan Savall, and Javier Martín. Large workspace haptic devices for human-scale interaction : A survey. In Manuel Ferre, editor, *Haptics : Perception, Devices and Scenarios*, volume 5024 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 523–528. Springer Berlin Heidelberg, 2008. ISBN 978-3-540-69056-6. doi : 10.1007/978-3-540-69057-3_66. URL http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-69057-3_66.
- Ashley L. Guinan, Nicholas C. Hornbaker, Markus N. Montandon, Andrew J. Doxon, and William R. Provancher. Back-to-back skin stretch feedback for communicating five degree-of-freedom direction cues. In *World Haptics*, pages 13–18. IEEE, 2013. ISBN 978-1-4799-0087-9. URL <http://dblp.uni-trier.de/db/conf/haptics/whc2013.html#GuinanHMDP13>.

- H. Hamaguchi, T. Amemiya, T. Maeda, and H. Ando. Design of repetitive knocking force display for being-pulled illusion. In *RO-MAN, 2010 IEEE*, pages 33–37, Sept 2010. doi : 10.1109/ROMAN.2010.5598717.
- V. Hayward, O. Astley, M. Cruz-Hernandez, D. Grant, and G Robles-De-La-Torre. The role of haptics in medical training simulators : A survey of the state of the art. *Sensor Review*, 24(1) :16–29, Jan 2004. ISSN 0260-2288. doi : 10.1108/02602280410515770.
- Fabian Hemmert, Susann Hamann, Matthias Löwe, Josefine Zeipelt, and Gesche Joost. Weight-shifting mobiles : Two-dimensional gravitational displays in mobile phones. In *CHI '10 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '10, pages 3087–3092, New York, NY, USA, 2010. ACM. ISBN 978-1-60558-930-5.
- Henkel Corporation. Retaining compound design guide, 2013. URL http://www.henkelna.com/us/content_data/356776_9294_LT5021_Retaining_Brochure_F.pdf.
- Wilko Heuten, Niels Henze, Susanne Boll, and Martin Pielot. Tactile wayfinder : A non-visual support system for wayfinding. In *Proceedings of the 5th Nordic Conference on Human-computer Interaction : Building Bridges*, NordiCHI '08, pages 172–181, New York, NY, USA, 2008. ACM. ISBN 978-1-59593-704-9. doi : 10.1145/1463160.1463179.
- M. Hirose, K. Hirota, T. Ogi, H. Yano, N. Kakehi, M. Saito, and M. Nakashige. Hapticgear : the development of a wearable force display system for immersive projection displays. In *Virtual Reality, 2001. Proceedings. IEEE*, pages 123–129, March 2001. doi : 10.1109/VR.2001.913778.
- L.A. Jones and H.Z. Tan. Application of psychophysical techniques to haptic research. *Haptics, IEEE Transactions on*, 6(3) :268–284, July 2013. ISSN 1939-1412. doi : 10.1109/TOH.2012.74.
- Philip Kortum. *HCI beyond the GUI : design for haptic, speech, olfactory and other nontraditional interfaces /*. Morgan Kaufmann series in interactive technologies. Elsevier/Morgan Kaufmann, Amsterdam ; Boston, 2008. ISBN 9780123740175 (pbk. : alk. paper). URL <http://ariane.ulaval.ca/cgi-bin/recherche.cgi?qu=i9780123740175>. Bibliogr. : p. 432-444.
- R.L. Koslover, B.T. Gleeson, J.T. de Bever, and W.R. Provancher. Mobile navigation using haptic, audio, and visual direction cues with a handheld test platform. *Haptics, IEEE Transactions on*, 5(1) :33–38, Jan 2012. ISSN 1939-1412. doi : 10.1109/TOH.2011.58.
- U. Kunzler and C. Runde. Kinesthetic haptics integration into large-scale virtual environments. In *Eurohaptics Conference, 2005 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005. World Haptics 2005. First Joint*, pages 551–556, March 2005. doi : 10.1109/WHC.2005.84.
- X. Liu, G. Dodds, J. McCartney, and B.K. Hinds. Virtual designworks—designing 3d {CAD} models via haptic interaction. *Computer-Aided Design*, 36(12) :1129 – 1140, 2004. ISSN 0010-4485. doi :

<http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2003.10.003>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448503002197>.

