



HAL
open science

Assistance vibrotactile à l'interception locomotrice de cibles mobiles : étude de faisabilité

Antoine H.P. Morice, Bruno Mantel, Elise Faugloire

► To cite this version:

Antoine H.P. Morice, Bruno Mantel, Elise Faugloire. Assistance vibrotactile à l'interception locomotrice de cibles mobiles : étude de faisabilité. 56e congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française (SELF 2022) : Vulnérabilités et risques émergents : penser et agir ensemble pour transformer durablement, Société d'ergonomie de langue française (SELF), Jul 2022, Genève, Suisse. pp.348-353. hal-03759604

HAL Id: hal-03759604

<https://hal.science/hal-03759604>

Submitted on 24 Aug 2022

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

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



56^{ème} CONGRÈS SELF
6 - 8 juillet 2022
**VULNÉRABILITÉS ET
RISQUES ÉMERGENTS**
penser et agir ensemble pour
transformer durablement

EBSCOhost

*The full text of SELF congresses
proceedings in Ergonomics Abstracts is
included in Academic Search Ultimate on
EBSCOhost™*

www.ergonomie-self.org

→ Ergonomics abstract

Assistance vibrotactile à l'interception locomotrice de cibles mobiles : étude de faisabilité

MORICE, Antoine H.P. ; MANTEL, Bruno ; FAUGLOIRE, Elise

Aix Marseille Univ, CNRS, ISM, Marseille, France ; antoine.morice@univ-amu.fr

Normandie Univ, UNICAEN, CESAMS, Caen, France ; bruno.mantel@unicaen.fr ;
elise.faugloire@unicaen.fr

Résumé. Peut-on assister les actions locomotrices d'interception de cibles mobiles en absence de vision grâce à un dispositif de suppléance sensorielle tactile ? Lorsque la cible à intercepter est visible, une personne peut ajuster sa vitesse de déplacement de façon à annuler le taux de changement de l'angle entre sa direction de déplacement et celle de la cible (*constant bearing angle*, CBA). Nous présentons ici les développements technologiques et une étude de faisabilité visant à évaluer l'utilisabilité d'un dispositif de suppléance sensorielle tactile destiné à assister les actions locomotrices d'interception. Nos résultats suggèrent que moyennant une période d'apprentissage, le couplage CBA, naturellement observé lorsque la vision est disponible peut être maintenu lors de l'utilisation de notre dispositif. Nous discutons les résultats préliminaires de cette étude au regard des changements expérimentaux que nous introduirons à l'avenir dans notre programme scientifique.

Mots-clés: System design and interface engineering; Tactile communication; Psychophysics and psychological scaling; Virtual displays.

Vibrotactile aids for locomotor interception: a feasibility study

Abstract. Can we assist the locomotor actions of intercepting moving targets in the absence of vision using a tactile sensory augmentation system? When the target to be intercepted is visible, a person can adjust their walking speed so as to null the rate of change of the angle between their direction and the target (maintaining *constant bearing angle*, CBA). We present technological developments and a feasibility study evaluating the usability of a tactile sensory augmentation device intended to assist the locomotor actions of interception. Our results suggest that CBA coupling, which is naturally observed when vision is available, can be maintained when using our device, after a training period. We discuss the preliminary results of this study in the light of the experimental changes we will introduce into our scientific program in the future.

Keywords: System design and interface engineering; Tactile communication; Psychophysics and psychological scaling; Virtual displays.

*Ce texte original a été produit dans le cadre du congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française qui s'est tenu à Genève les 6, 7 et 8 juillet 2022. Il est permis d'en faire une copie papier ou digitale pour un usage pédagogique ou universitaire, en citant la source exacte du document, qui est la suivante :

MORICE, Antoine H.P., MANTEL, Bruno FAUGLOIRE, Elise (2022). Assistance vibrotactile à l'interception locomotrice de cibles mobiles : étude de faisabilité. Actes du 56ème Congrès de la SELF, Vulnérabilités et risques émergents : penser et agir ensemble pour transformer durablement. Genève, 6 au 8 juillet 2022.

Aucun usage commercial ne peut en être fait sans l'accord des éditeurs ou archiveurs électroniques. Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page.

