



Titre: Interactions sous vibration : effets du dispositif d'entrée de données
Title: sur la saisie de valeurs numériques dans le cockpit

Auteur: Charles-Antoine Lanoix
Author:

Date: 2023

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Lanoix, C.-A. (2023). Interactions sous vibration : effets du dispositif d'entrée de données sur la saisie de valeurs numériques dans le cockpit [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/53410/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/53410/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Philippe Doyon-Poulin
Advisors:

Programme: Maitrise recherche en génie industriel
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Interactions sous vibration : effets du dispositif d'entrée de données sur la
saisie de valeurs numériques dans le cockpit**

CHARLES-ANTOINE LANOIX

Département de mathématiques et de génie industriel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie industriel

Avril 2023

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé:

Interactions sous vibration : effets du dispositif d'entrée de données sur la saisie de valeurs numériques dans le cockpit

présenté par **Charles-Antoine LANOIX**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Firdaous SEKKAY, présidente

Philippe DOYON-POULIN, membre et directeur de recherche

Michel C. DESMARAIS, membre

REMERCIEMENTS

Merci à

Philippe Doyon-Poulin, mon directeur et ami, pour son support, sa disponibilité et tous les efforts investis dans ma recherche

Srishti Rawal, ma stagiaire durant l'expérimentation, pour son analyse des données de suivi du regard et sa modération des sessions de tests

Marc Charbonneau, technicien au LESIAQ, pour le support technique, le bidouillage et la compagnie durant tout le printemps 2022

Alexandre Ferreira Benevides, directeur du LESIAQ, pour le transfert de connaissance en électronique, la conception du système de rails pour fixer les boutons à l'écran tactile et la conception 3D

Adam Schachner, ingénieur chez CMC Électronique, pour la conception et la réalisation du siège de vibration de même que les conseils méthodologiques pour l'expérience

Namie Bae, ingénieure chez CMC Électronique, pour les conseils lors de la conception de l'interface de test

Maxence Hébert-Lavoie, pour l'aide avec l'analyse des résultats

Toute l'équipe du lab, Karine, Lori-Anne, Simon, Hadrien, Stuti, Kairat, pour la participation aux pré-tests et à la collecte de données

Mon amoureuse Laurence, mes parents, ma sœur Joy, pour leur amour

RÉSUMÉ

Depuis une vingtaine d'années, les écrans tactiles ont progressivement remplacé les contrôles mécaniques traditionnels : pensons aux téléphones cellulaires, aux systèmes de divertissement dans les voitures, même aux réfrigérateurs. L'industrie de l'aviation n'échappe pas à cette tendance, alors que les constructeurs cherchent à remplacer les boutons physiques utilisés traditionnellement par des écrans tactiles dans le but de réduire le poids des avions et d'économiser de l'espace dans le cockpit.

Comme dans toute conception d'une interface humain-machine, l'analyse du contexte d'utilisation est primordiale. En aviation, une des contraintes principales de l'environnement est la présence de vibration sous forme de turbulences, ce qui peut affecter la performance des pilotes lors de leurs interactions avec le système. Pour que la transition vers les écrans tactiles se fasse sans heurts, il est donc nécessaire d'effectuer une comparaison approfondie entre les dispositifs mécaniques et l'écran tactile dans un environnement vibrant pour en garantir la sécurité ainsi que la performance.

Il existe plusieurs études comparatives qui explorent le sujet. Cependant, ces expériences sont pour la plupart abstraites, hors du contexte spécifique de l'avion. Les résultats qui y sont recensés forment une base de connaissances, mais ne représentent pas parfaitement les tâches que les pilotes devront effectuer.

Dans cette étude, nous avons comparé la performance de sept dispositifs d'interaction : trois dispositifs mécaniques (joystick, bouton rotatif fixé à l'écran, bouton rotatif sur un piédestal) et quatre dispositifs sur un écran tactile (clavier numérique sur l'écran de vol, clavier numérique sur un panneau latéral, manipulations directes de l'écran de vol, bouton glisseur).

20 participants ont réalisé des tâches d'entrée de données numériques pour un système d'autopilote, p. ex. changement de vitesse ou d'altitude, avec trois amplitudes de changements : petite, moyenne ou grande. En parallèle, les participants ont réalisé une tâche de suivi de cible en manipulant un joystick. Tout au long de l'expérience, les participants étaient assis sur un siège reproduisant la vibration vécue dans un hélicoptère à vitesse de croisière. Plusieurs variables ont été mesurées durant l'expérience, notamment le temps de complétion des tâches, le nombre d'erreurs, la performance de la tâche de suivi ainsi que le suivi du regard des participants. De plus, ces derniers

ont rempli des questionnaires permettant d'évaluer la charge mentale, l'inconfort et l'utilisabilité de chaque dispositif.

Nos résultats montrent que le dispositif le plus rapide pour la saisie de données dépend de l'ampleur du changement: si l'écart entre la valeur cible de la tâche et la valeur initiale est petit (10 incréments ou moins), les boutons rotatifs ont permis une entrée de données environ 23% plus rapide que les claviers numériques au second rang ($p < .05$). Au-delà de ce seuil, le temps de complétion des boutons rotatifs augmente jusqu'à devenir environ 50% plus lent que celui des claviers numériques ($p < .01$). En général, les mécanismes de confirmation qui ont été mis en place pour chaque dispositif ont mené à des taux d'erreurs bas (moins de 0,2 erreurs par tâche) et nous n'avons pas observé de différences significatives entre les dispositifs. Les difficultés que les participants ont rencontrées avec le dispositif de manipulation directe à l'écran tactile ont mené à la charge mentale la plus élevée (score NASA-TLX moyen de 50,72), alors que le bouton rotatif fixé à l'écran a créé l'inconfort le plus intense parmi tous les dispositifs (score Borg CR-10 de 1,27). Il a aussi été possible d'établir une corrélation ($p < .001$) entre la vitesse de complétion des tâches et l'utilisabilité: les dispositifs les plus rapides, comme les claviers numériques, ont obtenu les meilleurs scores d'utilisabilité de la part des participants.

Somme toute, nous avons pu nuancer les conclusions des études précédentes qui soulignaient que les claviers numériques étaient invariablement plus rapides que les boutons rotatifs pour l'entrée de données. Nous avons également montré que les bonnes pratiques de conception, comme l'utilisation d'un mécanisme de confirmation, permettent de mitiger le manque de précision inhérent aux écran tactiles largement document dans la littérature et de produire une interface rapide, utilisable et sécuritaire.

ABSTRACT

Over the past two decades, touch screens have gradually replaced traditional mechanical controls: think of cell phones, car entertainment systems, even refrigerators. The aviation industry is no exception to this trend, as manufacturers seek to replace traditionally used physical buttons with touchscreens in an effort to reduce aircraft weight and save cockpit space.

As with any human-machine interface design, analysis of the context of use is paramount. In aviation, one of the main constraints of the environment is the presence of vibration in the form of turbulence, which can affect the performance of pilots during their interactions with the system. Therefore, to ensure a smooth transition to touchscreens, a thorough comparison between mechanical devices and touchscreen in a vibrating environment is necessary to ensure safety as well as performance.

There are several comparative studies that explore this topic. However, these experiments are mostly abstract, outside the specific context of the aircraft. The results that are reported form a knowledge base, but do not perfectly represent the tasks that pilots will have to perform.

In this study, we compared the performance of seven interaction devices: three mechanical devices (joystick, rotary knob attached to the screen, rotary knob on a pedestal) and four touchscreen devices (keypad on the primary flight display, keypad on a side panel, direct manipulations of the primary flight display, slider).

20 participants performed digital data entry tasks for an autopilot system, e.g., speed or altitude change, with three magnitudes of change: small, medium, or large. In parallel, participants performed a target tracking task by manipulating a joystick. Throughout the experiment, participants were seated in a seat reproducing the vibration experienced in a helicopter at cruising speed. Several variables were measured during the experiment, including task completion time, number of errors, tracking task performance, and eye tracking. In addition, participants completed questionnaires to assess the mental load, discomfort and usability of each device.

Our results show that the fastest device for data entry depended on the magnitude of the change: if the difference between the task target value and the initial value was small (10 increments or less), rotary knobs provided approximately 23% faster data entry than numeric keypads in the second rank ($p < .05$). Above this threshold, the completion time of rotary buttons increased until it became

about 50% slower than that of numeric keypads ($p < .01$). In general, the confirmation mechanisms that were implemented for each device led to low error rates (less than 0.2 errors per task) and we did not observe significant differences between devices. The difficulties participants experienced with the direct touchscreen manipulation device led to the highest mental load (mean NASA-TLX score of 50.72), while the rotary knob attached to the screen created the most intense discomfort among all devices (Borg CR-10 score of 1.27). It was also possible to establish a correlation ($p < .001$) between task completion speed and usability: the fastest devices, such as numeric keyboards, received the highest usability scores from participants.

All in all, we were able to qualify the findings of previous studies that emphasized that numeric keyboards were consistently faster than rotary knobs for data entry. We have also shown that good design practices, such as the use of a confirmation mechanism, can mitigate the lack of precision inherent in touch screens widely documented in the literature and produce a fast, usable, and safe interface.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES.....	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XV
LISTE DES ANNEXES.....	XVII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Organisation du mémoire	2
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
2.1 Les écrans tactiles comme dispositifs d’interaction.....	3
2.2 Cockpit d’avion : écran tactile ou dispositif mécanique?	6
2.2.1 Sélection de cibles.....	6
2.2.2 Glissement.....	13
2.3 Interaction sous vibration pour d’autres types de véhicules	15
2.3.1 Véhicules militaires.....	15
2.3.2 Véhicules civils	18
2.4 Recommandations de conception pour le poste de pilotage	19
2.5 Synthèse	22
2.6 Objectifs de recherche.....	25
CHAPITRE 3 CONSIDÉRATIONS MÉTHODOLOGIQUES ET TECHNIQUES	26
3.1 Structure de l’expérience.....	26

3.2	Conception de l'interface de tests	28
3.3	Programmation de l'environnement de test	31
3.4	Choix des dispositifs à tester	32
3.4.1	Hypothèses	33
3.5	Conception des dispositifs mécaniques	35
3.5.1	Boutons rotatifs	35
3.5.2	Joystick	38
3.6	Conception des dispositifs tactiles	39
3.6.1	Bouton-glissoir	39
3.6.2	Manipulations directes	40
3.6.3	Claviers numériques	41
CHAPITRE 4 ARTICLE 1: MECHANICAL DEVICE OR TOUCHSCREEN WIDGET: THE EFFECTS OF INPUT DEVICE AND TASK SIZE ON DATA ENTRY ON THE PRIMARY FLIGHT DISPLAY		44
4.1	Introduction	45
4.1.1	Touchscreens under vibration	46
4.1.2	Evaluation of realistic aviation tasks	47
4.1.3	Aim and hypotheses	48
4.2	Method	48
4.2.1	Participants	48
4.2.2	Tasks	49
4.2.3	Materials	50
4.2.4	Design	56
4.2.5	Procedure	57
4.2.6	Data analysis	57

4.3	Results	58
4.3.1	Completion time	58
4.3.2	Error rate	60
4.3.3	Overshoots.....	61
4.3.4	Tracking task.....	62
4.3.5	Eye tracking.....	63
4.3.6	Workload.....	64
4.3.7	Discomfort.....	65
4.3.8	Usability	66
4.3.9	Perceived task completion speed.....	67
4.3.10	Appreciation ranking.....	68
4.4	Discussion	69
4.4.1	Field selection time	69
4.4.2	Date entry time	70
4.4.3	Errors and overshoots.....	71
4.4.4	Tracking task.....	72
4.4.5	Workload and discomfort.....	73
4.4.6	Usability, perceived speed and appreciation	74
4.4.7	Limitations	75
4.4.8	Future research	76
4.5	Conclusion.....	76
CHAPITRE 5	DISCUSSION GÉNÉRALE	78
5.1	Retour sur les objectifs de recherche.....	78
5.1.1	Évaluation d'une tâche réaliste	78

5.1.2	Confirmation de la disparité entre gestes de glissement et tapement.....	78
5.1.3	Impact de la position sur l'écran des mécanismes d'interaction tactiles.....	79
5.1.4	Enregistrement des données de mouvement oculaire	79
5.1.5	Catégorisation des tâches d'entrée de données par taille	79
5.1.6	Intégration des commentaires subjectifs à l'analyse	80
5.2	Vérification des hypothèses	80
5.3	Comparaisons avec la littérature	82
5.3.1	Temps de complétion	82
5.3.2	Taux d'erreur.....	82
5.3.3	Charge mentale.....	82
5.3.4	Confort	83
5.3.5	Utilisabilité.....	83
5.4	Résultats non concluants	83
5.5	Limites de la recherche	84
CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		86
RÉFÉRENCES.....		88
ANNEXES		93

LISTE DES TABLEAUX

Table 4-1: Range of values for every task size and field.	50
Table A-1 Synthèse de la littérature	93

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1: Test ISO 9241-411. Les cibles de taille W sont disposées à une distance A l'une de l'autre. L'ordre de sélection des cibles est indiqué par les flèches en pointillés.....	7
Figure 2-2: Exemple de clavier numérique	11
Figure 3-1: Exemple d'un PFD. (1) IAS; (2) ALT; (3) VS; (4) Baro; (5) HDG.	27
Figure 3-2: Interface graphique expérimentale.	29
Figure 3-3: À gauche, la première version visuelle de la tâche de suivi. À droite, la version finale.	30
Figure 3-4: Les trois états des champs du PFD et leur représentation visuelle. (a) Inactif; (b) En surbrillance; (c) En édition.	30
Figure 3-5: Transposition du formulaire NASA-TLX sur Unity	32
Figure 3-6: Dispositifs mécaniques utilisés dans l'expérience. (a) Joystick; (b) Bouton rotatif fixé à l'écran; (c) Bouton rotatif sur un piédestal.	35
Figure 3-7: Système de rails (noirs, sur le contour de l'écran) permettant de fixer des boutons physiques à l'écran.....	36
Figure 3-8: Pièce imprimée en 3D pour fixer un bouton rotatif à l'écran tactile	37
Figure 3-9: Pièce imprimée en 3D pour fixer un bouton rotatif à un piédestal.....	37
Figure 3-10: Joystick Logitech Attack 3.	38
Figure 3-11: Interface graphique du dispositif tactile basé sur le bouton-glissoir.	39
Figure 3-12: Interface graphique du dispositif tactile basé sur les manipulations directes.....	40
Figure 3-13: Interfaces graphiques des dispositifs tactiles basés sur les claviers numériques.	41
Figure 3-14: Disposition des touches du clavier	42
Figure 4-1: Sequence of data entry task completion.	49
Figure 4-2: Vibrating seat structure.	51
Figure 4-3: Diagram of eye reference point (ERP).	51

Figure 4-4: Visual displays of devices used for number entry.....	53
Figure 4-5: Field selection time across devices. Error bars represent ± 1 SEM.	59
Figure 4-6: Completion time of data entry across devices and size of task. Error bars represent ± 1 SEM.....	60
Figure 4-7: Number of value confirmation errors per task across devices. Error bars represent ± 1 SEM.....	61
Figure 4-8: Number of overshoots per task across devices. Error bars represent ± 1 SEM.	62
Figure 4-9: Tracking task accuracy during field selection across devices. Error bars represent ± 1 SEM.....	62
Figure 4-10: Tracking task accuracy during data entry across devices. Error bars represent ± 1 SEM.	63
Figure 4-11: Percentage of task time fixating tracking task across devices. Error bars represent ± 1 SEM.....	64
Figure 4-12: NASA-TLX workload score across devices. Error bars represent ± 1 SEM.	65
Figure 4-13: Overall discomfort score across devices. Error bars represent ± 1 SEM.	65
Figure 4-14: Discomfort score across devices and body part (shoulder and arm only), on a scale of 1 to 10 (1: No discomfort; 10: Extremely strong discomfort). Error bars represent ± 1 SEM.	66
Figure 4-15: Ease of use score of devices on a Likert scale of 1 to 5 (1: Very easy, 5: Very difficult) for small and large value changes. Error bars represent ± 1 SEM.	67
Figure 4-16: Perceived task completion speed by devices on a Likert scale of 1 to 5 (1: Very fast, 5: Very slow). Error bars represent ± 1 SEM.	68
Figure 4-17: Ranking of devices on a scale of 1 to 7 (1: Most appreciated, 7: Least appreciated). Error bars represent ± 1 SEM.....	69

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ALT	Altitude
ANOVA	<i>Analysis of variance</i> – Analyse de la variance
Baro	<i>Barometric pressure</i> – Pression barométrique
cm	Centimètre
ERP	<i>Eye reference point</i> – Point de référence oculaire
F	Test F
FD	<i>Flight director</i> – Directeur de vol
ft	Pied
HDG	<i>Heading</i> – Cap
HID	<i>Human interface device</i> – Appareils d’interface humaine
Hz	Hertz
IAS	<i>Indicated airspeed</i> – Vitesse indiquée
in	Pouce
kt	Nœuds
LAD	<i>Large area display</i> – Affichage grande surface
m	Mètre
M	Moyenne
MIP	<i>Main instrument panel</i> – Tableau de bord principal
mm	Millimètre
n	Nombre
p	p-valeur
PFD	<i>Primary flight display</i> – Écran primaire de vol
PMM	<i>Predictive mean matching</i> – Appariement d’après la moyenne prévisionnelle
r	Corrélation, test statistique
RMS	<i>Root mean square</i> – Moyenne quadratique
s	Seconde
SD	<i>Standard deviation</i> – Écart type
t	Test de Student
UI	<i>User interface</i> – Interface utilisateur

VS	<i>Vertical speed</i> – Vitesse verticale
X^2	Chi carré, test statistique

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A	Tableau synthèse	93
ANNEXE B	Approbation éthique – CER-2122-55-D	94
ANNEXE C	Questionnaire NASA-TLX	96
ANNEXE D	Questionnaire d'utilisabilité	98
ANNEXE E	Échelle de Borg CR-10.....	99

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

En deux décennies à peine, l'écran tactile a pris une place prédominante dans l'univers technologique. Plusieurs raisons viennent expliquer cette adoption rapide. On peut tout d'abord parler de sa facilité d'utilisation et de son intuitivité : au lieu d'interagir avec le contenu par l'intermédiaire de dispositifs mécaniques, l'écran tactile permet à l'utilisateur de manipuler le contenu directement. L'autre avantage de ces écrans, d'un point de vue manufacturier, est qu'il peut remplacer plusieurs mécanismes d'entrées de données (ex. joystick, boutons mécaniques, etc.) et ainsi économiser de l'espace physique. Les constructeurs avioniques ont décelé le potentiel de cette technologie. Le poste de pilotage d'avion possédant un espace limité pour inclure un grand nombre de fonctionnalités, l'écran tactile est une solution naturelle pour optimiser sa conception. La facilité avec laquelle on peut modifier leur affichage, et donc l'interaction du pilote avec le système, est un autre avantage de ces écrans sur les technologies traditionnelles.