Joseph Luk, Jerome Pasquero, Shannon Little, Karon MacLean, Vincent Levesque, and Vincent Hayward. A role for haptics in mobile interaction : Initial design using a handheld tactile display prototype. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '06, pages 171–180, New York, NY, USA, 2006. ACM. ISBN 1-59593-372-7. doi : 10.1145/1124772.1124800. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1124772.1124800>.

Zhou Ma, Phinas Ben-Tzvi, and Jerome Danoff. Modeling the human hand and sensing hand motions with the five-fingeredhaptic glove mechanism. 2014.

N. Nakamura and Y. Fukui. Development of a force and torque hybrid display "gyrocubestick". In *Eurohaptics Conference, 2005 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005. World Haptics 2005. First Joint*, pages 633–634, March 2005. doi : 10.1109/WHC.2005.37.

National Federation of the Blind USA. Technology resource list, 2015. URL <https://nfb.org/technology-resource-list#GPSSys>.

Tomi Nukarinen, Roope Raisamo, Johannes Pystynen, and Erno Mäkinen. Nonvisnavi : Non-visual mobile navigation application for pedestrians. In Poika Isokoski and Jukka Springare, editors, *Haptics : Perception, Devices, Mobility, and Communication*, volume 7283 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 214–217. Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN 978-3-642-31403-2. doi : 10.1007/978-3-642-31404-9_39. URL http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-31404-9_39.

M. O'Malley and M. Goldfarb. The effect of force saturation on the haptic perception of detail. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 7(3) :280–288, Sep 2002. ISSN 1083-4435. doi : 10.1109/TMECH.2002.802725.

M. Paré. *Étude de la perception de la force tangentielle : processus neurophysiologiques et psychophysiques chez le singe et l'humain*. Université de Montréal, 2001. URL <http://books.google.ca/books?id=mSxyHQAACAAJ>.

Jerome Pasquero, Joseph Luk, Vincent Levesque, Qi Wang, Vincent Hayward, and Karon E. MacLean. Haptically enabled handheld information display with distributed tactile transducer. *IEEE Transactions on Multimedia*, 9(4) :746–753, JUN 2007. ISSN 1520-9210. doi : {10.1109/TMM.2007.895672}.

Nicolo Pedemonte, Frédéric Berthiaume, Thierry Laliberté, and Clément Gosselin. Design and experimental validation of a two-degree-of-freedom force illusion device. In *Proceedings of the ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2014*. ASME, 2014.