INTRODUCTION

Comment assister une personne malvoyante ou évoluant sans visibilité (obscurité, brouillard, fumée) dans la régulation de ses déplacements parmi d'autres personnes, véhicules ou objets mobiles afin de les rejoindre, de les intercepter, ou au contraire, d'éviter une collision ? Dans cet article, nous étudions les comportements locomoteurs d'interception de cibles mobiles assistés par un dispositif vibrotactile et leur évolution avec l'apprentissage.

Les dispositifs de substitution sensorielle popularisés par Bach-Y-Rita (1969) permettent de convertir des informations habituellement accessibles par une modalité sensorielle en une forme exploitable par une autre modalité sensorielle. Parmi les différents dispositifs étudiés, les ceintures vibrotactiles se sont révélées être particulièrement efficaces pour assister la navigation en l'absence de vision. Il a notamment été démontré qu'elles permettent de guider l'orientation du corps de façon plus précise et plus rapide qu'un guidage verbal (Faugloire & Lejeune, 2014) et qu'elles permettent la navigation pédestre ou véhiculée en environnement ouvert et naturel grâce à des points de cheminement (van Erp et al., 2005).

Afin d'évaluer si les capacités d'action permises par ce type de dispositifs peuvent être élargies à la régulation des déplacements par rapport à une cible mobile, il semble crucial de préserver le couplage information-mouvement qui existe naturellement en situation non-médiée. Pour les actions d'interception, le couplage CBA (Constant Bearing Angle, Chapman, 1968) consistant à annuler à tout moment le taux de changement de l'angle entre la cible à intercepter et la direction du déplacement de l'observateur (cad. l'angle de relèvement ; Figure 1) en régulant la vitesse de locomotion a largement été mis en évidence dans la littérature (Bastin, Craig, et al., 2006; Chardenon et al., 2005; Lenoir et al., 2002; Morice et al., 2010). La préservation du couplage CBA par un dispositif de suppléance sensorielle tactile semble possible car l'excentricité angulaire de la cible peut être référée à la direction du déplacement de l'observateur grâce à plusieurs stimuli sensoriels : un repère visuel égocentrique asservi à l'opérateur (Chardenon et al., 2004); le focus d'expansion optique (Chardenon et al., 2004); la tension musculaire des muscles du cou lorsque la tête est orientée vers la cible et le corps orienté dans la direction du déplacement (Bastin, Calvin, et al., 2006). De plus, bien que dans une grande majorité de ces travaux le déplacement de l'opérateur soit contraint sur un seul axe, le couplage CBA permet de réaliser des interceptions en se déplaçant librement (Fajen & Warren, 2004, 2007; Lenoir et al., 2002).

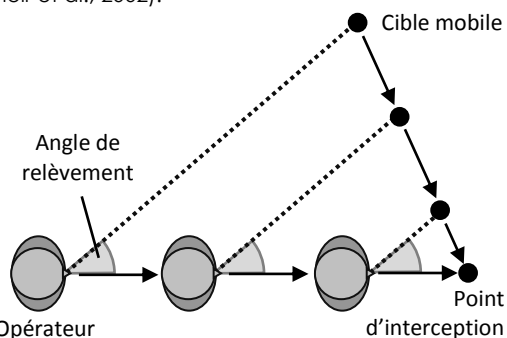


Figure 1 : Illustration d'un déplacement régulé selon le couplage CBA.

L'utilisabilité potentielle d'un dispositif vibrotactile pour assister les actions d'interception de cibles mobiles

s'appuie donc non seulement sur la possibilité de percevoir l'excentricité angulaire d'une cible à intercepter de manière égocentrique avec un tel dispositif mais également sur la possibilité d'intercepter une cible mobile à l'aide du couplage CBA en se déplaçant librement dans l'espace. Notre approche a donc consisté à comparer les comportements locomoteurs d'interception réalisés avec la vision avec ceux réalisés à l'aide d'un dispositif vibrotactile, ainsi que leur évolution avec l'apprentissage. Nous présentons ici les développements technologiques et une étude de faisabilité.