Malgré tous ces bénéfices, l'intégration des écrans tactiles dans le cockpit comporte plusieurs problèmes devant être étudiés. Une des contraintes de l'environnement est la présence de vibrations, qu'elles soient permanentes (comme dans un hélicoptère) ou temporaires (les turbulences dans un avion de ligne, par exemple). Inévitablement, ces vibrations peuvent mener à des erreurs de saisie entraînant des conséquences plus ou moins graves. La position fixe des écrans dans les postes de pilotage oblige également le pilote à étendre son bras pour atteindre l'élément désiré. Cela peut provoquer de la fatigue musculaire si les mouvements sont très fréquents, en plus d'accentuer l'effet des vibrations sur la précision de saisie.

La visée de ce projet provenait d'un questionnaire de l'entreprise avionique CMC Électronique, qui a partiellement financé la réalisation de la recherche, alors qu'elle amorce la transition vers des interfaces tactiles. Afin d'évaluer leur performance relative aux dispositifs mécaniques utilisés actuellement dans les postes de pilotage (boutons rotatifs, joysticks, etc.), nous avons choisi d'effectuer une étude comparative entre ces diverses manières d'entrer des données. Plus précisément, l'expérience avait pour objectif de simuler avec réalisme l'entrée de données numériques d'un système d'autopilote sur un écran de vol.

Pour ce faire, il a premièrement fallu déterminer précisément quels seraient les dispositifs qui allaient être comparés, puis concevoir l'ensemble des interfaces et des interactions de ces derniers. Pour la réalisation de l'expérience, une plateforme de test a été programmée sur le moteur de jeu Unity. Celle-ci avait pour but de présenter les tâches aux participants, de gérer les entrées utilisateur et d'enregistrer les données des séances de test. De plus, nous avons intégré les dispositifs d'interaction sur une plateforme reproduisant la vibration d'un hélicoptère en vol et l'ergonomie physique d'un poste de pilotage. La tenue des tests utilisateurs avec 20 participants et l'analyse des résultats s'est déroulée à l'été 2022, alors que le reste de l'année a été accordé à la rédaction de l'article et du présent mémoire.

1.1 Organisation du mémoire

Ce mémoire par article se divise en 6 chapitres, incluant l'introduction. Tout d'abord, le chapitre 2 présente une revue critique de la littérature mettant en relief les enjeux relatifs à l'inclusion d'écrans tactiles en aviation et dans les véhicules de transport, et se conclut avec la définition des objectifs de recherche du projet. Le chapitre 3 présente le processus de conception et de réalisation de l'installation expérimentale. Le chapitre 4 consiste en une reproduction de l'article ayant été soumis au journal *International Journal of Human-Computer Interaction*. Le chapitre 5 présente une discussion générale comprenant des éléments de la recherche n'ayant pas été traités dans l'article de même qu'une critique du travail accompli. Finalement, le mémoire se termine sur une conclusion et les recommandations associées au chapitre 6.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre présente un tour d'horizon de la littérature en ce qui concerne l'utilisation de dispositifs humain-machine dans le contexte de postes de pilotage d'avions, et plus généralement dans les milieux susceptibles d'être soumis à des vibrations. L'évaluation se concentrera principalement sur les écrans tactiles et les différents types d'interactions pouvant y être réalisées, puis les recommandations de conception avec ce dispositif seront regroupées dans une sous-section unique. Finalement, une synthèse des connaissances du domaine sera effectuée et les objectifs en découlant seront présentés.

2.1 Les écrans tactiles comme dispositifs d'interaction

L'intégration d'interfaces basées sur les écrans tactiles dans un milieu ou le remplacement de dispositifs mécaniques ne doit pas être prise à la légère. Selon Orphanides et Nam [1], pour que la transition soit réussie – c'est-à-dire que le niveau de performance des utilisateurs est acceptable, que l'écran soit confortable à utiliser, qu'il ne présente pas de risque de réaliser des erreurs critiques et qu'il soit généralement simple à utiliser –, on doit considérer trois dimensions particulières.

En premier lieu, le choix de la technologie de l'écran tactile doit être adéquat pour la tâche. Le besoin de l'utilisateur de porter des gants ou de collaborer avec un collègue sur le même écran, comme c'est le cas en aviation, de même que le degré de sensibilité de l'écran sont des facteurs reliés au type d'écran tactile qui influencent la décision de sélectionner une technologie plutôt qu'une autre.

En second lieu, il faut prendre en compte l'environnement d'implémentation pour s'assurer de concevoir une interface qui s'y opère bien. Quand on parle de cockpit, la plus grande contrainte environnementale est la présence de vibrations. Celles-ci peuvent prendre la forme de turbulences (phénomène météorologique) ou de vibrations induites par la rotation des hélices, par exemple dans un hélicoptère (phénomène mécanique). Dépendant du contexte de vol et de l'appareil, ces vibrations n'auront pas la même ampleur et la même durée, mais il s'agit toujours d'une possibilité. De plus, il est anticipé que les changements climatiques mèneront à une augmentation des turbulences dans les prochaines décennies [2], ce qui rend la vibration d'autant plus importante à considérer dans la conception des postes de pilotage. Notons également que la position fixe des

pilotes, la présence de tous les autres contrôles mécaniques, de même que la luminosité sont d'autres facteurs environnementaux devant être pris en compte.

En troisième lieu, les interfaces tactiles doivent être réalisées selon le profil des utilisateurs qui les utiliseront. Cela englobe leur occupation et les modèles mentaux qui y sont associés, une morphologie particulière, des limitations connues, etc. On s'attend par exemple à ce que les pilotes, et tout particulièrement les pilotes de ligne, possèdent une base de connaissances communes, des manières de faire similaires ainsi que des traits de personnalités qui se ressemblent [3]. Si on conçoit pour un avion civil ou militaire, on peut aussi savoir quel sera l'intervalle de taille des pilotes qui seront aux commandes.

Quand bien même l'implémentation des écrans tactiles dans un environnement se fait en tenant compte des trois dimensions citées ci-haut, il ressort de la recherche que ces dispositifs présentent des avantages et des désavantages inhérents.

Du côté des aspects négatifs, on recense tout d'abord que, comparativement à des dispositifs de sélection classiques tels que la souris, la sélection de cibles¹ plus petites que 15 mm augmente le taux d'erreur exponentiellement [4]. De plus, pour une même taille de touche, les boutons physiques sont sélectionnés avec plus de précision que les boutons virtuels [5]. On constate aussi que la vibration affecte particulièrement la performance des tâches réalisées sur écran tactile en raison du mouvement parasite qu'elle produit sur le bras de l'utilisateur [6]. Dans la même veine, l'éloignement de l'écran par rapport au corps peut mener à davantage de fatigue physique puisque le bras doit rester étendu pendant une longue période [7].

D'un point de vue positif, le grand avantage que possède l'écran tactile est son ubiquité dans les technologies destinées aux consommateurs grand public. On les retrouve maintenant partout, sur nos téléphones cellulaires et nos tablettes, bien sûr, mais aussi sur nos imprimantes, dans nos voitures et même sur nos réfrigérateurs [8]. Simplement du fait qu'ils sont énormément utilisés, les utilisateurs sont beaucoup plus familiers avec leur utilisation. On pourrait même dire qu'ils s'attendent à pouvoir utiliser des écrans tactiles : ce désir supplante d'emblée plusieurs

¹ Terme plus général de décrire un espace cliquable sur un écran.

inconvénients du dispositif. Alors que plusieurs des problèmes reliés aux écrans tactiles relèvent de leur faible précision pour de petites cibles, leur plus grande arme est la possibilité d'interagir directement avec le contenu présenté à l'écran. En retirant l'intermédiaire (la souris, le bouton physique, etc.), l'intuitivité et la facilité d'apprentissage des systèmes s'en trouvent grandement améliorées [9]. Plus besoin de savoir maîtriser un outil pour manipuler le contenu de l'interface, on tire avantage des mouvements naturels de notre corps. Et puisque ces mouvements se répercutent sur une échelle 1:1 à l'écran, il en découle une interaction très rapide [8]. Notons toutefois que cet avantage tient surtout pour les tâches de sélection ponctuelles, par exemple une entrée alphanumérique occasionnelle, tandis que les tâches nécessitant un ajustement continu et précis y sont moins bien adaptées [10].

D'autre part, un écran tactile peut aisément remplacer plusieurs affichages et dispositifs d'entrée de données, ce qui est un avantage particulièrement fort dans le domaine de la conception de postes de pilotage étant donné le grand nombre d'indicateurs et de contrôles à fournir au pilote dans un espace restreint. Pour un même espace physique, on peut afficher une foule d'informations qui seraient normalement disponibles à des endroits différents dans le cockpit : par exemple, consulter dans le même espace la carte, les modes d'autopilote, l'état de l'appareil, les communications, etc. Les nouveaux écrans tactiles de grande taille permettent de remplir encore plus efficacement cette tâche en offrant plus d'espace d'affichage, propice à la création d'interfaces moins encombrées et plus personnalisables [11]. Non seulement peuvent-ils simplifier la manière dont l'information est présentée aux pilotes, mais ils ont également le potentiel de remplacer les dispositifs d'entrée de données mécaniques comme les boutons rotatifs et les claviers physiques. En résulterait un poste de pilotage plus léger, ce qui est un point important dans la construction d'aéronef puisque le poids de l'appareil est une contrainte extrêmement importante [12].

Somme toute, on constate que malgré ses avantages, l'introduction des écrans tactiles dans le poste de pilotage comporte son lot de problèmes à régler et de contraintes à évaluer. Pour les manufacturiers aéronautiques, le jeu semble toutefois en valoir la chandelle puisque de grandes compagnies ont déjà conçu ou intégré des écrans de vols tactiles dans leur gamme de produits. Cette tendance s'observe tant dans le domaine de l'aviation de loisir (Garmin G3X [13]), commerciale (Boeing 777X [14]) et militaire (Lockheed Martin F-35 Lightning II [15]). À première vue, il est difficile de déterminer si cet engouement pour une technologie nouvelle pourra réellement se tailler une place durable dans les postes de pilotage. Pour avoir une meilleure idée de

leur utilité et de leur sécurité, nous verrons dans les prochaines sections comment les écrans tactiles se comparent aux dispositifs d'entrée traditionnels.

2.2 Cockpit d'avion : écran tactile ou dispositif mécanique?

La question de la performance relative entre des dispositifs en est une centrale au domaine des interactions humain-ordinateur, et avec raison : l'objectif final est de concevoir des systèmes qui augmentent l'efficacité des utilisateurs et non l'inverse. Depuis l'avènement des ordinateurs grand public avec interface graphique, on s'affaire à comparer les dispositifs de saisie pour deux types de mouvements, soit la sélection simple – ou tapement, dans le cas d'un écran tactile – et le glissement [16]. Encore aujourd'hui, ils font l'objet d'une analyse approfondie, comme le montrera cette section. Il sera question principalement de recherches issues du milieu de l'aviation intégrant un élément de vibration pour simuler la turbulence de l'appareil.

2.2.1 Sélection de cibles

La sélection de cibles est une tâche d'évaluation très courante dans le domaine des interactions humain-ordinateur. La raison est simple : elle simule l'action la plus fréquente effectuée par les utilisateurs, soit le simple clic sur un bouton ou un élément interactif de l'interface. Le test le plus commun pour contraster la performance induite par différents dispositifs de sélection est le standard ISO 9241-411 [17]. Inspiré des travaux du psychologue Paul Fitts [17], ce test implique la sélection de cibles disposées circulairement à l'écran, dans un ordre déterminé enchaînant les cibles opposées du cercle (voir Figure 2-1). Pour un même dispositif, on peut répéter le test avec plusieurs tailles de cibles et distances entre celles-ci pour en obtenir un aperçu plus complet. Pour chacune des occurrences, on mesurera le temps de complétion, le nombre d'erreurs (une sélection ailleurs que sur la cible à sélectionner) ainsi que le débit (en bit/seconde). Ce test est notamment utilisé par Lin et al. [4] (légèrement modifié) et par Wang et al. [18] pour évaluer les écrans tactiles dans un environnement vibrant.

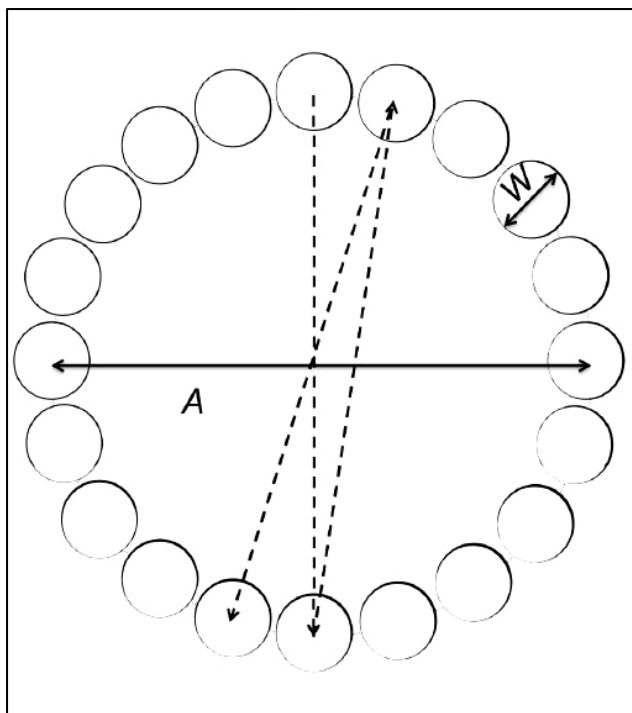


Figure 2-1: Test ISO 9241-411. Les cibles de taille W sont disposées à une distance A l'une de l'autre. L'ordre de sélection des cibles est indiqué par les flèches en pointillés.

D'autres chercheurs ont plutôt réalisé des exercices de sélection de cibles non standardisées. Dans certains cas, il s'agit simplement de cibles circulaires de tailles diverses apparaissant à des emplacements semi-aléatoires sur l'écran, tel que réalisé par Cockburn et al. [6]. Stanton et al. [7], quant à eux, ont évalué la sélection de cibles d'une perspective d'utilisation de menus placés à des positions constantes sur l'interface. Leur expérience s'est faite dans un milieu sans vibration. Ils ont comparé quatre dispositifs de sélection pour la tâche de sélection de menus : un écran tactile, une boule de commande (*trackball*), un pavé tactile et un bouton rotatif. Sur le plan de la vitesse de sélection, l'écran tactile a engendré les performances les plus rapides. Le nombre d'erreurs était cependant inférieur avec le bouton rotatif, mais cela s'explique par le fait que contrairement aux trois autres appareils, le bouton rotatif n'était pas utilisé pour guider un curseur vers la bonne cible, mais permettait plutôt de passer d'une cible à une autre de façon cyclique. Puisqu'il n'était pas possible de sélectionner « à côté » d'une cible, le nombre d'erreurs était naturellement réduit. Reste que cela représente bien la manière dont les boutons rotatifs opèrent traditionnellement avec les interfaces, ce qui en fait un bon comparatif d'une utilisation réelle entre les dispositifs. Aucune

différence n'a été observée sur la charge mentale, tandis que l'écran tactile a récolté des scores d'utilisabilité supérieurs à ses compétiteurs. Les participants l'ont toutefois considéré comme plus inconfortable que les autres.

Si on monte sur l'échelle de la vibration, on retrouve l'étude de Lin et al. [4] dans laquelle les auteurs ont comparé trois dispositifs de sélection (écran tactile, souris, boule de commande) à trois niveaux de vibration. Plus précisément, ils ont effectué un test de loi de Fitts semblable au ISO 9241-411 d'abord sans vibration, puis avec une vibration d'amplitude $0,22 \text{ m/s}^2$ (« pas inconfortable » selon la norme ISO 2631-1 [19]) et une vibration d'amplitude $0,34 \text{ m/s}^2$ (« un peu inconfortable » selon la norme ISO 2631-1 [19]). Dans un environnement statique, l'écran tactile menait à une sélection des cibles plus rapide que les deux autres, et ce, avec un taux d'erreur similaire. Cet avantage de vitesse a été conservé dans les niveaux de vibration plus élevés, mais le taux d'erreur a augmenté significativement avec la vibration. C'est donc dire que le débit de l'écran tactile sans vibration était plus élevé que celui de la souris et de la boule de commande, mais que dans un environnement vibrant la souris et l'écran tactile ont un débit très similaire, et supérieur, à la boule de commande. La taille des cibles affectait également le taux d'erreur avec l'écran tactile : cet effet était significatif pour les cibles de $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ et plus petit. Bref, même avec des niveaux de vibration assez faibles, il en ressort que le mouvement affecte les performances avec l'écran tactile plus qu'avec les deux autres dispositifs mécaniques.

Cockburn et al. [6] ont réalisé une expérience similaire à celle de Lin et al. alors qu'ils ont comparé un écran tactile avec une boule de commande pour une tâche de sélection de cibles de tailles différentes, apparaissant dans un ordre prédéfini, mais sans logique apparente. La différence principale entre les deux expériences est que Cockburn et ses collègues ont comparé les deux dispositifs à trois niveaux de vibration : aucune vibration, vibration « inconfortable » d'amplitude $1,10 \text{ m/s}^2$ et vibration « très inconfortable » d'amplitude $2,15 \text{ m/s}^2$. Contrairement aux articles cités précédemment dans cette section, leurs résultats indiquaient que la sélection de cibles était légèrement plus rapide avec l'écran tactile qu'avec la boule de commande, quoique pas significativement. On peut supposer que les différences entre le type de tâche de sélection ont pu jouer un rôle dans cet écart. Dans les conditions avec vibration, on retrouve des résultats similaires aux autres articles. Pour l'écran tactile, le temps de complétion de la tâche a essentiellement doublé avec la vibration, ce qui n'a pas été le cas de la boule de commande. Ce dernier permettait donc une sélection un peu plus rapide que l'écran tactile aux deux niveaux de vibration, quoique cet

écart n'était pas significatif non plus. La charge mentale n'a pas été mesurée, mais plutôt la frustration. Les participants ont trouvé que l'écran tactile était plus frustrant que la boule de commande. Le niveau d'inconfort physique était cependant comparable entre les deux.

Une expérience similaire a récemment été complétée par Wang et al. [18], encore une fois en utilisant la tâche de sélection ISO 9241-411. Leur étude comportait quatre dispositifs : une souris, une boule de commande, un écran tactile et un dispositif de capture de mouvement des mains.² Au-delà d'une simple vibration, ils ont aussi pu soumettre leurs participants à des mouvements plus complexes selon des axes de rotation. Les tâches ont donc été réalisées sans vibration, avec un mouvement latéral (lacet³ de $\pm 10^\circ$ dans une période de 4 secondes), un mouvement avant-arrière (tangage de $\pm 10^\circ$ dans une période de 4 secondes) et un mouvement omnidirectionnel (simultanément du lacet, tangage, roulis, cavalement, embardée et pilonnement). Conformément aux résultats de [4], [7], la souris et l'écran tactile sont les dispositifs les plus rapides dans un contexte statique, suivi de la boule de commande, puis de la capture de mains loin derrière. Étonnamment, le temps pour accomplir les tâches a été constant pour tous les niveaux de vibrations pour l'écran tactile, la souris et la boule de commande. Il est donc possible que l'intensité des vibrations n'ait pas été assez prononcée pour réellement impacter les mouvements des participants. Pour le taux d'erreurs, les auteurs n'ont pas fourni les résultats des combinaisons entre les dispositifs et le niveau de vibration; on sait par contre que le seul écart significatif se trouvait entre la capture des mains et les autres dispositifs, ces derniers ayant un taux d'erreurs plus bas. Les auteurs ont aussi rapporté des scores de charge mentale plus élevés pour la souris et l'écran tactile par rapport aux autres dispositifs évalués.