- Roope Raisamo, Tomi Nukarinen, Johannes Pystynen, Erno Mäkinen, and Johan Kildal. Orientation inquiry : A new haptic interaction technique for non-visual pedestrian navigation. In Poika Isokoski and Jukka Springare, editors, *Haptics : Perception, Devices, Mobility, and Communication*, volume 7283 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 139–144. Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN 978-3-642-31403-2. doi : 10.1007/978-3-642-31404-9_24. URL http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-31404-9_24.
- J.M. Romano and K.J. Kuchenbecker. The airwand : Design and characterization of a large-workspace haptic device. In *Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on*, pages 1461–1466, May 2009. doi : 10.1109/ROBOT.2009.5152339.
- J.M. Romano, S.R. Gray, N.T. Jacobs, and K.J. Kuchenbecker. Toward tactilely transparent gloves : Collocated slip sensing and vibrotactile actuation. In *EuroHaptics conference, 2009 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2009. Third Joint*, pages 279–284, March 2009. doi : 10.1109/WHC.2009.4810815.
- Dominique Rose. Sites des neurobranchés - le système nerveux, March 2004. URL <http://neurobranches.chez-alice.fr/systnerv/systsens/somesthesie2.html>.
- HE Ross and EE Brodie. Weber Fractions for Weight and Mass as a Function of Stimulus-Intensity. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, Section A-Human Experimental Psychology*, 39(1) : 77–88, FEB 1987. ISSN 0272-4987.
- Matasaka Sakai, Yukio Fukui, and Norio Nakamura. Proc. the 2003 International Conference on Augmented Teleexistence. In *Proc. the 2001 International Conference on Augmented Teleexistence. ICAT, 2003*.
- Evren Samur. *Performance Metrics for Haptic Interfaces*. Springer Series on Touch and Haptic Systems. Springer, 2012. ISBN 978-1-4471-4224-9.
- Takuya Shima and Kenjiro Takemura. An ungrounded pulling force feedback device using periodical vibration-impact. In Poika Isokoski and Jukka Springare, editors, *Haptics : Perception, Devices, Mobility, and Communication*, volume 7282 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 481–492. Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN 978-3-642-31400-1. doi : 10.1007/978-3-642-31401-8_43. URL http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-31401-8_43.
- Richard C. Sprinthall. *Basic Statistical Analysis 9th ed*. Pearson, 2011. ISBN 9780205052172. URL <http://www.amazon.com/Basic-Statistical-Analysis-9th-Edition/dp/0205052177>.
- Mayuree Srikulwong and Eamonn O’Neill. A comparative study of tactile representation techniques for landmarks on a wearable device. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '11*, pages 2029–2038, New York, NY, USA, 2011. ACM. ISBN 978-1-4503-0228-9. doi : 10.1145/1978942.1979236. URL <http://doi.acm.org.acces.bibl.ulaval.ca/10.1145/1978942.1979236>.

- Kay M Stanney. *Handbook of virtual environments : design, implementation, and applications*. Human factors and ergonomics. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ, 2002. ISBN 080583270X (alk. paper). Bibliogr.
- E. Steinbach, S. Hirche, M. Ernst, F. Brandi, R. Chaudhari, J. Kammerl, and I. Vittorias. Haptic communications. *Proceedings of the IEEE*, 100(4) :937–956, April 2012. ISSN 0018-9219. doi : 10.1109/JPROC.2011.2182100.
- Matthew Streit, Kevin Shockley, and Michael A. Riley. Rotational inertia and multimodal heaviness perception. *Psychonomic Bulletin & Review*, 14(5) :1001–1006, OCT 2007. ISSN 1069-9384. doi : {10.3758/BF03194135}.
- Colin Swindells, Alex Unden, and Tao Sang. Torquebar : An ungrounded haptic feedback device. In *Proceedings of the 5th International Conference on Multimodal Interfaces, ICMI '03*, pages 52–59, New York, NY, USA, 2003. ACM. ISBN 1-58113-621-8. doi : 10.1145/958432.958445. URL <http://doi.acm.org.acces.bibl.ulaval.ca/10.1145/958432.958445>.
- Yokichi Tanaka, Sakai Matasaka, Kohno Yuka, Yukio Fukui, Juli Yamashita, and Norio Nakamura. Proc. the 2001 International Conference on Augmented Teleexistence. In *Proc. the 2001 International Conference on Augmented Teleexistence*, pages 115–120. ICAT, 2001.
- Hanns W. Tappeiner, Roberta L. Klatzky, Bert Unger, and Ralph Hollis. Good Vibrations : Asymmetric Vibrations for Directional Haptic Cues. In *World Haptics 2009 : Third Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator System, Proceedings*, pages 285–289. IEEE Robot & Automat Soc ; IEEE Tech Comm Hapt, 2009. ISBN 978-1-4244-3858-7. doi : {10.1109/WHC.2009.4810863}. 3rd Joint EuroHaptics Conference Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Salt Lake City, UT, MAR 18-20, 2009.
- M Tavakoli. *Haptics for teleoperated surgical robotic systems /*. New frontiers in robotics. World Scientific, Hackensack, N.J, c2008. ISBN 9789812813152. URL <http://ariane.ulaval.ca/cgi-bin/recherche.cgi?qu=a1903121>. Bibliogr. : p. 145-156.
- Mohsin I. Tiwana, Stephen J. Redmond, and Nigel H. Lovell. A review of tactile sensing technologies with applications in biomedical engineering. *Sensors and Actuators A : Physical*, 179(0) :17 – 31, 2012. ISSN 0924-4247. doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2012.02.051>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424712001641>.
- G.J. Tortora and B.H. Derrickson. *Principles of Anatomy and Physiology*. John Wiley & Sons, 2008. ISBN 9780470084717. URL <http://books.google.ca/books?id=uNwfOPPYgKAC>.
- W. Van. Cogging compensation in embedded brushless motor control for haptics applications, 2013. URL <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3A27993f5c-230f-4c48-80d6-3d8bf5cd476e/>.