MÉTHODE

Population

Quatre hommes (22±1 ans) naïfs dans l'utilisation de réalité virtuelle et d'appareils vibrotactiles ont été recrutés via le bouche-à-oreille au sein d'Aix-Marseille Université pour participer à cette étude préliminaire. Deux participants pouvaient visualiser les cibles mobiles à intercepter en réalité virtuelle (condition « Vision ») et deux autres participants sentaient par vibration sur leur abdomen la position angulaire ainsi que la taille des cibles à intercepter à l'aide d'un dispositif tactile (condition « VibroTactile »).

Dispositif expérimental

La Figure 2 illustre l'équipement individuel utilisé. Chaque participant portait sur son torse un harnais auquel était fixé un HTC Vive Tracker mesurant en temps réel la position et l'orientation de son buste en référence à deux stations (HTC® Vive™ Lighthouse) fixées aux coins opposés de la salle (Figure 3 pour un plan d'ensemble). Les positions et rotations étaient ensuite transmises sans fil à un Vive dongle connecté en USB à l'ordinateur hôte (MS Windows 10 Professionnel, Processeur Intel® Core™ i7-4960X @3.60 GHz) qui mettait à jour les stimulations sensorielles via le moteur 3D temps réel Unity3D (version 2020.2.3.F.1, LTS, San Francisco, US). L'interfaçage entre Unity3D et les périphériques HTC® Vive™ était réalisée par le plugin SteamVR (Valve Corporation, Bellevue, US).

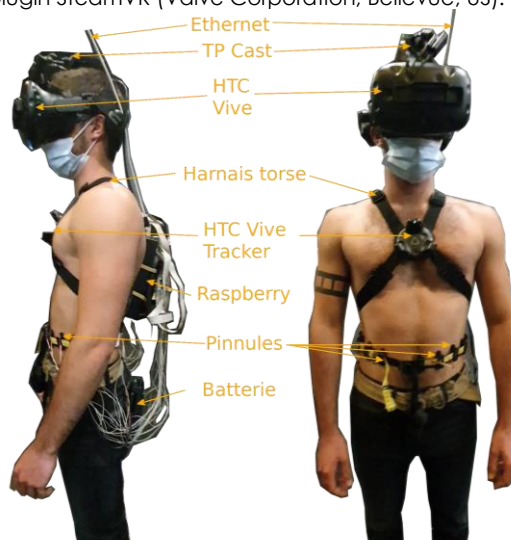


Figure 2 : Les participants pouvaient soit visualiser la cible dans un visiocasque (HTC® Vive™) équipé d'un adaptateur sans fil (TP Cast) soit sentir la cible grâce à une ceinture contenant 16 pinnules vibrotactiles, réparties de manière adaptée à leur morphologie.

Lorsque l'interception était régulée visuellement, l'ordinateur hôte affichait une cible et un sol virtuel dans un visiocasque (HTC® Vive™, New Taipei City, Taïwan) porté par le participant (communication via un adaptateur sans fil TP Cast). La scène visuelle était asservie aux positions et rotations du visiocasque en référence aux deux stations de base. Les participants pouvaient ainsi percevoir visuellement l'excentricité angulaire de la cible et l'évolution de leur position relative par rapport à la cible via l'expansion optique de la cible.

Lorsque l'interception était régulée de manière vibrotactile, les participants portaient un masque sous le visiocasque de sorte à ce qu'aucune information visuelle ne soit disponible. L'ordinateur hôte commandait un Raspberry Pi B+ (Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit SoC 1.4GHz 1GB LPDDR2 SDRAM, Caldecote, Cambridgeshire, Royaume-Uni) via un câble Ethernet qui activait en temps-réel 16 pinnules vibrotactiles (micromoteurs Precision Microdrives™, London, UK) disposées en ligne sur une ceinture autour de l'abdomen des participants en fonction de l'excentricité angulaire de la cible mobile. La stimulation vibrotactile était asservie aux positions et rotations de l'abdomen du participant mesurées par le Vive Tracker en référence aux deux stations de base. La batterie alimentant les pinnules et le Raspberry étaient portés sur le harnais torse. Les pinnules étaient placées de manière à partitionner l'horizon en 16 secteurs de 22.5° chacun. Afin que les vibrations correspondent à des directions externes précises, la position des pinnules était ajustée individuellement en fonction de l'excentricité de l'abdomen de chaque participant. Les pinnules n'étaient donc pas distribuées uniformément autour de la taille : après avoir mesuré la profondeur p et la largeur l de l'abdomen avec un anthropomètre, la position des pinnules le long du périmètre de l'abdomen était calculée selon l'équation paramétrique d'une ellipse de grand axe l et de petit axe p . Les participants pouvaient ainsi percevoir l'excentricité angulaire de la cible via l'endroit autour de leur abdomen où ils ressentaient les vibrations.