Schachner [20] a réalisé un test de sélection de cibles ISO 9241-411 sur un siège de vibrations⁴. Son expérience encapsule plusieurs autres variables que la vibration, notamment la position de l'écran tactile, le type de technologie de l'écran tactile, et l'ancrage de la main sur le côté de l'écran, mais nous nous intéressons plus particulièrement à la quantification des effets de la vibration sur

² Il s'agit d'une technologie effectuant un suivi de la position des mains pour l'intégrer à la manière d'un pointeur dans une application.

³ Note sur les termes https://fr.wikipedia.org/wiki/Roulis#Tableau_de_synth%C3%A8se

⁴ Par souci de transparence, il s'agit d'une étude réalisée par un ancien étudiant de Prof. Doyon-Poulin. Le siège de vibrations est celui que nous utilisons dans le cadre de l'expérience du mémoire actuel.

la performance. Sur ce point, une vibration d'amplitude $0,715 \text{ m/s}^2$ a réduit le débit de l'écran tactile pour la tâche de sélection de 6,8 bit/s à 5,7 bit/s, soit une baisse de 16%. Le taux d'erreur est quant à lui passé de 9,0% à 16,7% avec la vibration, en hausse de 190%. La même conclusion s'impose encore une fois de ces résultats : les turbulences ont un effet plus grand sur la précision que sur la rapidité de l'interaction.

Tout compte fait, ces différents articles dressent un portrait mixte de l'état des forces des dispositifs de sélection. En ce qui concerne la vitesse de sélection, on remarque que l'écran tactile est au moins aussi rapide que la souris et la boule de commande, et ce, peu importe le niveau de vibration. Celui-ci a plutôt un impact sur le taux d'erreurs de l'écran tactile, ce qui mène à davantage de frustration et donc une charge mentale plus élevée chez les utilisateurs. Sur le plan du confort physique, il ne semble pas que l'écran tactile soit plus inconfortable que les autres dispositifs.

2.2.1.1 Entrée de données numériques sous vibration

Quand on réfère à la sélection de cibles, on parle souvent d'évaluation abstraite de la capacité de dispositifs à interagir avec une portion prédéfinie de l'écran, et ce, dans un temps donné et avec un certain taux d'erreur. Sur une interface, on peut utiliser ce genre d'interactions pour la sélection de boutons, de lien ou de tout autre élément nécessitant une interaction ponctuelle. Il s'agit d'un mouvement simple, mais il constitue la base de certains mécanismes d'interaction (*widgets*) plus complexes. L'exemple par excellence, et celui qui nous intéresse particulièrement dans le cadre de ce projet, est le clavier numérique (voir Figure). Il s'agit d'un agencement standard de 10 touches chiffrées, en plus de quelques touches supplémentaires variant selon l'utilisation.



Figure 2-2: Exemple de clavier numérique

Si on implémente une version virtuelle de ce clavier numérique conçu pour être utilisé avec un écran tactile, comment se compare-t-il à son pendant physique ainsi qu'à d'autres dispositifs d'entrée de données numériques? Si on ajoute de la vibration à l'équation, quel effet cela aura-t-il sur leur performance?

En 2016, Avsar et al. [21] ont conçu une application pour tablette destinée aux pilotes de ligne permettant à ceux-ci de voir leur trajet sur une carte et de changer la fréquence radio de leurs différents canaux de communication. Les participants devaient donc simuler le changement de fréquences selon des parcours aériens réels. Trois façons de faire étaient proposées : un clavier numérique virtuel, un clavier numérique physique, ainsi qu'un système permettant de glisser-déposer (*drag and drop*) l'icône d'un aéroport ou d'une station radio dans une section dédiée de l'interface pour l'activer automatique. Au final, le système de glisser-déposer a permis la complétion la plus rapide des tâches, ce qui s'explique facilement par le fait qu'aucune entrée numérique concrète n'avait à être réalisée. Pour la même raison, moins d'erreurs ont été commises avec ce dispositif. Quant aux claviers numériques, aucune différence n'a été décelée pour le temps de complétion ou le taux d'erreurs.

Dans une expérience présentée précédemment [6], les auteurs avaient évalué la sélection de cibles avec un écran tactile et une boule de commande à trois niveaux de vibration. En gardant ces mêmes variables indépendantes, ils ont aussi effectué des tâches d'entrée de valeurs numériques sur un

clavier numérique virtuel : les utilisateurs devaient entrer une série de trois chiffres aléatoires. Les auteurs ont observé que peu importe le niveau de vibration, l'écran tactile permettait d'entrer le nombre significativement plus vite que la boule de commande. Les auteurs ayant considéré une erreur comme une sélection erronée du bouton « OK » (pour confirmer la valeur entrée), les taux d'erreurs étaient très bas et ne différaient pas d'un dispositif à un autre.

L'étude la plus complète dans ce domaine de l'entrée de valeurs numériques est celle de Wynne et al. [22]. En effet, ils ont demandé à des participants d'entrer une valeur aléatoire de trois chiffres avec un bouton rotatif ainsi que sept mécanismes d'interaction tactiles. Parmi ces derniers, quatre nous intéressent particulièrement ici : un clavier numérique, des touches fléchées pour augmenter ou diminuer la valeur de chaque chiffre (boutons sous le chiffre ou de part et d'autre), et des touches fléchées pouvant être maintenues (*tap and hold*) permettant d'augmenter la valeur totale du nombre. Ces quatre dispositifs n'utilisent que le simple toucher de l'écran et n'utilisent donc pas de mouvements de doigts complexes. La tâche d'entrée de nombre a aussi été répétée à quatre niveaux de vibration, soit : aucune vibration, légère vibration (mouvement vertical; amplitude pondérée $0,37 \text{ m/s}^2$), légère turbulence (mouvement vertical, roulis, tangage; amplitude pondérée de $0,26 \text{ m/s}^2$) et turbulence modérée (mouvement vertical, roulis, tangage; amplitude pondérée de $0,52 \text{ m/s}^2$). Ils ont d'abord constaté un effet négatif de la vibration sur le temps de complétion, mais le classement entre les cinq dispositifs qui nous intéressent restait le même dans tous les cas. Ainsi, le clavier numérique était le plus rapide des cinq, suivi des boutons pour modifier les chiffres individuellement (pas de différence selon la position des boutons). Venaient ensuite le bouton rotatif, puis les flèches de modification globale du nombre. Entre les mécanismes d'interaction tactiles, le clavier numérique était également celui qui a engendré le moins d'interactions supplémentaires pour changer la valeur. Côté charge mentale et utilisabilité, le clavier numérique a obtenu de meilleurs résultats que les quatre autres dispositifs (aucune différence entre eux).

Tout compte fait, la littérature nous montre que le choix entre un dispositif mécanique ou tactile ne doit pas s'arrêter uniquement à leur performance dans les tests de sélection de cibles. Même si on considère que chaque touche comme une « cible », on constate aisément que les tests de sélection ne fournissent qu'un portrait abstrait de la performance des dispositifs. La manière dont les mécanismes d'interaction tactiles sont conçus, de même que les spécificités de la tâche à accomplir sont assurément à considérer. Et en prenant le contexte de l'entrée de données numériques, on

constate que l'écran tactile tient le haut du pavé de par sa manière à proposer une interface optimisée pour la tâche.

2.2.2 Glissement

Si on considère la sélection de cibles comme l'action la plus simple pouvant être réalisée sur une interface, le glissement est celle qui la suit de plus près sur le plan de la complexité. En effet, il s'agit d'une manœuvre courant pour quiconque utilise un ordinateur personnel, le plus souvent sous la forme d'un glisser-déposer pour déplacer une fenêtre, une icône ou un fichier. Une grande part des interactions avec nos appareils mobiles se font également avec un glissement, notamment pour déplacer une carte sur une application de navigation ou pour faire défiler une page web. Il est donc tout naturel de se demander comment les vibrations peuvent impacter ce mouvement en particulier, et si les dispositifs mécaniques offrent une meilleure performance pour ce type de tâches. Les articles suivants explorent la question.

Encore une fois, il faut mentionner l'étude de Cockburn et al. [6] dans laquelle ils comparaient un écran tactile à une boule de commande à trois niveaux de vibration (aucune vibration, vibration inconfortable, vibration très inconfortable). Une des tâches consistait à entrer une valeur avec un bouton-glisseur (*slider*). Au final, aucune différence de temps pour réaliser la tâche n'a été décelée entre les dispositifs, et les auteurs ne disent pas non plus si le dispositif impactait le taux d'erreur. Cependant, ils notent qu'un nombre élevé d'erreurs a eu lieu dans toutes les conditions de vibrations, et particulièrement avec une vibration élevée. Ils considèrent que cela rend les boutons-glisseurs pratiquement inutilisables et ne les recommandent donc pas pour une utilisation dans un poste de pilotage.

Wynne et al., dans leur étude précédemment citée [22], ont aussi évalué plusieurs mécanismes d'interaction tactiles basés sur un glissement pour entrer une valeur numérique dans un environnement vibrant. Plus précisément, ils ont testé un mécanisme consistant en trois boutons-glisseur, chacun modifiant un chiffre de la valeur à modifier, ainsi qu'un cadran d'horloge où la sélection de chiffres se faisait dans un mouvement circulaire. Ils ont trouvé que le temps de complétion de la tâche est similaire entre ces dispositifs. Leur temps de complétion était cependant plus lent que celui des mécanismes d'interaction basés sur les touches fléchées ainsi que le clavier numérique. C'est surtout sur le plan de l'utilisabilité que les dispositifs utilisant le glissement montrent des lacunes : leurs scores du test d'utilisabilité SUS [23] étaient de 30% inférieurs à ceux

des autres dispositifs. Cet écart était également présent dans les résultats des questionnaires de charge mentale. Les participants semblaient donc avoir ressenti de manière très désagréable leur utilisation.

Un élément particulièrement intéressant de cet article est que les participants ont complété une autre tâche dans laquelle ils devaient déplacer un curseur circulaire sur une cible de la même taille. La tâche devait être réalisée de deux façons : en appuyant sur des touches fléchées sur l'écran tactile, ou en utilisant un mouvement de glisser-déposer. Les résultats sont frappants : pour cette tâche, le glissement permettait d'accomplir la tâche plus rapidement et avec moins d'interactions supplémentaires, tout en récoltant des scores de charge mentale et d'utilisabilité supérieurs à l'autre option. C'est tout l'inverse de la tâche d'entrée de valeur numérique. On retrouve ici le constat de la section précédente : le meilleur dispositif d'interaction pour une tâche n'est pas nécessairement le meilleur pour une autre.

Alors qu'ils avaient fait un test de loi de Fitts avec une souris, une boule de commande, un écran tactile et un dispositif de suivi des mains, Wang et al. [18] ont aussi évalué une tâche de glisser-déposer avec ces mêmes dispositifs. Pareillement, le tout s'est déroulé à quatre niveaux de vibration. Les résultats de cette tâche suivent essentiellement ceux de la tâche de sélection de cibles : la souris et l'écran tactile étaient les plus rapides et produisaient le moins d'erreurs. Au niveau le plus élevé de vibration, la souris avait un léger avantage pour les erreurs, quoique non significatif, ce qui indique que l'écran tactile est potentiellement plus sensible aux vibrations pour ce genre de tâches. Cela rejoint les résultats de [6] qui montrent qu'à un niveau de vibration supérieur, la performance de l'écran tactile est similaire à celle de la boule de commande. Une autre possibilité est que le curseur du bouton-glisseur de [6] soit plus petit que l'élément à déplacer de [18] ce qui pourrait expliquer l'écart entre les résultats.

Afin de simuler le mouvement et la turbulence présente dans les cockpits d'avion, Alapetite et al. [24] ont placé un écran tactile dans un wagon de montagnes russes. Les participants devaient alors réaliser des tâches simples sur l'écran tactile, notamment des sélections de cibles de tailles et positions aléatoires, ainsi que des glissements d'un curseur vers une cible. Ils ont enregistré la vibration du siège à l'aide de senseurs, et ont donc pu associer a posteriori le niveau de vibration présent lors de chaque tâche. Les vibrations ont été classées en trois catégories de secousses : les secousses faibles (moins de $2,05 \text{ m/s}^2$), les secousses moyennes ($2,05$ à $3,75 \text{ m/s}^2$) et les secousses

fortes (plus de $3,75 \text{ m/s}^2$). Pour les tâches de sélection de cibles, une augmentation de 55% du temps de sélection et une hausse de 247% du taux d'erreurs ont été enregistrées entre les petites et les grandes secousses. En ce qui concerne les tâches de glissement, ces valeurs explosent à 178% pour le temps de sélection et 1499% pour le taux d'erreur. On conclut donc que le glissement est d'autant plus sensible aux vibrations que le simple toucher, et qu'il devient quasi inutilisable lors de turbulences très fortes. Notons que les amplitudes de vibrations dans cette étude sont très élevées, alors que le niveau « très inconfortable » de la norme ISO 2631-1 débute à $1,60 \text{ m/s}^2$, et que le niveau maximal « extrêmement inconfortable » commence à $2,50 \text{ m/s}^2$ [25]. Parmi les autres articles cités dans cette revue de littérature, seule l'expérience de Cockburn et al. [6] a utilisé des niveaux de vibrations similaires.

Somme toute, la recherche nous montre que les mouvements de glissement peuvent être utilisés de manière assez performante et sécuritaire lors de turbulences d'intensité faible ou moyenne, mais uniquement pour des tâches ne demandant pas beaucoup de précision. Ils devraient donc être réservés à des parties moins critiques de l'interface, et ne sont pas recommandés sous forme de gradateur ou de bouton-glisseur pour effectuer des entrées de données.

2.3 Interaction sous vibration pour d'autres types de véhicules

Afin d'étendre les perspectives sur l'interaction en condition de vibration au-delà du poste de pilotage, cette section revoit les principaux résultats obtenus dans des véhicules militaires de terrain et maritimes et pour le transport de surface civil.

2.3.1 Véhicules militaires

Le domaine militaire cherche depuis plusieurs années à intégrer les écrans tactiles dans leurs véhicules, tant terrestres que maritimes. On les retrouve notamment comme interface des systèmes de gestion de combat présents sur certains véhicules militaires tout-terrains. Ces véhicules étant aussi sujets à des conditions routières inhospitalières, il était primordial pour les concepteurs d'évaluer l'impact du mouvement du véhicule sur la capacité d'utiliser ces nouvelles interfaces tactiles sous un certain niveau de vibrations. D'autres recherches s'intéressent plutôt aux écrans

tactiles lorsque soumis à des mouvements similaires à celui de vagues pour anticiper leur performance sur les navires. Ci-après sont présentées quelques études sur le sujet.

Pour recréer l'utilisation d'interfaces dans la cabine de véhicules en mouvement, McDowell et al. [26] ont réalisé une étude dans laquelle les participants devaient toucher des cibles sur des écrans tactiles placés à différents endroits dans le cockpit d'un simulateur de cabine de camion militaire. Ils ont évalué la performance humaine à travers deux tâches abstraites de sélection de cibles réalisées à trois niveaux de vibration (statique, roulis, tangage). La tâche qui nous intéresse est la tâche de « choix », dans laquelle les participants devaient sélectionner une cible de taille différente parmi une sélection de 2, 4 ou 8 cibles. Conformément à la loi de Hick-Hyman [27], [28], une augmentation du nombre de choix a mené à un temps de réaction plus long, mais cette dernière a aussi été affectée par la vibration (tant pour le roulis que le tangage). À l'inverse, le mouvement de la cabine n'a pas eu d'effet sur le temps du mouvement pour sélectionner la cible. Il est donc intéressant de constater que ce sont sur les plans perceptifs et cognitifs que la vibration a un impact, tandis que le mouvement physique en lui-même ne varie pas d'une condition à l'autre, du moins en termes de temps. Les résultats montrent que la vibration réduisait la précision des sélections sur l'écran tactile, conformément à plusieurs autres articles précédemment cités.

Pour choisir quel dispositif de sélection utiliser sur les navires militaires, Yau et al. [29] ont conduit une étude consistant en la sélection de cibles dans une suite similaire à celle du test ISO 9241-411 à 5 niveaux de vibration : aucun, pilonnement, roulis, tangage, et aléatoire, soit une combinaison des trois. Aucune valeur d'accélération n'a été fournie, mais puisque l'objectif était de reproduire l'effet de vagues, nous supposons qu'il s'agissait de mouvements de faible fréquence et d'amplitude faible ou modérée. Les dispositifs testés étaient trois types de boules de commande et un écran tactile. Dans toutes les conditions de vibration, l'écran tactile s'est avéré être le dispositif le plus rapide. L'influence de la vibration sur la vitesse s'est davantage fait sentir pour le mouvement aléatoire, puis pour le roulis et le tangage. Aucun effet du pilonnement sur la vitesse n'a été trouvé. Le taux d'erreur était toutefois plus élevé pour l'écran tactile. Nous avons vu précédemment que les cibles plus petites étaient particulièrement difficiles à sélectionner du premier coup avec un écran tactile : les résultats de cette étude sont donc cohérents, les cibles utilisées étant de 6,4 mm de diamètre. Concernant l'effort physique, les participants ont rapporté une fatigue plus forte lors de l'utilisation de l'écran tactile, un résultat en ligne avec ceux des études similaires.

En 2011, Salmon et al. [30] ont évalué la performance d'une interface composée d'un écran tactile et d'un clavier d'ordinateur pour effectuer des tâches de gestion de combat dans un véhicule tout-terrain. Il s'agissait de tâches de lecture, d'écriture sur le clavier, de navigation de carte utilisant des boutons virtuels sur l'écran tactile, de création d'unité de combat (en touchant et maintenant le doigt sur l'écran tactile), et de tracé de limites de l'unité à l'aide d'un mouvement de glissement. Les participants ont effectué cette expérience dans un simulateur de véhicule militaire à deux niveaux de vibration : simulation de route goudronnée, et simulation de route de gravier. Les résultats ne sont pas surprenants, alors que les tâches étaient généralement accomplies en plus de temps sur la route cahoteuse. La seule exception à ce constat était la tâche de navigation de carte, alors que la vibration n'a pas significativement impacté la performance des participants. La taille des boutons virtuels semble avoir été assez grande pour permettre une interaction rapide malgré le mouvement du véhicule. Les erreurs étaient également plus fréquentes sur la route non goudronnée. Les auteurs ont constaté que la précision de l'écriture sur le clavier et de la création d'unité a particulièrement été affectée, et que l'exactitude du mouvement de glissement pour tracer des limites de l'unité était dégradée. La vibration impliquait aussi des scores NASA-TLX de charge mentale plus élevés, de même que des scores SUS d'utilisabilité plus faibles. Somme toute, cette étude propose une méthodologie réaliste et intéressante à défaut de fournir des résultats excitants.