- Femke E. van Beek, Wouter M. Bergmann Tiest, and Astrid M. L. Kappers. Anisotropy in the haptic perception of force direction and magnitude. 2013.
- Janet Van der Linden, Yvonne Rogers, Maria Oshodi, Adam Spiers, David McGoran, Rafael Cronin, and Paul. O'Dowd. Haptic reassurance in the pitch black for an immersive theatre experience. In *Proceedings of the 13th International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2011)*, pages 143–152, 2011.
- J. Wilson, B.N. Walker, J. Lindsay, C. Cambias, and F. Dellaert. Swan : System for wearable audio navigation. In *Wearable Computers, 2007 11th IEEE International Symposium on*, pages 91–98, Oct 2007. doi : 10.1109/ISWC.2007.4373786.
- K.N. Winfree, J. Gewirtz, T. Mather, J. Fiene, and K.J. Kuchenbecker. A high fidelity ungrounded torque feedback device : The itorqu 2.0. In *EuroHaptics conference, 2009 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2009. Third Joint*, pages 261–266, March 2009. doi : 10.1109/WHC.2009.4810866.
- K.N. Winfree, J.M. Romano, J. Gewirtz, and K.J. Kuchenbecker. Control of a high fidelity ungrounded torque feedback device : The itorqu 2.1. In *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, pages 1347–1352, May 2010. doi : 10.1109/ROBOT.2010.5509485.
- Tae-Heon Yang, Dongbum Pyo, Sang-Youn Kim, Young-Jun Cho, Yu Dong Bae, Young Min Lee, Jeong-Seok Lee, Eun-Hwa Lee, and Dong-Soo Kwon. A new subminiature impact actuator for mobile devices. In *World Haptics Conference (WHC), 2011 IEEE*, pages 95–100, June 2011. doi : 10.1109/WHC.2011.5945468.
- H. Yano, M. Yoshie, and H. Iwata. Development of a non-grounded haptic interface using the gyro effect. In *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2003. HAPTICS 2003. Proceedings. 11th Symposium on*, pages 32–39, March 2003. doi : 10.1109/HAPTIC.2003.1191223.
- H. Yano, K. Komine, and H. Iwata. Development of a high-resolution surface type haptic interface for rigidity distribution rendering. In *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2006 14th Symposium on*, pages 355–360, March 2006. doi : 10.1109/HAPTIC.2006.1627135.
- Matthew Piccoli ; Mark Yim. Cogging torque ripple minimization via position based characterization. In *Proceedings of Robotics : Science and Systems*, Berkeley, USA, July 2014. URL <http://www.roboticsproceedings.org/rss10/p42.pdf>.
- Takamichi Yoshimoto, Katsuhiro Hirata, Yasuyoshi Asai, Kenji Ueyama, Eiichiro Hashimoto, and Takahiro Takagi. Asymmetric Acceleration Drive Using Linear Oscillatory Actuator under Open-Loop Control. *Przegląd Elektrotechniczny*, 88(7B) :44–47, 2012. ISSN 0033-2097.