En plus de cette information de direction, l'évolution de la distance des participants par rapport à la cible était indiquée via le nombre de pinnules qui vibraient : plus la cible était proche, plus le nombre de pinnules activées était important.

Protocole

Avant le début de l'expérimentation, les participants étaient équipés du visiocasque et de la ceinture tactile. Le visiocasque était ajusté à la morphologie de la tête des participants et la position des pinnules sur la ceinture était ajustée selon l'excentricité de leur abdomen (voir ci-dessus).

Les participants se familiarisaient avec les dispositifs en 8 essais pendant lesquels une cible tournait autour d'eux dans le sens antihoraire avec un rayon de 1,75 m, et en faisant une révolution en 5 secondes. Durant ces essais de familiarisation, les informations visuelles et tactiles étaient disponibles : les participants pouvaient à la fois voir la cible et sentir les vibrations correspondant à la position de la cible par rapport à eux. Lors du 1^{er} essai, les participants étaient invités à ne pas bouger de sorte que seule la cible soit mobile. Au 2^{ème} essai, ils étaient invités à tourner sur eux-mêmes pour s'orienter vers la cible tout au long de son déplacement. Dans les essais suivants, ils devaient se

déplacer pour intercepter la cible, c'est-à-dire se retrouver en même temps qu'elle en un point donné de l'espace. Les participants réussissaient à intercepter la cible dans au moins deux essais lors de cette familiarisation.

Lors de l'expérimentation, la zone de locomotion était longue de 9 mètres et large de 4 mètres (Figure 3). Les trajectoires des cibles (cad. des sphères de $\varnothing = 0.26$ m) étaient parallèles au sol et à hauteur des yeux. Les cibles se déplaçaient à une vitesse de 1m/s, ce qui laissait une durée de 5 secondes aux participants pour les intercepter. Les participants pouvaient se déplacer librement dans cet espace, encadrés par les deux expérimentateurs pour leur sécurité. Leur tâche pour chaque essai consistait à marcher pour intercepter la cible mobile qu'ils voyaient dans l'environnement virtuel ou ressentaient tactilement via les vibrations. Les participants devaient s'arrêter lorsqu'ils pensaient avoir intercepté la cible. Une fois l'essai terminé, les participants étaient raccompagnés au même point de départ et pouvaient commencer un nouvel essai. Le succès de l'interception, correspondant à une position finale du torse à moins de 0.25 m du centre de la cible, était signifié pour chaque essai par un écran vert en réalité virtuelle et par une vibration continue de toutes les pinnules de la ceinture avec le dispositif vibrotactile.

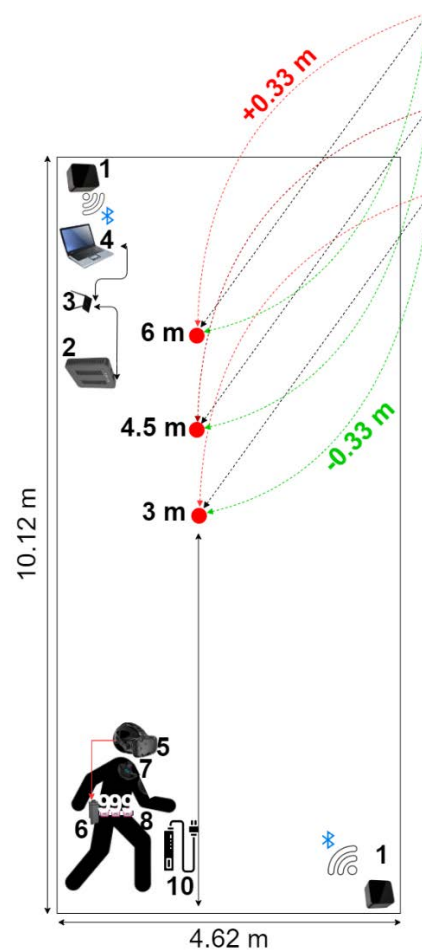


Figure 3 : Vue schématique de la configuration de la salle expérimentale et des trajectoires des cibles mobiles. (1) HTC Light House Base Station ; (2) Router TP Cast ; (3) Modem TP Cast ; (4) Ordinateur hôte ; (5) Visiocasque de RV HTC Vive ; (6) Batterie TPO Cast ; (7) HTC Vive Tracker ; (8) Ceinture ; (9) Pinnules

vibrotactiles ; (10) Boîtier de commande du dispositif vibrotactile (batterie, Raspberry, carte de puissance).