L'année suivante, Goode et al. [31] ont répété l'expérience de Salmon et al. [30] dans un véhicule militaire réel au lieu d'un simulateur. La méthode reste essentiellement la même, alors que les mêmes tâches et les mêmes conditions routières sont présentées aux participants. En fait, ils sont arrivés aux mêmes résultats que l'étude précédente en ce qui concerne le temps de complétion des tâches, les taux d'erreurs et la charge mentale. Ils concluent que les écrans tactiles sont peu adaptés à l'utilisation dans des conditions de vibration modérée, tout en suggérant de tester d'autres dispositifs, comme des boutons rotatifs et des souris, dans des conditions similaires.

À l'exception de l'article de Yau et al., ces études se sont surtout concentrées dans l'évaluation des écrans tactiles sans les comparer à d'autres dispositifs de sélection. La subdivision du temps de complétion en temps de réaction et temps de mouvement dans McDowell et al. nous a donné une meilleure idée de la manière dont la vibration affecte la rapidité d'exécution, mais les autres résultats ne nous apprennent rien de neuf. À tout le mieux, ces études permettent de quantifier l'écart de performance entre les deux conditions d'utilisation.

2.3.2 Véhicules civils

Alors que la sous-section précédente s'attardait aux résultats de la recherche dans le domaine militaire, celle-ci propose une sélection d'études qui s'intéressent à l'effet des vibrations dans les véhicules civils.

Mansfield et al. [32] ont administré à leurs participants un test de sélection de cibles de différentes tailles, apparaissant aléatoirement sur un écran. Pour effectuer la sélection, les utilisateurs devaient utiliser une souris ou un pavé tactile selon la condition expérimentale (notez qu'il n'y avait pas d'écran tactile dans le cadre de cette expérience). L'expérience s'est déroulée dans un simulateur de vibration de train à trois niveaux : aucune vibration, vibration faible (combinaison de cavalement, embardée et pilonnement avec amplitude moyenne de 0.23 m/s^2) et vibration moyenne (combinaison de cavalement, embardée et pilonnement avec amplitude moyenne de 0.51 m/s^2). Conformément aux résultats de Stanton et al. [7], le temps de complétion avec la souris était significativement plus rapide qu'avec le pavé tactile, et ce, peu importe la taille de la cible et le niveau de vibration. Aucune différence entre les deux dispositifs n'a été trouvée concernant le taux d'erreur.

Alors que l'étude précédente concernait le milieu ferroviaire, celle Baldus et al. [33] provient plutôt de l'agriculture. La tâche consistait en la sélection d'items spécifiques dans un menu déroulant sur l'écran tactile d'un tracteur alors que celui-ci était soit à l'arrêt, soit en mouvement à $7,5 \text{ km/h}$ dans un champ gazonné. Les participants devaient réaliser une série de tâches avec une souris, un pavé tactile et l'écran tactile sous les deux niveaux de vibration. Les auteurs ont utilisé la loi de Fitts pour analyser les résultats et rapportent donc le débit de chaque condition expérimentale. À l'arrêt, le débit de la souris était similaire à celui de l'écran tactile (et supérieur à celui du pavé tactile). Avec la vibration, le débit de la souris a cependant été réduit alors que celui de l'écran tactile est resté stable. Le même constat se répète aussi pour le temps de complétion des tâches, puisque la souris était plus rapide que l'écran tactile à l'arrêt, mais l'écart disparaissait lorsque le tracteur était en mouvement. Il s'agit d'un phénomène étonnant à la lumière des autres articles, puisque la vibration semblait ordinairement avoir un effet plus grand sur l'écran tactile que la souris. Les auteurs ne spéculent pas sur l'origine de cette anomalie, mais nous pensons que la position de l'écran à proximité de la cuisse des participants et la possibilité de s'agripper à son pourtour aurait réduit l'impact du mouvement sur la performance. Autre fait surprenant, les participants ont

généralement trouvé la souris plus utilisable, rapide et précise que l'écran tactile alors que rien ne semble supporter cette impression. On peut spéculer que les utilisateurs étaient moins familiers avec ce dispositif en 2008 et préféraient donc la souris, beaucoup plus utilisée à ce moment. Notons aussi que les participants ont trouvé l'écran tactile plus inconfortable que la souris, ce qui constitue une tendance générale dans la comparaison des deux dispositifs vu le besoin de maintenir le bras étendu durant l'interaction.

Plus récemment, en 2018, Mayer et al. [34] se sont intéressés à la manière dont les dos d'âne, ces bosses servant à réguler la vitesse des voitures, influent sur les interactions avec l'écran tactile maintenant central au tableau de bord des nouveaux véhicules. Bien que leur objectif final soit de concevoir un modèle de correction de l'entrée utilisateur pour en améliorer la précision, ils consacrent tout de même la première moitié de leur article à une expérience de quantification de l'effet des dos d'âne. Dans cette expérience, les participants étaient assis dans un simulateur et devaient sélectionner une cible en même temps qu'ils « roulaient » sur un dos d'âne (parabolique, 5 cm de hauteur et 30 cm de largeur). En fin de compte, pour ces tâches très courtes, les auteurs n'ont pas recensé d'effet significatif du dos d'âne sur le temps de sélection comparativement à la sélection sans dos d'âne. Ils ont toutefois constaté plus de touchés d'écran par tâche, signe que les participants touchaient d'abord l'écran par accident puis recliquaient pour corriger leur erreur.

Ces trois articles viennent essentiellement confirmer ce que les études liées à l'aviation ont trouvé, c'est-à-dire que le taux d'erreur des écrans tactiles se trouve être la variable la plus affectée par la vibration. La souris s'établit comme un dispositif de sélection de premier plan, presque équivalent à l'écran tactile sur le plan de la vitesse, particulièrement lorsque les cibles deviennent plus petites. Le type et l'intensité de la vibration jouent également un rôle important dans l'effet qu'elle produira sur l'interaction : en deçà d'une certaine intensité, son impact est presque nul sur la performance.

2.4 Recommandations de conception pour le poste de pilotage

Il ne faut pas perdre de vue que la présente recherche en est tout d'abord une où la phase de conception est prédominante. Pour cette raison, il est nécessaire de synthétiser l'information des sections précédentes pour en créer des recommandations de conception applicables pour notre

contexte, c'est-à-dire le cockpit d'avion. Cette section fait la synthèse des recommandations de conception tirées de la littérature.

- *Prioriser les mouvements simples de tapement plutôt que les mouvements de glissement.* Les données montrent clairement que la vibration a un impact exacerbé sur les mouvements de glissement, et que leur utilisation est donc risquée dans un cockpit [18], [22], [35]. En général, les mécanismes d'interaction basés sur des touches simples résistent mieux aux mouvements parasites et dépassent même les dispositifs mécaniques en termes de performances dans ces conditions [22].
- *Préférer le glissement (mouvement contrôlé) au balayement (mouvement rapide et imprécis).* Entre ces deux types de mouvement impliquant de glisser le doigt à l'écran, la recherche suggère de privilégier le glissement, qui est plus contrôlé et appuyé [22]. Les chercheurs pensent que cela est dû au fait que ce mouvement nécessite de garder un contact constant entre le doigt et l'écran, ce qui crée un point d'appui pour la main et réduit donc l'impact de potentielles vibrations.
- *Maximiser la taille des zones cliquables.* Les études concluent que la taille des objets devant être sélectionnés sur l'écran a un effet fort sur la performance et les taux d'erreurs de l'écran tactile, alors que tous deux sont réduits plus la taille des cibles diminue [4], [20]. Il apparaît même que cette variable a un impact encore plus grand sur l'écran tactile que sur les autres dispositifs de sélection comme la souris et la boule de commande [6], [18]. Bien qu'il s'agisse d'un grand défi lors de l'intégration d'un grand nombre d'éléments sur une petite surface, il est primordial d'utiliser l'espace maximal disponible pour chaque élément d'une interface tactile.
- *Éviter les gestes utilisant plusieurs doigts.* Alors qu'on retrouve dans la recherche en interactions humains-ordinateurs des propositions d'interactions avec les systèmes avioniques utilisant des gestes multidoigts⁵ [36], les experts en facteurs humains s'entendent pour dire qu'il ne s'agit pas d'une bonne idée [37], [38]. Encore une fois, ce type d'interaction présente un certain risque en raison des turbulences ainsi que du besoin de parfois faire des entrées rapidement sous pression. En effet, [37], [38] montrent que ces

⁵ Penser au pincement pour zoomer et dézoomer une carte, ou la rotation de deux doigts pour tourner un bouton virtuel.

gestes sont plus difficiles à accomplir avec constance et précision, et que le nombre supérieur de doigts sur l'écran en cache une plus grande portion. Ce type de gestes empêche également la possibilité de s'agripper à un point d'ancrage près de l'écran pour réduire l'impact des vibrations.

- *Bonifier les interactions avec un retour visuel ou auditif.* Étant donné que les écrans tactiles de plus grande taille n'ont – à ce jour – pas de fonctionnalité de retour haptique, il est pertinent d'ajouter une autre modalité de rétroaction pour informer les utilisateurs du succès ou de l'échec de leur action. Une simple rétroaction visuelle peut avoir un effet positif sur la vitesse de complétion des tâches [39]. Le constat est le même dans le cas d'un retour auditif [40], [41], quoique cet avantage ne se confirme pas dans toutes les études consultées [7].
- *Donner la possibilité d'utiliser plusieurs dispositifs pour la même tâche.* Par exemple, donner l'option d'utiliser soit un bouton rotatif, soit un écran tactile pour une certaine entrée de données [6], [7]. Dans le cas où les deux dispositifs sont sécuritaires à utiliser dans toutes les conditions, cela permet dans un premier lieu d'introduire doucement de nouveaux dispositifs d'interaction dans un milieu où les utilisateurs (les pilotes) sont souvent réfractaires au changement. Les avantages de chaque dispositif peuvent aussi être exploités pour des parties spécifiques d'une tâche, par exemple en utilisant l'écran tactile pour choisir la valeur à changer, puis le bouton rotatif pour changer la valeur. Cela permet aux utilisateurs d'accomplir les tâches d'une manière qu'ils considèrent optimale. Et d'autre part, avoir deux dispositifs fonctionnels constitue un bon exemple de redondance d'un point de vue technique, alors que la défaillance d'un des deux pourrait simplement engendrer un basculement de l'utilisation vers le dispositif encore fonctionnel.
- *Ajouter un mécanisme de confirmation de valeur.* Nous l'avons vu, les écrans tactiles sont particulièrement susceptibles aux erreurs de saisie dans un environnement turbulent. Ce n'est donc pas une surprise de constater que plusieurs articles recommandent d'inclure un mécanisme de confirmation pour éviter de créer une situation dangereuse par inadvertance [35], [36], [38], [42]. Ce filet de sécurité pourrait s'activer uniquement lorsque l'appareil détecte un niveau de vibration d'une intensité prédéfinie ou pour des champs d'entrée de données ayant un impact sur la sûreté des opérations.

- *Si possible, éliminer tout simplement l'entrée de données.* Les résultats de l'expérience d'Avsar et al. [21] nous remémorent un constat évident : l'entrée de donnée la plus rapide et la plus exacte est celle qu'on ne fait pas. Sélectionner une fréquence radio simplement en touchant un symbole est beaucoup plus rapide et précis que d'entrer cette même fréquence avec un clavier. Il n'est pas toujours possible d'utiliser ce principe de conception, par exemple dans le cas de communications radio non transcrites, mais il est absolument primordial de s'en servir si la situation le permet.

2.5 Synthèse

Le tableau placé à l'annexe A illustre la performance de l'écran tactile sur plusieurs dimensions comparativement aux dispositifs mécaniques. Les articles choisis sont classés par date de publication et évaluent tous, à l'exception de Stanton et al. [7], les dispositifs à un ou plusieurs niveaux de vibration. Un code de couleur est utilisé pour visualiser rapidement si l'écran tactile se démarque positivement ou négativement par rapport aux autres dispositifs dans une dimension donnée. Au premier regard, on constate que l'écran tactile possède un clair avantage sur le plan de la rapidité (tous les types de tâches) et du débit (sélection de cibles). Cependant, les taux d'erreurs sont généralement plus élevés que ceux de la souris ou de la boule de commande : cet écart augmente considérablement avec la hausse de l'intensité de vibration. L'écran tactile mène aussi à plus d'erreurs pour les cibles plus petites, alors que les autres dispositifs de sélection mécanique peuvent garder une certaine précision jusqu'à des tailles de cibles plus réduites. Quant à la charge mentale, deux tendances émergent du tableau.

Premièrement, les scores de charge mentale semblent être plus avantageux pour l'écran tactile lors des expériences à un niveau de réalisme plus élevé, comme la sélection de menus de Stanton et al. [7] et l'entrée de données numériques de Wynne et al. [22]. Cela pourrait s'expliquer par la cohérence entre la tâche et l'interface, alors que cette dernière peut être adaptée pour optimiser l'utilisation de l'écran tactile et donc mener à une expérience moins frustrante. De plus, les tâches semi-réalistes sont plus courtes et nécessitent une extension du bras moins prolongée que lors de la complétion d'un test de sélection ISO 9241-411; cela impacte positivement la charge mentale puisqu'elle comporte aussi une dimension physique. Les résultats relatifs au confort tendent à confirmer au moins partiellement cette hypothèse.

Deuxièmement, on observe une tendance temporelle qui avantage l'écran tactile pour la charge mentale et l'utilisabilité. Par exemple, les écrans tactiles sont considérés plus utilisables pour la sélection de menu de Stanton et al. en 2013 [7] que la sélection de menus de Baldus et Patterson en 2008 [33]. Similairement, Stanton et al. en 2013 [7] n'avait pu départager les dispositifs selon la charge mentale, tandis que les résultats de Wang et al. en 2022 [18] favorisent l'écran tactile, et ce, malgré l'ajout de vibrations. Que ce soit en raison de l'amélioration des technologies d'écrans tactiles ou simplement de l'acclimatation de la population en général à ce type de dispositifs, il est difficile de ne pas y voir une tendance.

D'autre part, le principal manque qui ressort de la revue de littérature est le très faible nombre d'articles qui évaluent les dispositifs d'entrée de données à l'aide de tâches réalistes liées au contexte d'utilisation final, constat partagé par Wynne et al. [22]. Les études de Salmon et al. [30] et de Goode et al. [31] axées sur l'utilisation d'écrans tactiles dans les véhicules militaires sont de bons exemples d'expériences où les tâches représentent bien les actions que devront effectuer les utilisateurs dans un contexte réel. En aviation, ce genre d'études n'existe pas vraiment. La plupart se limitent à des tâches purement expérimentales comme la sélection de cibles [20], [24], [35], et celles qui s'intéressent à l'entrée de données numériques testent la saisie des chiffres aléatoires et sans signification pour un contexte d'aviation [6], [22], [43]. Avsar et al. [21] ainsi que Rouwhorst et al. [44] ont bien proposé de nouvelles interfaces basées sur les écrans tactiles pour remplacer les dispositifs mécaniques traditionnels, mais ni l'un ni l'autre n'ont inclus le niveau de vibration à leur design expérimental.

Pourtant, comme nous avons vu dans les sections précédentes, l'implémentation de l'interaction du dispositif ainsi que sa cohérence avec la tâche à effectuer sont deux facteurs primordiaux à considérer dans le choix du dispositif approprié. Pensons à l'article de Wynne et al. [22] où pour un seul dispositif, soit l'écran tactile, différentes implémentations ont donné lieu à un éventail de variations dans la performance pour une tâche d'entrée de données numériques. Certaines implémentations étaient supérieures au bouton rotatif, d'autres équivalentes, et d'autres encore étaient inférieures. Malgré tout, il ne s'agit pas d'une étude complètement réaliste, car les valeurs à entrer étaient complètement aléatoires. On ne peut donc pas s'attendre à ce que les résultats soient exactement les mêmes que pour une utilisation réelle et précise dans le cockpit.

Par conséquent, il apparaît que la meilleure manière d'avoir une idée exacte de l'efficacité des divers dispositifs pour une tâche en particulier est très simple : tester cette tâche avec précision. Ainsi, pour évaluer la performance des mécanismes d'interaction pour une tâche faite fréquemment en vol, comme le changement de vitesse ou d'altitude, on doit l'évaluer telle qu'elle est réellement faite. Il apparaît donc essentiel d'effectuer une étude réaliste pour comparer les nouveaux dispositifs tactiles au référentiel présentement dans l'avion, soit les boutons rotatifs mécaniques et, dans une moindre mesure, le manche à balai.

Ce désir de réalisme emmène d'autres enjeux qui ne sont pas adressés dans la littérature. Par exemple, pour les avions de tourisme et militaires, l'entrée de données de vol est souvent faite en parallèle avec l'action de piloter manuellement l'appareil. Comment ces deux tâches s'imbriquent-elles sur le plan de l'attention et de la performance? Et si la tâche de vol requiert une attention visuelle du pilote, comment la position dans le cockpit des mécanismes d'entrée de données influence-t-elle sur la performance de pilotage? Dans un autre ordre d'idée, on parle souvent d'entrée de données, mais on ne réfère pas à des données précises. Pourtant, les intervalles de ces valeurs de vitesse, d'altitude ou autre sont bien définis. Est-ce que la valeur exacte à entrer joue un rôle dans la performance du dispositif? Ce sont là plusieurs questions qui restent sans réponse quand on parcourt la littérature du domaine.

On constate aussi que la majorité des résultats de recherche sont des données quantitatives : il est nécessaire de chiffrer la vitesse et la propension aux erreurs, de même que des variables plus subjectives comme la charge mentale et le confort. Or, nous croyons que la collecte de données qualitatives provenant de discussions avec les participants peut venir enrichir le champ de recherche plusieurs raisons. Notamment, ces échanges permettent d'éclairer les résultats quantitatifs et d'en tirer un sens plus riche. Ils constituent également un moment d'idéation qui peut mener à l'élaboration de pistes de recherche future.

De toute évidence, certains chercheurs sont du même avis puisque de petites entrevues post-test ont été menées dans Avsar et al. [21] et Cockburn et al. [6]. Il s'agit tout de même d'une pratique méthodologique relativement peu fréquente qui devrait, à notre avis, être davantage utilisée.

2.6 Objectifs de recherche

L'objectif général de cette maîtrise est d'évaluer les écrans tactiles en comparaison aux dispositifs mécaniques pour l'entrée de données numériques sous vibrations, sous l'angle de la performance humaine et de la prévention des erreurs.