Variables indépendantes

Nous avons manipulé la distance à parcourir pour intercepter la cible (DISTANCE) comme variable inter-essais avec 3 modalités (3, 4,5 et 6 m) en variant les positions de départ de la cible par rapport à l'axe initial de déplacement. Ceci forçait les participants à varier leur vitesse de déplacement et les empêchait de localiser le lieu d'arrivée des cibles entre les essais. Nous avons également manipulé la courbure de la trajectoire des cibles (CURV) comme variable inter-essais avec 3 modalités (-0.33, 0 et +0.33 m) correspondant respectivement à des trajectoires de courbure négative, des trajectoires rectilignes et des trajectoires de courbure positive. De telles trajectoires permettent de mettre en évidence la signature comportementale du CBA (Morice et al., 2010).

Au total, 30 répétitions des 3 distances et des 3 courbures (Figure 3) ont été réalisées par les participants par blocs de 9 essais. L'ensemble de l'expérimentation représentait 270 essais (+8 essais de familiarisation), durait environ 2 heures, réparties sur 2 jours.

Variables dépendantes

- L'amélioration des performances des participants avec l'apprentissage a été caractérisée par l'évolution au cours des essais de la distance euclidienne entre le centre de la tête et le centre de la cible à la fin de chaque essai ;
- L'évolution de la mise en place du couplage CBA pour réguler les actions d'interception avec l'apprentissage a été caractérisée en étudiant les changements au cours des essais des ajustements de régressions exponentielles de la forme $F = \hat{\theta}_{ini} + (\hat{\theta}_{conv} - \hat{\theta}_{ini}) \times \exp^{-(time-1)/\tau}$ sur le taux de changement de l'angle de relèvement ($\hat{\theta}$) au cours de chaque essai. Les procédures d'ajustement renvoyaient trois paramètres estimés : la valeur initiale du taux de changement de l'angle de relèvement $\hat{\theta}_{ini}$, la valeur vers laquelle convergeait le taux de changement de l'angle de relèvement $\hat{\theta}_{conv}$ au cours d'un essai, et la constante de temps τ à laquelle les participants atteignaient $\hat{\theta}_{conv}$. Des valeurs de $\hat{\theta}_{conv}$ proches de 0 deg./s indiquaient la mise en place d'un parfait couplage CBA, car l'angle de relèvement était maintenu constant lors de l'essai (cad. taux de changement de l'angle de relèvement $\hat{\theta}$ nul). A l'inverse, la non-convergence des procédures d'ajustement indiquait l'absence d'un couplage CBA pour réguler l'action d'interception ;
- L'utilisabilité perçue du système par les participants a été mesurée avec la version française du System Usability Scale, SUS (Gronier et Baudet, 2021). Le questionnaire était complété à la fin de chaque jour d'expérimentation.

RESULTATS

Performance

L'évolution des moyennes interindividuelles des erreurs euclidiennes au cours des essais (Figure 4) montre des erreurs à la cible inférieures à 0.25 m en « Vision » pour

toutes les trajectoires dès le premier essai. Les participants en « Vision » interceptaient donc avec succès toutes les cibles mobiles. En « VibroTactile », les erreurs varient de 0.5 à 2 m en fonction des trajectoires sur les premiers essais, puis tendent à diminuer avec les répétitions pour s'approcher à moins d'1 m de la cible après 30 essais.

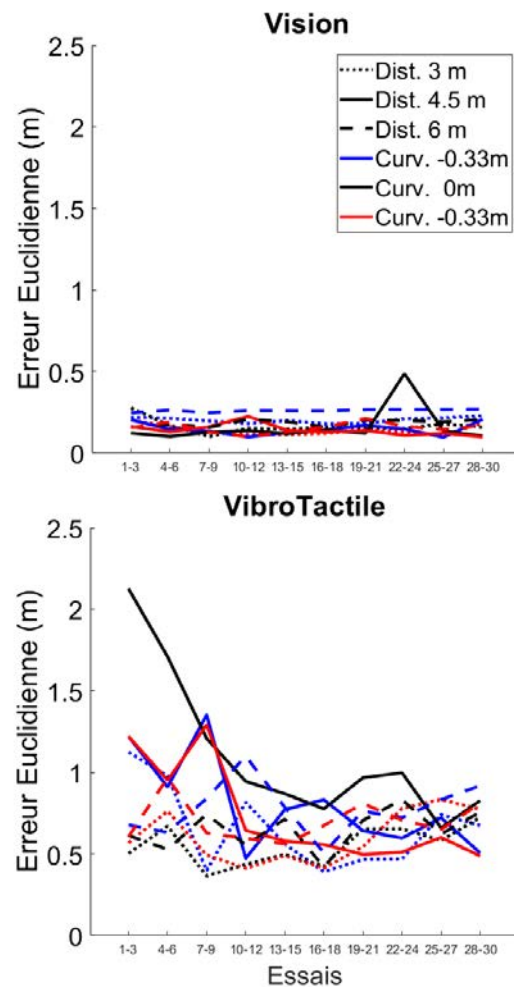


Figure 4 : Evolution des moyennes interindividuelles des erreurs euclidiennes entre les participants et la cible à la fin de chaque essai (en m) pour l'ensemble des trajectoires proposées.

Couplage CBA

L'évolution de la valeur de convergence du taux de changement de l'angle de relèvement ($\hat{\theta}_{conv}$, Figure 5) montre en « Vision » des valeurs initiales de $\hat{\theta}_{conv}$ inférieures à 50 deg./s convergeant lentement vers 0 deg./s au cours des essais. De plus, en « Vision », l'histogramme de répartition superposé à la Figure montre peu d'essais régulés sans couplage CBA. En « VibroTactile », les valeurs de $\hat{\theta}_{conv}$ sur les premiers essais sont proches de 100 deg./s mais diminuent régulièrement avec les répétitions, sans pour autant atteindre les faibles valeurs observées en « Vision » à la fin des essais. La fréquence des actions d'interception qui ne sont pas régulées avec le couplage CBA tend à se réduire avec l'apprentissage.

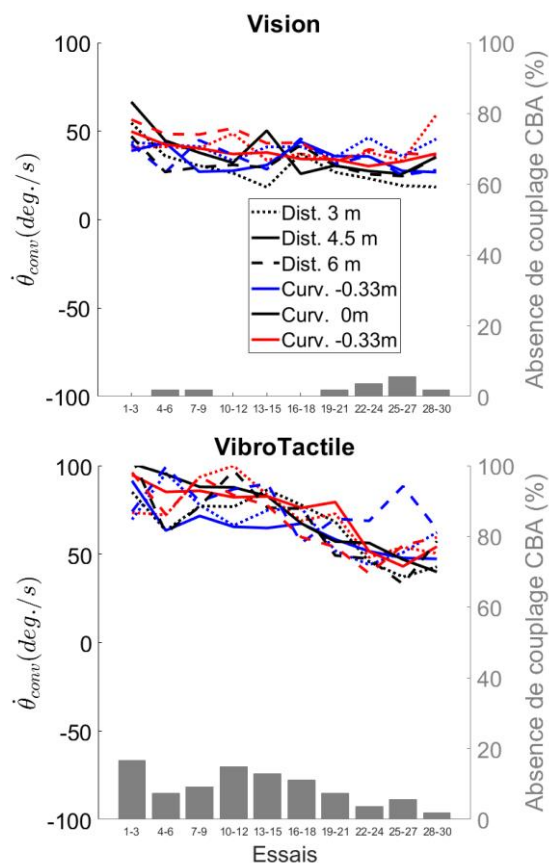


Figure 5 : Evolution des moyennes interindividuelles des valeurs de convergence du taux de changement de l'angle de relèvement (en deg./s) pour l'ensemble des trajectoires proposées. L'histogramme montre la fréquence (en %) des essais qui ne sont pas régulés avec le couplage CBA.