Les sous-objectifs suivants guideront également la réalisation du projet. Ceux-ci ont été définis afin de combler des écarts de connaissances apparents dans l'état de la recherche :

- Procéder à l'évaluation des dispositifs à travers une tâche réaliste sur une interface représentative de celle des postes de pilotage d'avions.
- Confirmer les résultats des recherches antérieures quant à la différence de performance entre les gestes de glissement et les gestes de tapement pour l'entrée de données numériques.
- Évaluer l'impact de la position sur l'écran pour des mécanismes d'interaction tactiles similaires.
- Enregistrer des données du regard des participants lors de l'étude pour déterminer comment leur attention est distribuée entre l'entrée de données et une tâche secondaire.
- Catégoriser les tâches d'entrée de données selon l'écart entre la valeur actuelle et la valeur cible.
- Récolter des commentaires subjectifs afin d'enrichir l'évaluation de l'acceptabilité des dispositifs testés.

CHAPITRE 3 CONSIDÉRATIONS MÉTHODOLOGIQUES ET TECHNIQUES

Ce chapitre présente les étapes de conception de l'expérience d'un point de vue technique. Ces explications font office de complément à la méthodologie de l'article au chapitre 4; ainsi, l'information présentée dans l'article ne sera pas répétée ici, à moins que cela soit nécessaire pour la compréhension.

3.1 Structure de l'expérience

Comme mentionné précédemment, l'objectif de la recherche était de déterminer quels dispositifs tactiles ou mécaniques permettent la meilleure performance et sécurité dans le cadre d'entrée de données numériques. Comme défini dans l'énoncé du stage chez CMC Électronique, cette entrée de données est faite sur un *Primary Flight Display* (PFD), soit l'écran de vol principal d'un aéronef. Il s'agit d'un affichage présentant les informations de performance de l'appareil soit le cap (*heading*; HDG), l'altitude (ALT), la vitesse verticale (*vertical speed*; VS), la vitesse indiquée (*indicated airspeed*; IAS), et le calage altimétrique (la calibration de la valeur de l'altitude selon la pression atmosphérique; Baro). Le cap est traditionnellement affiché comme une boussole, alors que ALT, VS et IAS prennent la forme de rubans déroulants. Le baro, quant à lui, est affiché comme une simple valeur sous le ruban ALT.

Au centre du PFD, on retrouve une représentation abstraite de l'avion, le *flight director* (FD), permettant au pilote de déterminer l'angle d'inclinaison horizontal et vertical de l'appareil. La Figure 3-1 montre un exemple de PFD standard, avec le FD prenant la forme de deux longs triangles jaunes rappelant les deux ailes de l'appareil.

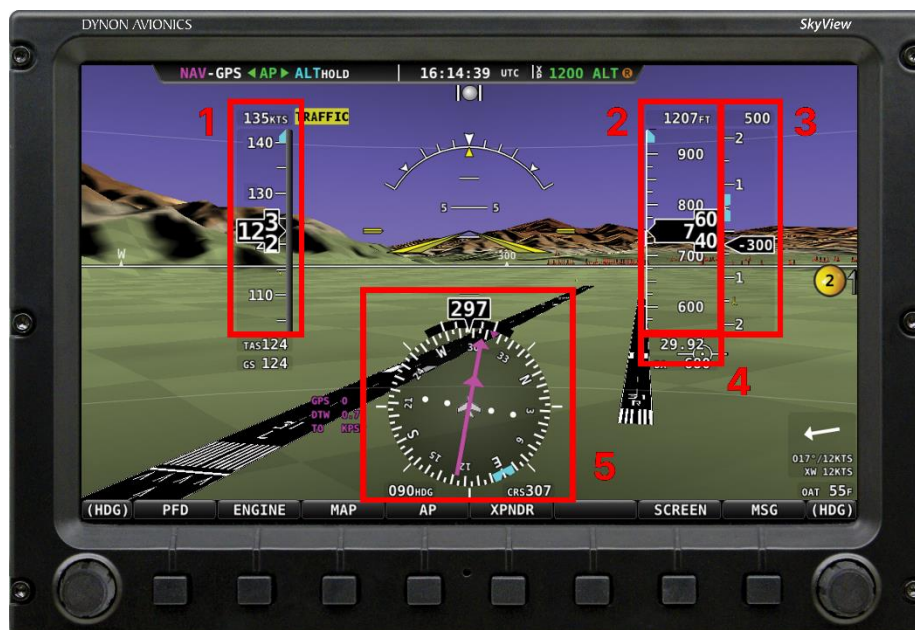


Figure 3-1: Exemple d'un PFD. (1) IAS; (2) ALT; (3) VS; (4) Baro; (5) HDG.

En général, les avions peuvent être pilotés de deux manières : manuellement ou avec l'autopilote, c'est-à-dire manœuvré sans commandes de l'équipage selon des valeurs de vol prédéfinies. Sans entrer dans les détails, l'autopilote fonctionne par mode : certains s'occupent uniquement de conserver l'appareil vers le bon cap (modes horizontaux), alors que d'autres permettent d'effectuer automatiquement des montées et des descentes (modes verticaux). Pour ce faire, le pilote doit d'abord prédéfinir les données dans le PFD, puis actionner le mode désiré. Remarquons, dans la Figure 3-1, les valeurs affichées en blanc sur fond noir : elles représentent l'état actuel de l'appareil. Pour entrer les données de l'autopilote, l'équipage doit plutôt modifier la valeur qui se trouve au-dessus des rubans pour IAS, ALT et VS (p.ex. 500 ft dans la zone 3 de la Figure 3-1) ou sous la boussole de HDG. Ce sont ces quatre nombres qui doivent être entrés pour configurer l'autopilote.

À la base, l'expérience devait simuler l'ensemble de ce processus : la sélection de la valeur à modifier, l'entrée de la donnée, puis l'activation du mode d'autopilote. Cependant, il a été déterminé que seules les deux premières parties seraient incluses dans l'expérience. Bien que les modes permettent de répliquer parfaitement la tâche des pilotes, ils ajoutent aussi de la complexité au processus et seuls les résultats sur l'entrée de données étaient réellement importants. Dans l'expérience, les participants devaient donc simplement choisir le bon champ de la donnée à entrer

(ALT, IAS, VS, HDG, Baro), entrer la valeur appropriée comme demandé dans l'énoncé de chaque tâche et confirmer la valeur.

Pour ajouter au réalisme de l'expérience, il a été déterminé que les participants devraient également réaliser une tâche de suivi en parallèle à l'entrée de données dans le PFD. En effet, les participants devaient contrôler un curseur avec un joystick pour suivre une cible au milieu du PFD, dans l'espace habituellement réservé au FD. Cette méthode de la double tâche a eu pour effet d'augmenter la charge mentale des participants et nous a permis de récolter des données sur le niveau de concentration requis par chaque dispositif durant l'expérience. Puisque cette tâche représente bien le pilotage manuel d'un avion, elle ajoutait donc un réalisme supplémentaire à l'expérience tout en enrichissant les résultats.

Une fois la structure de l'expérience déterminée, l'étape suivante a été d'élaborer l'interface visuelle avec laquelle les participants ont interagi.

3.2 Conception de l'interface de tests

Le maquettage de l'interface a été effectué sur le logiciel Figma. Les dimensions de l'affichage ont été basées sur celles de l'écran tactile utilisé chez CMC Électronique, soit un *large area display* (LAD) de marque Intellisense⁶. Il s'agit d'un moniteur de 8 pouces de haut sur 20 pouces de large (1024 x 2560 pixels), destiné à l'aviation. La résolution de l'écran a servi de points de repère pour la réalisation de l'interface de notre expérience.

Ce genre d'écran très large se prête très bien à la conception d'une interface divisée en trois fenêtres disposées côte à côte, et dans les maquettes déjà préparées par CMC, le PFD occupait la fenêtre du centre. Cela s'explique par le fait que le PFD est, comme son nom l'indique, l'écran principal de pilotage de l'avion et gagne donc à être le plus au centre du champ de vision du pilote. Nous avons donc répliqué cette caractéristique dans notre interface. Il reste donc deux parties inutilisées à l'interface – une de chaque côté du PFD – pouvant être utilisées pour le reste des informations à communiquer aux participants. La partie de gauche est restée inutilisée, alors que la partie de droite

⁶ <https://www.intellisenseinc.com/products/rugged-displays/large-area-display-20-x-8/>

a servi à présenter l'énoncé textuel de la tâche aux participants, ainsi qu'à l'élaboration de certains dispositifs tactiles (voir section 3.5).



Figure 3-2: Interface graphique expérimentale.

Il a également été nécessaire d'imaginer l'aspect visuel de la tâche de suivi. Dans sa plus simple expression, elle se définit comme un curseur, contrôlé par l'utilisateur, devant suivre le mouvement d'une cible. Sur les PFD actuels, on retrouve déjà ce concept de curseur/cible : en effet, c'est là le rôle du *flight director*. Dans la Figure 3-1, on a vu qu'il prenait la forme de deux triangles jaunes pour identifier la position actuelle de l'avion. Si l'autopilote était activé, on verrait aussi une autre paire de triangles, ceux-là de couleur magenta, représentant la position devant atteindre l'avion pour suivre les contraintes de l'autopilote. Notre première idée a donc été de reproduire exactement le visuel du FD, avec les triangles jaunes comme curseur et les triangles magenta comme cible, tel qu'illustré à la Figure . Après réflexion, nous avons choisi de simplifier son design comme présenté dans la section de droite de la même figure. En effet, la manière dont les deux paires de triangles s'emboîtaient ne permettait pas une compréhension simple et rapide de la précision du suivi. L'utilisation d'une boîte comme cible et d'une croix comme curseur rendait la chose beaucoup plus aisée : si la croix est dans la boîte, le suivi est adéquat. Il s'agit d'une représentation très simple d'un suivi, ce qui convient également mieux au contexte de l'expérience puisque les participants n'étaient pas des pilotes habitués à la représentation habituelle du FD.

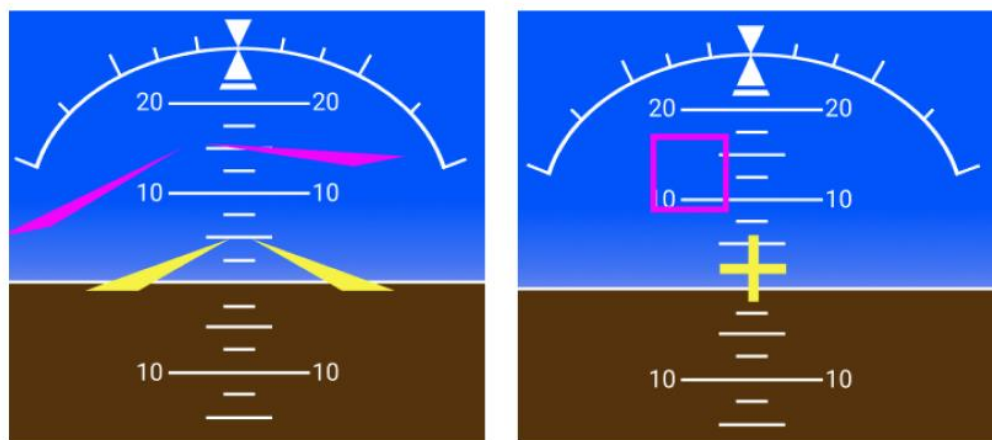


Figure 3-3: À gauche, la première version visuelle de la tâche de suivi. À droite, la version finale.

Finalement, il fallait concevoir l'aspect visuel des champs de valeur du PFD selon leur état : inactif, en surbrillance, en édition. Un champ inactif représente son état de base, tel qu'il est affiché initialement sur le PFD. Un champ est en surbrillance si le curseur de navigation (à ne pas confondre avec le curseur de la tâche de suivi) est posé sur celui-ci. Un champ est en édition lorsque l'utilisateur peut y modifier la valeur indiquée. La Figure montre la représentation visuelle choisie pour les trois états, et les flèches indiquent les passages acceptés entre les états.

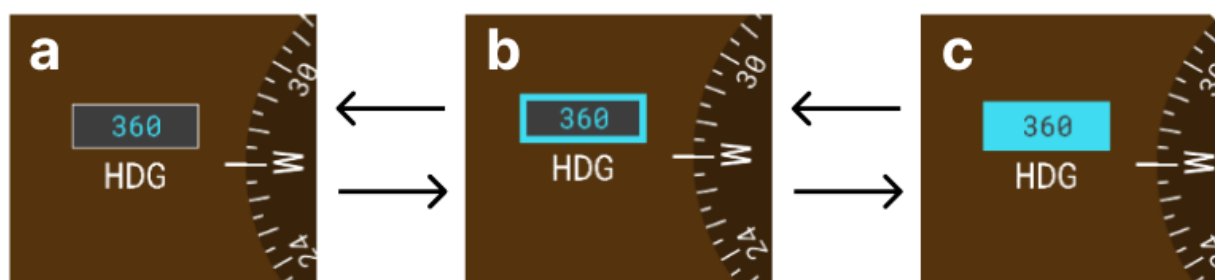


Figure 3-4: Les trois états des champs du PFD et leur représentation visuelle. (a) Inactif; (b) En surbrillance; (c) En édition.

3.3 Programmation de l'environnement de test

Pour l'implémentation de la plateforme de test, nous avons choisi le moteur de jeu Unity puisqu'il permet de créer facilement des interfaces 2D interactives et que les périphériques de jeu (comme les joysticks) peuvent y être intégrés nativement.

Comme toute application du genre, l'application finale comprenait deux parties : une interface usager (*user interface*; UI) et une série de fichiers *back-end* qui s'occupaient de la logique d'affichage. Les deux sont liées à travers des scènes Unity (une pour chaque dispositif), qui contiennent chacune les éléments de l'interface associés et les scripts nécessaires à son fonctionnement.

Pour le UI, il a été implémenté principalement à l'aide d'images produites sur le logiciel de conception Figma. Par exemple, les rubans du PFD sont en fait de très longues images auxquelles on fait subir des translations sur l'axe y. Les éléments de la tâche de suivi, l'arrière-plan du PFD, les encadrés de surbrillance des champs, le UI des dispositifs tactiles (discutés dans la section suivante) : tous ces éléments sont des images dont l'affichage et le mouvement sont gérés par le *back-end*. L'autre élément de l'interface était le texte, ajouté à l'aide de la composante de base de Unity.

Côté back-end, le cœur de l'application était un script principal appelé Global. Il relie, d'un côté, les scripts qui s'occupent de manipuler les éléments du UI selon les entrées de l'utilisateur, et de l'autre, les gestionnaires de la logique de fonctionnement de chaque dispositif. Ces derniers scripts effectuent les actions appropriées selon les actions de l'utilisateur, qu'elles soient mécaniques (tourner un bouton rotatif, cliquer sur un bouton de joystick, etc.) ou tactiles (clic sur un élément du PFD, déplacement du curseur du bouton-glissoir, etc.). De plus, c'est le script Global qui interagit avec le script de gestion de tâches pour en afficher l'énoncé et vérifier les conditions de succès. Pour sa part, le script de la tâche de suivi opérait indépendamment du reste du code.

À elles seules, ces différentes parties forment une application fonctionnelle. Mais puisqu'il s'agit d'une expérience devant fournir des données quantitatives précises, tous les scripts exportaient ponctuellement des valeurs au script de gestion des données. Celui-ci enregistrerait les valeurs pour chaque tâche, lesquelles étaient écrites dans un fichier csv lors de sa réussite.

Les formulaires présentés aux participants durant l'expérience ont également été réalisés sur Unity (voir la Figure pour le formulaire du NASA-TLX). Les participants devaient y déplacer des boutons-glissoir pour choisir leurs réponses, lesquelles étaient ensuite inscrites dans un fichier csv.

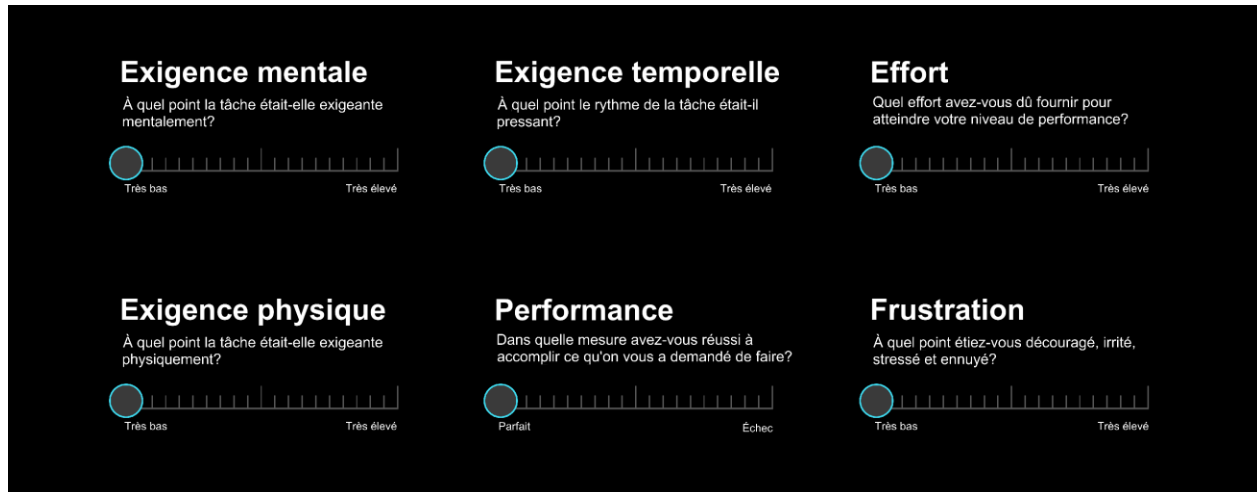


Figure 3-5: Transposition du formulaire NASA-TLX sur Unity

3.4 Choix des dispositifs à tester

L'énoncé de stage de CMC Électronique faisait mention de 5 dispositifs à tester :

- Bouton rotatif fixé sur l'écran
- Bouton rotatif sur un piédestal
- Joystick
- Commandes sur l'écran tactile colocalisées avec les instruments du PFD
- Commandes sur l'écran tactile groupées sur un panneau virtuel

Les trois premiers dispositifs de cette liste, soit les trois dispositifs mécaniques, ont été sélectionnés tels quels pour notre expérience. Les détails de l'interaction avec chacun d'eux seront expliqués dans la section 3.5. Cependant, l'énoncé était volontairement vague sur les dispositifs tactiles pour nous laisser le choix de définir et développer ceux qui nous semblaient pertinents. Ceux-ci seront décrits en profondeur dans la section 3.6.

Puisque l'article le plus récent sur le sujet [22] a déterminé que le clavier numérique était le dispositif tactile le plus rapide pour les tâches d'entrées de données numériques, il s'agissait d'une décision toute naturelle de le sélectionner pour notre expérience. Nous avons également choisi de l'inclure à la fois comme dispositif colocalisé sur le PFD et comme dispositif placé en retrait sur un panneau virtuel. Puisqu'il s'agit exactement du même clavier dans les deux positions, cela nous a permis d'obtenir des résultats spécifiques sur les différences de performance humaine entre les deux paradigmes de conception (colocalisation et groupement).

Nous avons choisi d'évaluer un autre dispositif dans chacune de ces catégories de dispositifs tactiles. Pour les commandes colocalisées, nous nous sommes posé une question : est-ce possible de créer une manière d'interagir avec le PFD sans ajouter aucun élément visuel (bouton, clavier, etc.) à l'interface? Nous avons donc conçu une interface 100% invisible, permettant de modifier les valeurs du PFD en manipulant directement les rubans et la boussole déjà présents à l'aide de gestes utilisés couramment présents dans les interactions tactiles : le *tapement* (simple toucher de l'écran), le *glissement* (poser son doigt sur un élément de l'interface et le déplacer en glissant le doigt) et le *balayage* (un mouvement de glissement rapide dans une direction avec précision, par exemple pour faire dérouler rapidement une liste ou une page web).

Et puisque ce dispositif utilise des gestes pour manipuler l'écran tactile, nous avons choisi un dispositif similaire à tester dans un panneau virtuel, soit le classique bouton-glisseur.

3.4.1 Hypothèses

Une fois que nous avons choisi les dispositifs à évaluer dans le cadre de notre expérience, il était possible de formuler des hypothèses basées sur nos recherches de la littérature du domaine. Quatre hypothèses distinctes ont été établies :

- *H1 : Les claviers numériques permettront l'entrée de données la plus rapide, et ce, peu importe la distance entre la valeur initiale et la valeur cible.* À travers la littérature, on retrouve un consensus sur la rapidité de l'écran tactile par rapport aux divers dispositifs mécaniques [4], [6], [7], [18], [22], [29]. Pour l'entrée de données plus particulièrement, l'étude de Wynne et al. [22], dont la méthodologie s'apparente à la nôtre, a trouvé le clavier numérique virtuel significativement plus rapide que les boutons rotatifs et les autres dispositifs tactiles. En effet, il permet une entrée de temps constant puisque l'écart entre la

valeur initiale et la valeur cible n'a pas d'influence sur le nombre de gestes à effectuer pour entrer la valeur, contrairement à d'autres dispositifs. Ces résultats sont aussi supportés par van Zon et al. [45] qui, à l'aide d'une modélisation de tâches selon la loi de Fitts [17], ont conclu qu'un clavier physique permettait une entrée de données à un débit plus élevé qu'un bouton rotatif et qu'une sélection de cibles aléatoires sur écran tactile. Même si nous utiliserons plutôt un clavier virtuel, ses avantages (structure, touches de taille égale) devraient se transposer puisque la littérature tend à indiquer que les claviers physiques et virtuels ne présentent pas de différences de performance significatives [21], [40].

- *H2 : Les dispositifs sur l'écran tactile, et plus particulièrement les claviers numériques, auront un taux d'erreur plus élevé, alors que ceux basés sur des mouvements de glissement mèneront à davantage de dépassements de la valeur cible. L'effet négatif des vibrations sur le taux d'erreur des écrans tactiles est bien documenté, et ce, pour différents types de tâches et profils de vibration [4], [6], [29], [31]. La grande liberté de mouvements et le manque de sensations physiques, couplés à l'ajout de mouvements parasites au bras de l'utilisateur, semblent mener systématiquement à une précision plus faible comparativement aux dispositifs physiques. Ces problèmes se répercutent à un degré encore plus élevé sur les mécanismes d'interaction tactiles basés sur le glissement [18], [22], [35] : les dépassements de la valeur cible devraient donc être plus fréquents pour ceux-ci. D'autre part, en regardant la taille des différents éléments interactifs qui composent les dispositifs tactiles, on peut supposer que les claviers numériques seront désavantagés. Puisqu'ils sont composés de touches plus petites que les boutons des manipulations directes et du bouton-glisseur, les participants devront faire un compromis entre la vitesse et la précision, tel que décrit par la loi de Fitts [17].*
- *H3 : Les dispositifs mécaniques engendreront un inconfort plus faible, mais une charge mentale plus élevée que les dispositifs tactiles. Puisqu'il nécessite une extension du bras et qu'il ne comporte pas de support dédié, l'écran tactile est le plus souvent caractérisé comme moins confortable à utiliser que les dispositifs mécaniques [7], [29], [33]. La charge mentale, quant à elle, semble être très dépendante de l'implémentation fonctionnelle du dispositif et de sa cohérence avec la tâche. Parfois, un dispositif tactile peut mener à plus de frustration [6], mais il peut aussi être globalement moins exigeant mentalement qu'un*

dispositif mécanique s'il est bien implémenté. Cela semble être le cas du clavier numérique virtuel pour l'entrée de données numériques [22], ce qui explique notre hypothèse.

- *H4 : La précision de la tâche de suivi sera plus faible pour les dispositifs tactiles placés dans un panneau virtuel.* En raison de la distance entre le panneau virtuel et le centre de l'écran de vol, les participants devraient regarder moins fréquemment la tâche de suivi. Ainsi, nous pensons qu'une attention moins soutenue mènera à une précision plus faible.

3.5 Conception des dispositifs mécaniques

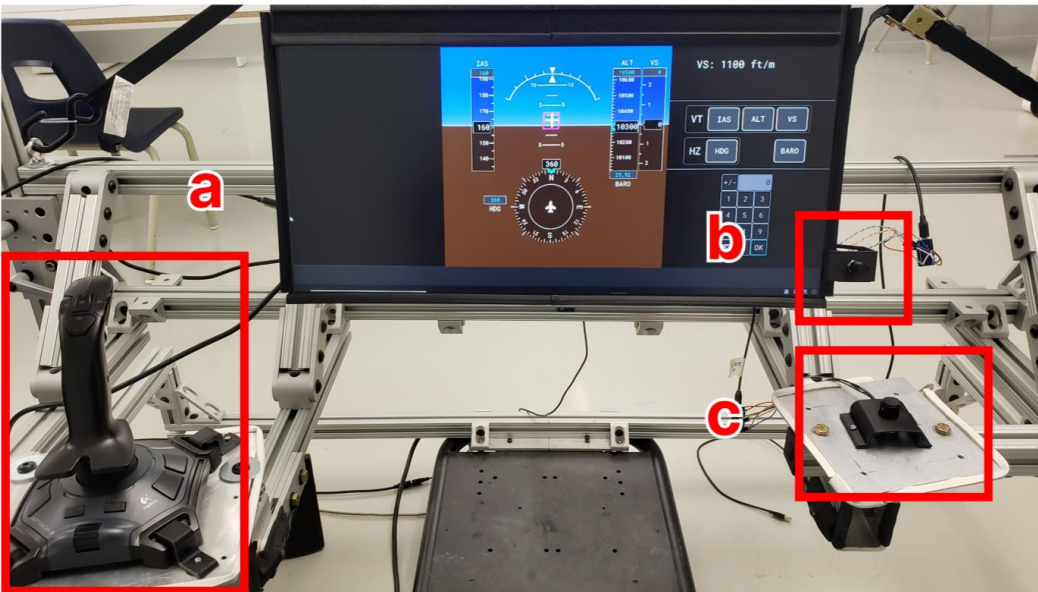


Figure 3-6: Dispositifs mécaniques utilisés dans l'expérience. (a) Joystick; (b) Bouton rotatif fixé à l'écran; (c) Bouton rotatif sur un piédestal.

3.5.1 Boutons rotatifs

Nous avons choisi d'utiliser des microcontrôleurs Arduino (plus précisément, des Arduino Leonardo) pour faire le lien avec le système d'exploitation des ordinateurs de l'expérience. En effet, l'utilisation d'une librairie dédiée⁷ a permis de transformer le microcontrôleur en

⁷ <https://github.com/MHeironimus/ArduinoJoystickLibrary/tree/version-2.0>

périphérique HID (*Human Interface Device*) utilisable comme contrôleur de jeux sur tous les systèmes d'exploitation. À ce sujet, nous avons rencontré un problème de délai (*lag*) entre l'activation d'une commande physique et sa reconnaissance sur Windows. La solution toute simple aura été de désactiver le plus de périphériques HID non utilisés.

Au début du projet, comme mentionné plus haut, nous pensions inclure le changement entre les modes d'autopilote dans l'expérience. Nous pensions donc fixer des boutons sur le côté de l'écran pour émuler le design du LAD, et les utiliser pour effectuer les changements de mode. À cet effet, Alexandre Ferreira Benevides, alors directeur du LESIAQ, avait conçu un système de rails (voir Figure) sur lesquels pouvaient glisser des supports à boutons imprimés en 3D (voir Figure).



Figure 3-7: Système de rails (noirs, sur le contour de l'écran) permettant de fixer des boutons physiques à l'écran

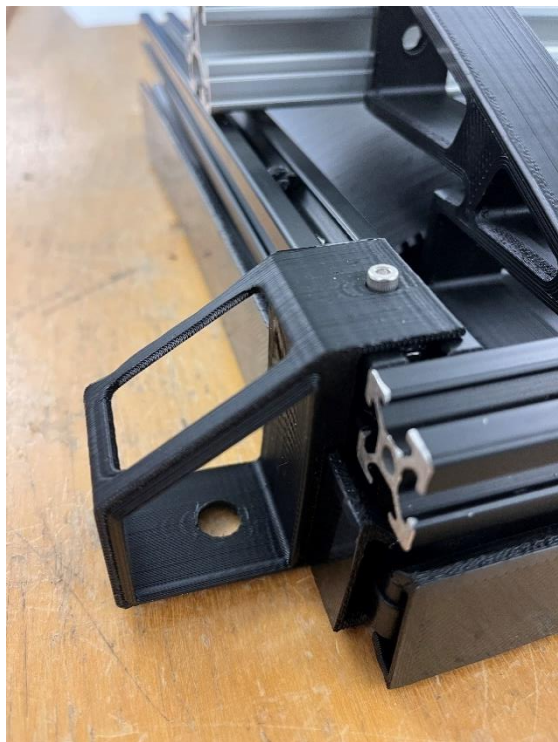


Figure 3-8: Pièce imprimée en 3D pour fixer un bouton rotatif à l'écran tactile

Tout ce système a bel et bien été construit, mais finalement seul le bouton rotatif y a été installé pour le dispositif « bouton rotatif fixé sur l'écran ».

Pour le bouton rotatif sur piédestal, nous avons utilisé une autre pièce en impression 3D pour le couvrir et le fixer au piédestal (voir Figure).

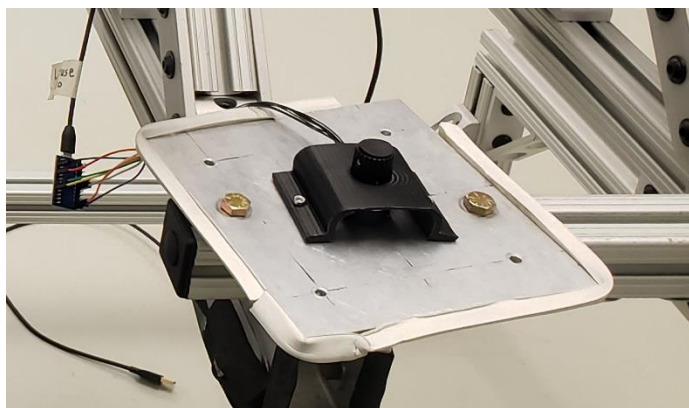


Figure 3-9: Pièce imprimée en 3D pour fixer un bouton rotatif à un piédestal

3.5.2 Joystick

Le choix du joystick reposait principalement sur son ergonomie physique : puisque les participants au test devaient le manipuler avec leur main gauche, le joystick devait nécessairement permettre la prise avec cette main. Parmi les joysticks à notre disposition, c'est le Logitech Attack 3 qui répondait à ce critère.



Figure 3-10: Joystick Logitech Attack 3.

Étant donné que, contrairement aux boutons rotatifs, les joysticks n'ont pas de nombre ou de disposition de boutons standard, la conception des interactions pour entrer les valeurs dans le PFD dépendait du modèle que nous avions. Alors que certains joysticks de plus grande qualité incluent un bouton rotatif, le nôtre ne disposait que d'une gâchette et de quatre boutons sur le haut du manche.

Pour parcourir les champs du PFD, les quatre boutons du manche se prêtaient bien à une navigation 2D, c'est-à-dire que chaque bouton correspondait à une direction (haut-bas-gauche-droite) et déplaçait le curseur en surbrillance d'un champ à l'autre. Une fois sur le bon champ, la gâchette faisait office de bouton de sélection et permettait d'entrer en mode édition. Les boutons servaient alors à modifier la valeur du champ, avec les boutons « haut » et « droite » pour l'augmenter et les boutons « bas » et « gauche » pour la réduire. Pour accélérer l'entrée de données, il était également

possible de maintenir un bouton appuyé pour faire défiler rapidement les valeurs à la mesure d'environ 3 incréments par seconde. La valeur devait ensuite être confirmée avec la gâchette.

Autre différence avec les boutons rotatifs, le joystick était reconnu nativement par le système d'exploitation et n'avait donc pas à être configuré pour être utilisable.

3.6 Conception des dispositifs tactiles

3.6.1 Bouton-glissoir



Figure 3-11: Interface graphique du dispositif tactile basé sur le bouton-glissoir.

L'élaboration du bouton-glissoir de même que son implémentation technique ont été assez simples puisqu'il s'agit d'un dispositif déjà bien établi dans l'univers des interactions humain-ordinateur. La seule décision importante aura été d'inclure des boutons d'incrément à chaque bout du ruban pour compenser la difficulté à être précis dans un environnement vibrant.

3.6.2 Manipulations directes

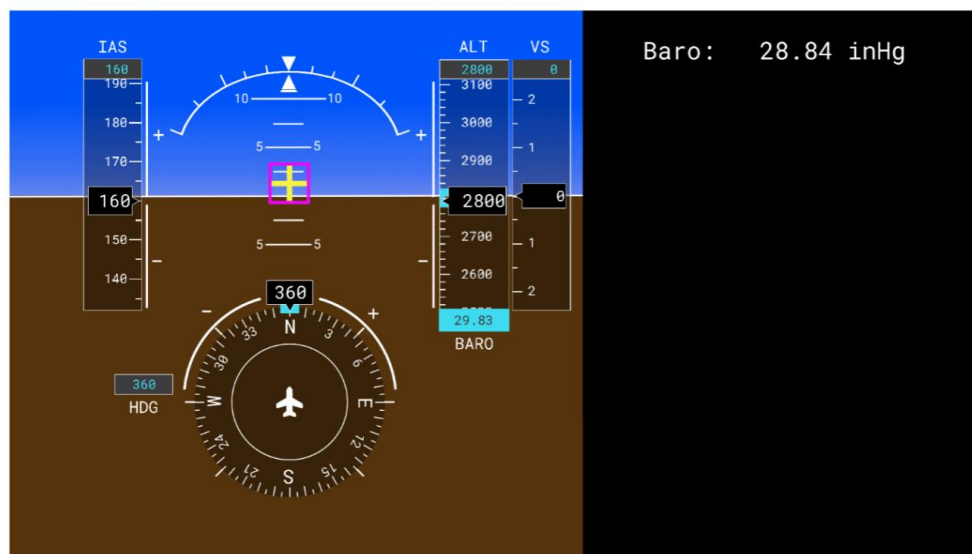


Figure 3-12: Interface graphique du dispositif tactile basé sur les manipulations directes.

Inversement, les manipulations directes étaient un essai de créer une méthode d'interaction complètement nouvelle. Le désir d'utiliser uniquement les éléments à l'écran posait des limites claires à la conception. Dans ce sens, malgré la nouveauté du concept, l'utilisation d'un mouvement de glissement vertical pour déplacer les rubans et angulaire pour bouger la boussole se sont imposés tout naturellement puisqu'ils permettaient de reproduire leurs mouvements selon leur degré de liberté naturel. Pour le calage altimétrique, qui n'est présent que sous la forme d'une boîte avec sa valeur, il a fallu user d'un peu plus de créativité. En partant du concept que le calage altimétrique sert de calibration au ruban d'altitude et que les deux valeurs sont donc liées par une formule mathématique, nous avons réalisé qu'il était possible de modifier le calage altimétrique en changeant l'altitude.

$$\text{nouveau Baro} = \frac{\text{nouvelle ALT} - \text{ALT courante}}{1200} + \text{Baro courant}$$

Ainsi, pour changer Baro, les utilisateurs devaient tout d'abord cliquer sur son affichage sur le PFD, puis effectuer un geste de défilement sur le ruban ALT. Le changement d'altitude avait donc pour effet de changer le calage altimétrique selon la formule définie. Une fois la bonne valeur

atteinte, les usagers devaient re cliquer sur la valeur du Baro, et ce mécanisme de confirmation était le même pour tous les autres champs.

Somme toute, la réalisation conceptuelle de ce dispositif n'a pas causé trop de difficulté, mais sa réalisation technique aura été plus compliquée, principalement pour les rubans ALT et IAS. Puisque les gestes sur l'écran tactile n'étaient interprétés que comme des mouvements de souris par Unity, il n'était pas possible d'utiliser les éléments de type Scroll View, ce qui nous a poussés à créer notre propre système de défilement. En définissant le comportement voulu de chaque élément lorsque l'utilisateur y dépose, maintient ou lève son doigt, nous avons pu arriver à ce qui pourrait être fait automatiquement avec un composant par défaut. En testant avec une souris, les tapements et les glissements à basse vitesse sont bien reconnus. Même les balayages produisent le résultat escompté. Mais sur l'écran tactile, ces derniers étaient reconnus de manière erratique et nécessitaient de faire des mouvements exagérés qui n'étaient pas naturels pour fonctionner. Les tentatives de modifier le code pour améliorer la réactivité des gestes ont légèrement rectifié la situation, mais le résultat n'est tout de même pas à la hauteur du défilement présent sur les téléphones intelligents.

3.6.3 Claviers numériques

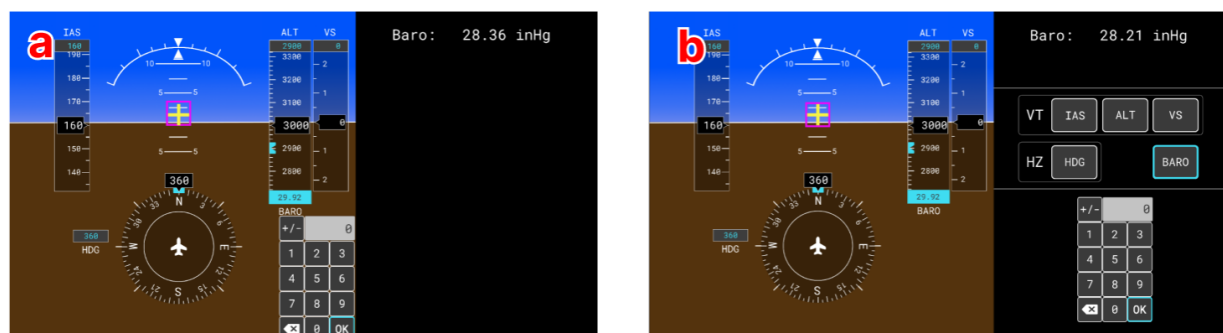


Figure 3-13: Interfaces graphiques des dispositifs tactiles basés sur les claviers numériques.