Utilisabilité

Le premier jour d'expérimentation, les participants ayant réalisé la condition « VibroTactile » jugent l'utilisabilité du dispositif mauvaise ou acceptable, avec un degré d'acceptabilité nul ou faible. Le deuxième jour d'expérimentation, le score SUS donné par les participants en condition « VibroTactile » augmente et l'acceptabilité probable est alors élevée. De bons ou excellents niveaux d'utilisabilité du dispositif sont alors obtenus, proches de ceux rapportés par les participants ayant réalisé la condition « Vision » (Figure 6).

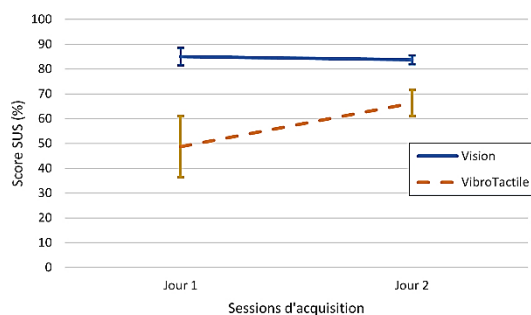


Figure 6 : Evolution du score du SUS au cours des deux jours de pratique pour la condition Vision et la condition Vibrotactile.

DISCUSSION

Cette étude de faisabilité visait à évaluer si notre dispositif de suppléance sensorielle tactile permettait de réaliser des actions locomotrices d'interception d'une cible non visible, et s'il permettait le maintien du couplage CBA lors de ces actions d'interception. Le peu de participants à cette étude sera compensé à l'avenir par une taille d'échantillon plus conséquente. Cependant, les premiers résultats obtenus sur l'efficacité et l'utilisabilité perçue de notre dispositif vibrotactile sont prometteurs et fournissent des pistes particulièrement intéressantes à explorer.

Les performances sont bien meilleures avec les informations visuelles qu'avec les informations vibrotactile, même après apprentissage. Toutefois, une nette amélioration des performances est observable au cours des essais en condition vibrotactile, montrant que les participants parviennent progressivement à exploiter l'information tactile pour réguler leurs déplacements. Ceci confirme que contrairement à des tâches simples d'orientation du corps ou de navigation par point de cheminement pour lesquelles l'information vibrotactile est exploitable immédiatement (Faugloire & Lejeune, 2014 ; van Erp et al., 2005), les tâches impliquant un couplage perception-action fin, avec une haute précision spatio-temporelle, requièrent un temps de pratique significatif avec le dispositif (Mandil, 2017). Les régulations visuomotrices étant développées et utilisées au quotidien depuis l'enfance, ce besoin de pratique avec une nouvelle modalité sensorielle n'est pas étonnant. Il serait intéressant dans de futures expérimentations d'étudier l'évolution de la performance, du couplage CBA et de l'utilisabilité perçue sur des sessions d'apprentissage plus longues afin de caractériser le temps nécessaire pour que le dispositif vibrotactile permette d'égaliser les résultats obtenus en condition de vision.

La rapide diminution des valeurs de convergence du taux de changement de l'angle de relèvement ($\dot{\theta}_{conv}$) avec l'apprentissage, tout comme la disparition progressive des interceptions réalisées en l'absence de couplage CBA dans la condition « VibroTactile », tendent à montrer que notre dispositif de suppléance visuelle par le tactile permettrait de préserver le couplage perceptivo-moteur naturellement observé lorsque la vision est disponible. Toutefois, les valeurs importantes de $\dot{\theta}_{conv}$ observées au début de la pratique en condition « VibroTactile » par rapport à la condition « Vision » révèlent des difficultés à annuler les changements de l'angle de relèvement. Pour améliorer la détection de θ , nous doublerons à l'avenir le nombre de pinnules vibrotactiles, ce qui augmentera la résolution dans la perception « Vibrotactile » de la cible, tout en respectant le seuil de discrimination entre deux vibrations.

Pour finir, nous avons pu observer que les scores SUS étaient élevés mais pas maximaux en condition « Vision ». Ces scores pourraient à l'avenir être améliorés en utilisant un dispositif visuel de réalité mixte permettant de superposer dans l'environnement réel la cible virtuelle à intercepter. Ceci permettra de comparer l'utilisabilité et l'acceptabilité de notre dispositif de suppléance sensorielle tactile à des conditions quasi écologiques.