Les claviers numériques sont loin d'être un nouveau dispositif d'entrée de données, mais les contraintes de conception sur l'écran tactile nous ont poussés à les repenser légèrement. Voici la liste des contraintes à satisfaire :

- Contenir un affichage de la valeur ainsi que 13 touches : 10 touches chiffrées (0-9), une touche de suppression du dernier chiffre, une touche de confirmation de valeur, une touche pour inverser le signe de la valeur.
- Conserver une disposition de touches logique, similaire au pavé de téléphones ou de claviers d'ordinateur.
- Posséder des touches ayant une taille minimale de 0.6 pouce de côté, selon le MIL-STD-1472 [46].
- Être contenu dans l'espace sous les rubans ALT et VS, à droite de la boussole du HDG.

Pour respecter la taille minimale des touches et l'espace disponible, nous avons le choix entre une disposition en grille de 4 colonnes par 4 lignes (13 touches + 3 cases pour l'affichage de la valeur) et une autre de 3 colonnes par 5 lignes (13 touches + 2 cases pour l'affichage de la valeur). Pour respecter le standard de disposition des touches chiffrées, nous avons préféré la deuxième option. De part et d'autre de la touche « 0 » sur la dernière rangée ont été placées la touche de suppression et celle de confirmation de valeur, où seraient normalement le « * » et le « # » pour un téléphone. Le bouton d'inversion de signe a été placé sur la première ligne à gauche de l'affichage de la valeur. Le design final est cohérent avec le modèle mental des potentiels utilisateurs, qui n'ont qu'à apprendre rapidement le placement des touches de fonction (inversion de signe, suppression, validation), tout en respectant les contraintes de tailles de touches et d'espace sur l'interface (voir Figure).

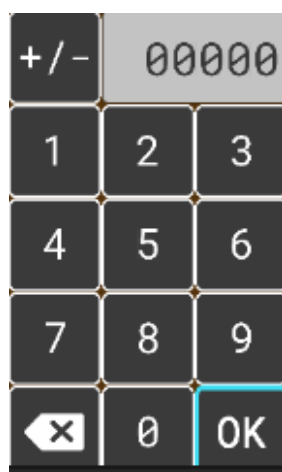


Figure 3-14: Disposition des touches du clavier

D'autre part, afin de compenser le manque de retour haptique, nous avons ajouté un retour audio (un léger clic) à chaque fois qu'une touche du clavier était appuyée. Ainsi, les utilisateurs pouvaient savoir plus facilement si leur touche du clavier avait bien fonctionné (il s'agit d'une solution proposée par Kaminani [12]).

CHAPITRE 4 ARTICLE 1: MECHANICAL DEVICE OR TOUCHSCREEN WIDGET: THE EFFECTS OF INPUT DEVICE AND TASK SIZE ON DATA ENTRY ON THE PRIMARY FLIGHT DISPLAY

Cet article a été soumis à la revue *International Journal of Human-Computer Interaction* le 6 mars 2023.

Auteurs

Charles-Antoine Lanoix, Srishti Rawal, Philippe Doyon-Poulin

Abstract

Due to their customizability and low weight, touchscreens continue to advance as a device of choice when designing aircraft cockpits. Previous research studies investigated the effect of turbulence on human performance when using touchscreens, but few have evaluated its performance for realistic aviation-specific tasks. In this study, we compared four touchscreen widgets and three mechanical devices during realistic data input on a primary flight display (PFD). Twenty participants took part in the experiment at a constant level of vibration, while simultaneously completing a secondary tracking task. We found a faster completion time with the rotary knobs when the target value is close to the initial value, while a larger distance benefited the virtual keypads speed-wise. Error rates were overall very low. A positive relationship was found between completion time, workload, comfort, and usability. Eye tracking data also suggested that touchscreen widgets placed outside the PFD lead to diminished attention towards the tracking task.

Keywords

human-computer interaction, input device, vibration, aviation, touch interaction

4.1 Introduction

Touchscreens have been part of the landscape in human-computer interactions for a long time [16], but their arrival in mainstream products since the turn of the century has renewed the interest of integrating them to more safety-critical contexts such as cars [47] and airplanes [48]. They are found in cell phones and tablets, of course, but also in printers and refrigerators [8], [49]. Aircraft manufacturers followed suit and started to migrate from legacy buttons and knobs to touchscreens. In fact, this trend can be seen in all aviation sectors: major industry players already designed or integrated touchscreens into their product line for either recreational [13], commercial [14] or military [15] purpose.

Despite their popularity, touchscreens have not been considered perfect devices in many aspects. Compared to conventional selection devices such as the mouse or trackball, they suffer from high error rates when targets get smaller than 25 mm or when there is vibration [4], [6], [18]. Furthermore, for the same button size, physical buttons are selected more accurately than virtual buttons [5]. The distance of the screen from the body can also lead to more physical fatigue since the arm must remain extended for a long period of time [7], [29], which is particularly relevant for fixed touchscreens in the cockpit.

On the flip side, their greatest strength is the ability to interact directly with the content presented on the screen. By removing the intermediary (i.e., mouse, physical button, etc.), the intuitiveness and learnability of the systems are greatly improved [9]. Touchscreens are faster than other mechanical devices for target selection [4], [7], [33], data entry [6], [22] and drag-and-drop movements [18], even when there is turbulence. It should be noted, however, that this advantage does not translate to tasks requiring continuous and precise adjustment [10]. For avionics manufacturers, touchscreens offer an opportunity to replace various controls and indicators by a single screen, which optimizes cockpit real estate and reduces weight as both are crucial constraints [12]. Large touchscreens, though taking up more space, are less cluttered and more customizable interfaces [11].

Still, the integration of touchscreen-based interfaces into an environment, whether for an all-new interface or as a replacement of mechanical devices, should not be taken lightly. According to Orphanides and Nam [1], for the transition to be successful the authors identified three specific dimensions to consider. First, the choice of touchscreen technology must be appropriate for the

task. Secondly, the implementation environment must be considered to ensure that the interface is designed to work well in it. Third, touch interfaces must be designed according to the profile of the users who will use them. While all three pertain to design for aviation, the one most frequently evaluated in research is the impact of the environment.

In the cockpit, the biggest environmental constraint is the presence of vibrations. These can take the form of turbulence (meteorological phenomenon) or vibrations induced by the rotation of propellers, for example in a helicopter (mechanical phenomenon). Furthermore, it is anticipated that climate change will lead to an increase in turbulence in the coming decades [2], which makes vibration all the more important to consider in the design of cockpits. The fixed position of the pilots and screens, the presence of other mechanical controls, and the display brightness are other environmental factors that need to be considered.

4.1.1 Touchscreens under vibration

Several recent studies have investigated the effect of vibration on the performance of touchscreens compared to other data input devices. Cockburn et al. [6] tested the touchscreen and trackball for target selection tasks, among others, at several vibration levels. It was performed at two target sizes (0.8 cm and 1.6 cm). Similarly, Wang et al. [18] performed an experiment with the same design (device \times vibration \times target size) for touchscreen, mouse, trackball, and remote hand controller. The results of the two papers partially overlap, as the touchscreen - and the mouse in Wang et al. [18] - was superior to the trackball in completion regardless of vibration. Both also show an effect of vibration on error rate, the touchscreen leading to more errors during vibration conditions than the mouse and trackball. However, the papers differ in workload results as Cockburn et al. [6] report higher frustration for the touchscreen, while Wang et al. [18] instead found higher mental load and lower frustration for the touchscreen and mouse. This could be explained by the potentially lower vibration levels in the Wang et al. [18] experiment: they are not quantified, but the variations in completion time from one vibration level to the next are much smaller than for Cockburn et al [6].

The most comprehensive study in the field of numerical value input is the one from Wynne et al. [22]. In this paper, they investigated how touchscreens and rotary dials compare in inputting random three-digit values. Seven touchscreen widgets were designed for the experiment, some of them based on simple tap gestures (keypad, arrow keys for each digit), others using “tap-and-hold”

(arrow keys for whole value), drag (sliders, clockface) or swipe (swipe bars) gestures. They evaluated performance at four vibration levels (static, light chop, light turbulence, moderate turbulence), and 26 participants took part in the experiment. They found the keypad to be the fastest of all devices across all turbulence conditions, with arrow keys also being faster than the rotary knob. Widgets based on drag or swipe performed either similarly or worse than the dial, and turbulence increase exacerbated the difference in completion time. The single tap devices, and particularly the keypad, also got higher workload and usability scores, which makes them the best-suited devices for the task, according to the authors. If another type of gesture was to be used, their data suggests prioritizing drag over swipe as accuracy was lower for the latter. Based on Jeong and Liu [50], they hypothesized that the lighter movement of the swipe is more impacted by vibration while drag is more robust due to constant and deliberate contact with the screen.

4.1.2 Evaluation of realistic aviation tasks

The main gap that emerges from the literature is the low amount of research that evaluated data input devices using realistic tasks related to the end-use context, a finding shared by Wynne et al [22]. Studies by Salmon et al. [30] and Goode et al. [31] that focused on the use of touchscreens in military vehicles are good examples of experiments where the tasks accurately represent the actions that users will need to perform in a real-world context. In aviation, such studies do not exist. Most are limited to experimental tasks such as target selection [20], [24], [35]. Those that focused on numerical data entry tested the input of random numbers that did not reflect the limitations of airspace parameters such as airspeed or heading [6], [22], [43]. Avsar et al. [21], Alapetite et al. [51] and Rouwhorst et al. [44] did propose new touchscreen-based interfaces to replace traditional mechanical devices, but neither included vibration level in their experimental design.

Yet, the implementation of the device interaction as well as its coherence with the task to be performed are two primordial factors to consider in the choice of the appropriate device. Consider the paper by Wynne et al. [22] where for a single device, the touchscreen, different implementations resulted in a range of performance variations for a numerical data entry task. Some implementations were superior to the rotary knob, some were equivalent, and some were inferior. Even though simple target selection tasks are useful to get insight into how devices compare in a crude way, it is only when testing the actual task that we can select which one is best in a particular context.

4.1.3 Aim and hypotheses

The objective of this experiment was to evaluate the relative performance of touchscreen widgets versus mechanical devices in a vibrating environment for a realistic input task, i.e., entering digital data into a primary flight display (PFD). A secondary tracking task was administered in parallel to the data entry. In this context, we hypothesized that virtual keypads and rotary knobs would provide the fastest data entry when the target value is closer to the initial value, but that the keypad would be the fastest when the distance between the two values is larger. We also predicted that keypad-based touchscreen widgets would produce more errors given the precision required to press each key, and that drag-based widgets would lead to more overshoots. We expected the workload to be lower and the comfort higher for mechanical rotary dials. Finally, we believed that the precision of the secondary tracking task would be reduced for touch widgets placed on a virtual panel separated from the PFD.

4.2 Method

4.2.1 Participants

20 participants (17 males, 3 females; $M = 25.16$ yrs, $SD = 3.67$) took part in the experiment. We determined that participants did not need to be pilots since the tasks would not require prior knowledge of flying a plane; thus, all but one participant didn't have piloting experience. The participant with piloting experience had a private pilot's license with 200 hours of flight time. Due to the constraints of eye tracking glasses, participants could not wear glasses and needed to have a good vision of a screen at arm's length. People who had back pain or motion sickness were also excluded due to the exposure to vibrations. Both right- and left-handed people were accepted (17 right-handed, 3 left-handed; 15% of left-handed participants) to establish a representative sample of the population and to evaluate the potential effect of handedness on performance. The proportion of left-handed participants in our study is in line with the results of a recent meta-analysis that found that between 9.3% and 18.1% of people could be considered left-handed [52]. Participants had a mean height of 178.24 cm ($SD = 8.85$) and a mean right arm length of 88.14 cm ($SD = 4.29$). They were also asked about their education level and video game experience (beginner, intermediate, expert) in order to make finer analyses of the results. The study was approved by

Polytechnique Montreal Research Ethics Board (CER-2122-55-D) and all participants signed an informed consent form. No financial compensation was given.

4.2.2 Tasks

4.2.2.1 Data entry

The main task that the participants did was the entry of numerical values on a primary flight display (PFD) comprising of five fields: heading (HDG), indicated airspeed (IAS), altitude (ALT), vertical speed (VS), and altimeter setting (BARO). To successfully complete a task, participants had to select the correct field, enter the requested target value and confirm the entry. In case of an erroneous entry, an audio prompt was played and the entry field remained in edition mode until the correct value was entered. Figure illustrates this process.

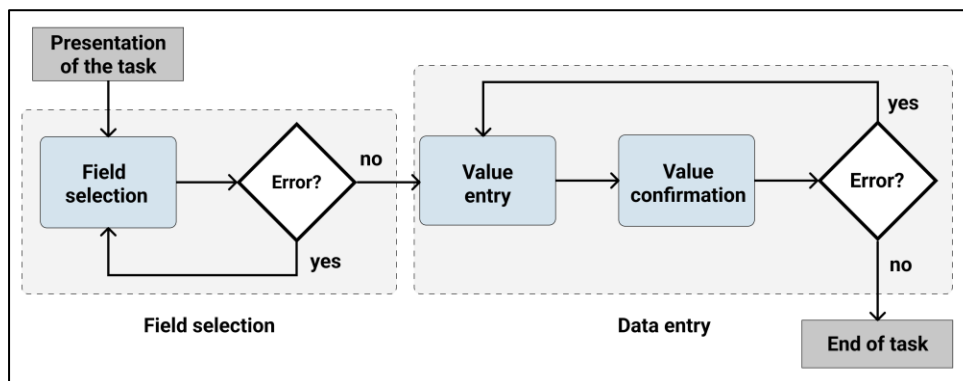


Figure 4-1: Sequence of data entry task completion.

The tasks were categorized according to the distance between the current value and the target value that must be reached to complete it: from this point on, this will be referred to as the size of each task. This helped determine whether certain devices were faster when the change to be made was larger or smaller. For each field, participants had to successfully complete a task involving a large, medium, and small change. Since the fields had different units and range of values, we defined the intervals for each field according to boundaries that reflected a semi-realistic use of an aircraft (see Table).

Table 4-1: Range of values for every task size and field.

Field	Size of task		
	Small	Medium	Large
IAS	1-10 kts	11-75kts	76-100 kts
ALT	1-1000 ft	1001-15000 ft	15001 – 18000 ft
VS	1-500 ft/min	501-1500 ft/min	1501-2000 ft/min
Baro	0.01-0.10 inHg	0.11-1.00 inHg	1.01-1.80 inHg
HDG	1-10 deg	11-160 deg	161-180 deg

4.2.2.2 Tracking task

In parallel to the PFD data entry, participants executed a tracking task using a joystick with their left hand. This task, inspired by the MATB-II software tracking task [53], consisted of using the joystick to move a yellow cross in the middle of the screen to track a purple square moving randomly. The position of the cross and the square were recorded 33 times per second and the distance between the two points was calculated using the root mean square (RMS) formula. During tasks, the distances were averaged to a single measurement for each segment (field selection and data entry). The use of a secondary task was intended to increase the workload felt by the participants, reflecting more realistically the divided attention nature of data entry and flying an aircraft simultaneously. It should be noted that for this reason, the experiment is more akin to flying manually a general aviation or military aircraft, as opposed to commercial aircraft pilots who spend most of their flight time with the assistance of autopilot.

4.2.3 Materials

4.2.3.1 Flight deck rig

To simulate the turbulence of an aircraft cockpit, we used a D-Box haptic seat (model GP Pro 500) producing vibrations with 3 electric motors. The vibration profile was taken from a recording made on board a Bell-412 helicopter during a level flight at 120kt. Most of the acceleration in the profile came from frequencies between 1-30Hz, with a magnitude of 0.715 m/s² (see [20] for details). Note that all experimental trials were done with the vibration active.

A rack made of aluminum rails was attached to the seat, on which could be installed screens and other equipment. A system of straps also allowed the part of the rack holding the screen to be moved vertically in order to adjust it to the height of each participant, as shown in Figure .

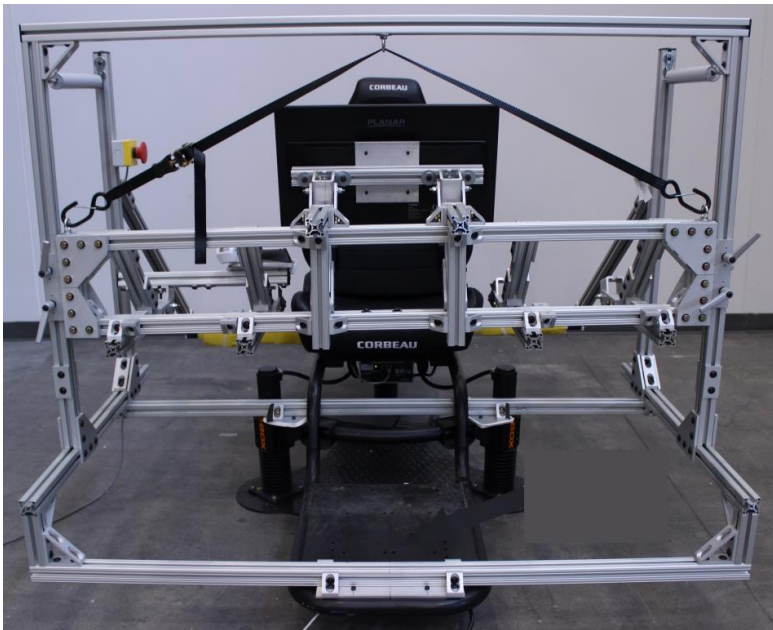


Figure 4-2: Vibrating seat structure.

The screen we used was a Planar PCT2435, a 24" 16:9 capacitive touch screen with a resolution of 1920:1080. It was fixed in front of the participant at an angle of 15° below the vertical. This corresponds to the position of flight instruments on the Main Instrument Panel (MIP) in most aircraft. Figure shows the distances based on the participant's Eye Reference Point (ERP) that ensured a consistent eye-to-screen distance between participants. A Logitech Attack 3 joystick was also secured to the aluminum frame, accessible for use with the left hand. The movement of the stick was used to control the tracking task cursor.

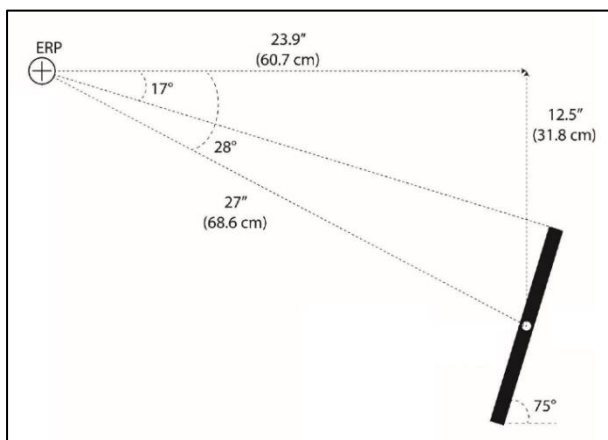


Figure 4-3: Diagram of eye reference point (ERP).