CONCLUSION ET MISE EN PERSPECTIVE

Cette étude de faisabilité démontre que notre dispositif peut permettre à l'utilisateur d'extraire du flux vibrotactile le taux de changement de l'angle de relèvement de cibles mobiles pour s'y coupler lors des interceptions, comme en présence de vision. Ceci tendrait à montrer l'amodalité de cette information perceptive et, dans la lignée de nombreux travaux sur le CBA en modalité visuelle, soutient la pertinence de cette information pour la régulation des déplacements dans des tâches d'interception. Une option alternative intéressante à étudier serait d'aller au-delà du principe de conversion visuo-tactile en fournissant à l'utilisateur des informations fonctionnelles qui ne sont pas directement accessible par les sens en situation non-médiée, comme une information indiquant directement la nature des déplacements locomoteurs à effectuer pour annuler le taux de changement de l'angle de relèvement (ex. direction, vitesse).

BIBLIOGRAPHIE

- Bach-Y-Rita, P., Collins, C. C., Saunders, F. A., White, B., & Scadden, L. (1969). Vision Substitution by Tactile Image Projection. *Nature*, 221(5184), 963–964. <https://doi.org/10.1038/221963a0>
- Bastin, J., Calvin, S., & Montagne, G. (2006). Muscular proprioception contributes to the control of interceptive actions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32(4), 964–972. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.32.4.964>
- Bastin, J., Craig, C., & Montagne, G. (2006). Prospective strategies underlie the control of interceptive actions. *Human Movement Science*, 25(6), 718–732. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2006.04.001>
- Chapman, S. (1968). Catching a Baseball. *American Journal of Physics*, 36(10), 868–870. <https://doi.org/10.1119/1.1974297>
- Chardenon, A., Montagne, G., Laurent, M., & Bootsma, R. J. (2004). The perceptual control of goal-directed locomotion: A common control architecture for interception and navigation? *Experimental Brain Research*, 158(1), 100–108. <https://doi.org/10.1007/s00221-004-1880-7>
- Chardenon, A., Montagne, G., Laurent, M., & Bootsma, R. J. (2005). A robust solution for dealing with environmental changes in intercepting moving balls. *Journal of Motor Behavior*, 37(1), 52–64. <https://doi.org/10.3200/JMBR.37.1.52-62>
- Fajen, B. R., & Warren, W. H. (2004). Visual Guidance of Intercepting a Moving Target on Foot. *Perception*, 33(6), 689–715. <https://doi.org/10.1068/p5236>
- Fajen, B. R., & Warren, W. H. (2007). Behavioral dynamics of intercepting a moving target. *Experimental Brain Research*, 180(2), 303–319. <https://doi.org/10.1007/s00221-007-0859-6>
- Faugloire, E., & Lejeune, L. (2014). Evaluation of heading performance with vibrotactile guidance: The benefits of information–movement coupling compared with spatial language. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 20(4), 397–410. <https://doi.org/10.1037/xap0000032>
- Gronier, G., & Baudet, A. (2021). Psychometric Evaluation of the F-SUS: Creation and Validation of the French Version of the System Usability Scale. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 1–12. <https://doi.org/10.1080/10447318.2021.1898828>
- Lenoir, M., Musch, E., Thiery, E., & Savelsbergh, G. J. P. (2002). Rate of change of angular bearing as the relevant property in a horizontal interception task during locomotion. *Journal of Motor Behavior*, 34(4), 385–404. <https://doi.org/10.1080/00222890209601955>
- Mandil, C. (2017). Informations vibrotactiles pour l'aide à la navigation et la gestion des contacts avec l'environnement [PhD Thesis]. <http://www.theses.fr/2017NORMC238/document>
- Morice, A. H., François, M., Jacobs, D. M., & Montagne, G. (2010). Environmental constraints modify the way an interceptive action is controlled. *Experimental Brain Research*, 202(2), 397–411. <https://doi.org/10.1007/s00221-009-2147-0>
- van Erp, J. B. F., Veen, H. A. H. C. V., Jansen, C., & Dobbins, T. (2005). Waypoint navigation with a vibrotactile waist belt. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2(2), 106–117. <https://doi.org/10.1145/1060581.1060585>