4.2.3.2 Software

An application made with the Unity game engine (version 2020.3.32f1) was designed for the experiment. The screen size used was 8 inches by 20 inches to replicate the exact size of a large area display (LAD; <https://www.intellisenseinc.com/products/rugged-displays/large-area-display-20-x-8/>). Since the Planar display area was larger, only the lower portion of the screen was used and the top portion was covered with a plastic protector, thus ensuring the same display area as the LAD. Visually, the software reproduced a generic PFD with tapes for each value as well as an artificial horizon, in addition to the box and cross of the tracking task. The PFD took up the entire height of the screen (8 inches) and 42% of the width (13 inches). On each side of the PFD was a black space. The task instruction was displayed at the top of the space on the right. As explained in the next part, some devices used the remaining space in the right section. The section on the left was not used. In addition to the visual interface, the software carried out the generation of the tasks, the tracking task, and the data logging.

4.2.3.3 Devices

Seven devices were tested: three mechanical and four touchscreen-based. The following section describes each one. Readers are referred to the video link to see every device in action (<https://youtu.be/VggycbMccgM>), while Figure depicts a static view of each of them.

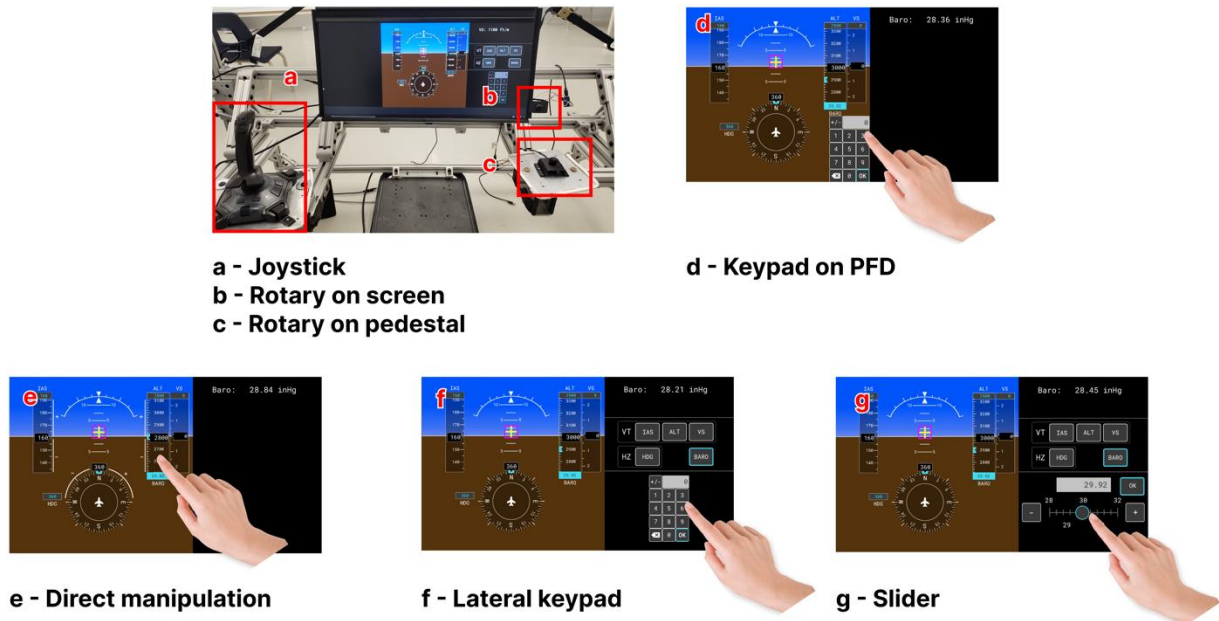


Figure 4-4: Visual displays of devices used for number entry.

4.2.3.3.1 Joystick

The joystick used was the same Logitech joystick as the tracking task. Using the buttons on top of the joystick similarly to arrow keys on a keyboard, participants navigated between the PFD fields and changed their value. The trigger on the back of the joystick allowed them to confirm the selection of the field as well as the value entered.

4.2.3.3.2 Rotary on screen

A Grayhill rotary encoder (62AG22-L5-P) was attached to the lower right side of the screen, perpendicular to its surface, similar to the LAD arrangement mentioned earlier. It had 16 pulses per rotation, a rotational torque of 3.5 ± 1.4 in-oz and a pushbutton with an actuation force of 510 ± 150 gr. The rotation allowed to navigate circularly between the PFD fields as well as to modify the value. At low rotational speed, a pulse allowed to increment or decrement the value by the smallest possible unit e.g., 1 kt. To increase the performance of the rotary, if a pulse was detected less than 0.01 seconds since the last pulse, it produced a larger increment or decrement e.g., 5 kts. In the same way as the joystick, the button integrated in the rotary was used to confirm the field and the value.

4.2.3.3.3 Rotary on pedestal

Another rotary encoder was installed on the right side of the main platform, mirroring the position the joystick, perpendicular to the ground. It was a Grayhill rotary encoder (60A18-4-RAC), 20 pulses per rotation, 2.0 ± 1.0 in-oz of rotational torque, including a pushbutton requiring 400 ± 150 gr of force to activate. In addition to being a button, the shaft could be moved in 4 directions (up-down-left-right) like a small joystick. This differed from the previous rotary in that the shaft was used to navigate between fields instead of the knob rotation. The rotation was still used to change the value, as was the button that confirmed the field and the value.

4.2.3.3.4 Keypad on PFD

The keypad was designed according to the layout of a telephone keypad, with a delete key and a confirmation key on the bottom row. A key to invert the sign of the displayed value was placed next to the readout of the keypad. All keys were square shaped with a 0.6 inch side, the smallest clickable size according to MIL-STD-1472 [54], a recognized standard in cockpit design. For this device, field selection was made by clicking directly on the PFD tape associated with the field whose value needed to be changed. The keypad then appeared in the lower right corner of the PFD to enter the value i.e., co-located.

4.2.3.3.5 Direct manipulation

The name of this device comes from the fact that the participant had to directly manipulate the tapes on the PFD to change their value. That meant scrolling the ALT, VS and IAS tapes to change their values. For the BARO, they had to first click on the BARO readout, then scroll the ALT tape to change the value. For the HDG, the movement was not a scroll, but rather a rotation to change the angle of the associated compass. In all cases, a click on the field readout confirmed the value. In addition to the larger scroll or rotation movement, it was possible to click on the upper (left for HDG) or lower (right for HDG) part of the tape to increment or decrement its value by the smallest possible unit, respectively. The idea of directly manipulating elements of a flight display can be found in a previous experiment by Alapetite et al. [51].

4.2.3.3.6 Side keypad

For this device, the same keypad as 2.3.3.4 was used, but was instead placed in the free space to the right of the PFD. The field selection, instead of being done by clicking on the PFD, was done through buttons located just above the keypad. This design reflected the layout of a dedicated flight mode selector on general aviation aircraft.

4.2.3.3.7 Slider

The slider was positioned in the same way as the side keypad, on the right side of the PFD, under a group of buttons to select the field. The slider could be interacted with in the same way as found on commercial electronics: the participants moved the pointer along a straight line representing the set of possible values. In addition, increment buttons were provided on each side of the slider to edit the value with more precision.

4.2.3.4 Questionnaires

To measure participants' workload after using each device, we used the NASA-TLX questionnaire. It is a well-established subjective method using a multidimensional rating scale [55]. This questionnaire assesses factors related to the nature of the task, i.e., physical demand, mental demand, and temporal demand, and related to the operator, i.e., his or her judgment of his or her performance, the effort required to perform the task, and his or her level of frustration.

The evaluation of the discomfort of the devices was performed using modified Borg CR-10 scales. This scale allows a subjective evaluation of the intensity of an individual's experience [56]. It extends over a range of values between 0 (no sensation) and 10 (maximum sensation), enhanced by a level 11 and a level "as high as possible": these last two levels were, however, removed in the experiment. Decimal values are inserted between whole numbers from 0 to 3 in order to characterize the sensations with more granularity. After each device, participants were asked to indicate the discomfort felt at five points: right shoulder, right arm, right hand and wrist, neck, upper back, and lower back. For the joystick device, discomfort in the left shoulder, arm, and hand were requested instead.

An ad hoc form was designed to evaluate the usability of each device. The first part of the form consisted of 3 Likert scales ranging from 1 to 5. Participants were asked to indicate, for each device, the ease of use to make small changes (very easy to very difficult) and large changes (very easy to very difficult), as well as the perceived speed of completing tasks (very fast to very long). In the

second part, participants listed the features they liked and disliked about the device, as well as any other relevant comments. Finally, a ranking of appreciation of the devices was completed as the experiment progressed until a final ranking of the seven devices was obtained. We chose to use an ad hoc questionnaire instead of the SUS questionnaire [23] as some of its questions do not apply to complex, work-oriented systems such as an airplane cockpit. Instead, we built, in a user experience perspective, our own questionnaire inspired by SUS to target adequately the features related to the user's task.

4.2.3.5 Eye tracking glasses

To record the participants' gaze during the experiment, we used Pupil Invisible eye tracking glasses from Pupil Labs. The eye-tracking technology is integrated into a pair of standard-looking glasses measuring 144 mm wide, 48 mm high and 160 mm long. A camera is set up on the outside frame of the glasses to record the participant's field of view (30 Hz), and infrared sensor is integrated into the inside of the frame to measure the direction of the user's gaze (200 Hz). Data recording was done through the Android application Pupil Invisible Companion, then imported directly to the cloud through the Pupil Cloud service.

4.2.4 Design

The experiment was designed in a repeated measures format, with device (joystick, rotary on screen, rotary on pedestal, keypad on PFD, direct manipulation, side keypad, slider) as the independent variable. For analysis purposes, the tasks were further divided by field (HDG, IAS, ALT, VS, BARO) and then by the distance between the current and target values (small, medium, large). The order of presentation of devices and tasks was randomized. The dependent variables consisted of several objective and subjective measures. The objective measures that were taken are field selection completion time and value entry time (combined into total task completion time), number of field selection errors, number of data entry confirmation errors, tracking accuracy during navigation, tracking accuracy during data entry, number of target value overshoots, as well as percentage of fixations on the tracking task. All these measures were recorded for each task, except for the percentage of fixations which was calculated for each device. Subjective measures were also calculated for each device: workload (with NASA-TLX), discomfort (with Borg CR-10) and usability (with ad hoc questionnaire).

4.2.5 Procedure

Upon arrival at the test room, we measured the participant's stature (height and length of the right arm) and they answered some demographic questions. The rig was then set up to the participant's morphology by adjusting the height of the screen and the position of the seat on its rails to reach the ERP. Then, the devices were explained one by one to the participants, who could perform up to 2 minutes of practice tasks to familiarize with the device. They also received explanations on how the eye tracker app worked since they were the ones who would start and stop the recordings. For each of the 7 devices, participants then completed all 15 possible tasks (5 fields x 3 sizes). 5 to 10 seconds after the completion of a task, a new one was randomly generated, and the instruction was displayed in the upper portion of the empty space to the right of the PFD. For all touch devices, participants were asked to use their index finger for selection and to not stabilize their hand by leaning on one side of the screen. After having completed the trial for each device, participants completed the NASA-TLX workload questionnaire and Borg CR-10 scales discomfort form, and verbally answered usability questions.

Once data collection for all devices was completed, participants were thanked and escorted out. The total duration of the test was of 2 hours.

4.2.6 Data analysis

We used repeated-measures ANOVAs to analyze temporal data, deviation from the target during the tracking task, and percentage of fixation time looking at the tracking task. Greenhouse-Geiser correction was applied where sphericity was violated. Post-hoc analysis was done using pairwise t-tests. We used Friedman's tests to analyze the number of errors, overshoots, NASA-TLX results, discomfort and usability questionnaires as they produced ordinal level data. Conover's tests of multiple comparisons were used for post-hoc analyses. In both parametric and non-parametric analyses, the post-hoc tests were adjusted using the Holm-Bonferroni method. The entire analysis was done on R (v. 4.2.0) and statistical significance was reported when $p < .05$.

Due to bugs in the task generation software, 46 data points out of the expected 2100 (20 participants x 7 devices x 5 fields x 3 sizes; 2.19%) were missing. The "Multivariate Imputation by Chained Equations" (MICE) R package was used to impute missing data via predictive mean matching (PMM). This only applied to variables normally logged by the software, whereas workload,

discomfort and usability forms were completed by all participants. Some data was also missing for eye tracker. No data was recorded for the last participant, so the analysis was done on the data of the remaining 19 participants. Whether due to technical problems or oversight, the eye tracker recordings of 15 out of the expected 133 test sessions (20 participants x 7 devices; 11.28%) were unavailable. Data imputation was also performed by PMM using MICE. The analysis itself consisted in defining areas of interest (AOI) in the participant's field of view (specific sections of the interface, joystick, rotaries, etc.). We then had to associate the gaze position with one of these AOI at a frequency of 5 times per second. Since the analysis software did not allow for segmenting the recordings for every task, fixations that occurred between tasks were assigned to an "irrelevant" AOI whose content was subsequently removed from the analysis. We then could get the time spent looking at each AOI for the entirety of the session, minus the between-task parts.

4.3 Results

This section presents the main results that we found, starting by the objective measures of completion time, error rate, overshoots, tracking task and eye tracking, followed by subjective measures of workload, discomfort, usability, perceived speed and appreciation ranking.

4.3.1 Completion time

The device used had a significant effect on the field selection time, $F(6, 114) = 43.24$, $p < .001$ (see Figure). The mechanical devices, although different in the way navigation was done, were not significantly different between each other for field selection time. However, they were all slower than the touchscreen devices (joystick: $p < .01$, rotary screen: $p < .001$, rotary pedestal: $p < .01$). Among the touchscreen devices, there were two categories of field selection: tapping on the PFD (keypad on PFD and direct manipulation) and tapping on the side panel (side keypad and slider). Field selection time with the slider was not significantly faster than the keypad on PFD ($p = .24$) and direct manipulation ($p = .06$), but the side keypad was faster than both ($p < .01$).

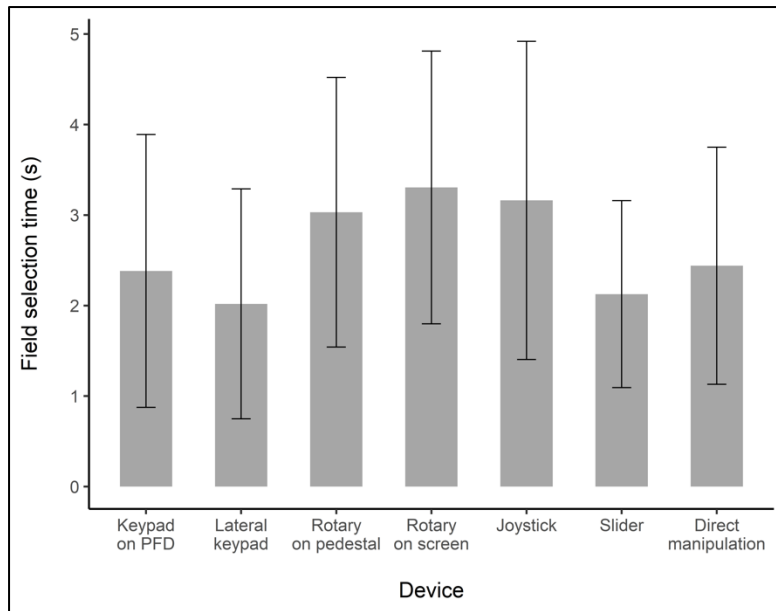


Figure 4-5: Field selection time across devices. Error bars represent ± 1 SEM.

For data entry time, we observed that the device also produced a significant effect, $F(6, 114) = 47.27, p < .001$ (see Figure). Three categories emerged: keypads (keypad on PFD and side keypad), intermediate devices (joystick, rotary on screen, rotary on pedestal, slider), and direct manipulation. The latter device was found to be significantly slower than all other ones ($p < .001$). No significant difference was found between the devices in the other two categories, and the keypads were significantly faster than the intermediate devices ($p < .01$). In addition to the device effect, we investigated the effect of participants' video game experience on data entry time. They were then divided in two groups: those who self-assessed as beginner or intermediate gamers ($n=9$), and those describing themselves as experts ($n=11$). We then found that self-described expert gamers were significantly faster than less experienced gamers ($t(16.65) = 2.18, p < .05$). We also tested the effect of handedness on completion time, but found it to be not significant ($t(3.14) = 1.27, p = .29$).

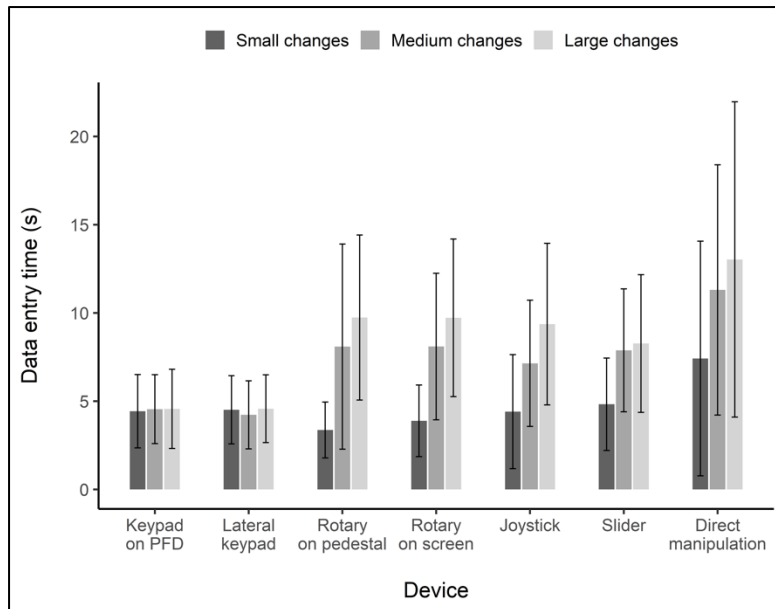


Figure 4-6: Completion time of data entry across devices and size of task. Error bars represent ± 1 SEM.

We analyzed data entry time based on the distance between the current and target value (small, medium, large), also shown in Figure . When looking at small changes, we found a significant effect of device on data entry time ($F(6, 114) = 13.28, p < .001$). Only two devices stood out from the pack: direct manipulation was significantly slower than all other devices ($p < .01$), and the rotary on pedestal was faster than all touch devices ($p < .05$). For the medium changes, the effect of the device on data entry time was the same as for all tasks ($F(6, 144) = 48.99, p < .001$). Data entry time for large changes, meanwhile, also varied significantly by device ($F(6, 114) = 85.39, p < .001$), but with some differences. Direct manipulation was still significantly slower than all other devices ($p < .01$) and keypads significantly faster than all other devices ($p < .05$). For large changes, we also saw that the slider was significantly faster than both rotaries ($p < .05$). The combined time of selection and data entry was also significantly affected by the device ($F(6, 114) = 57.95, p < .001$). The results were almost identical to those presented previously, except that the slider was faster than the rotary on screen ($p < .05$).

4.3.2 Error rate

The devices did not generate significant differences in field selection error rates.

For value confirmation errors, there was a significant effect of device, $X^2(6) = 40.86$, $p < .001$ (see Figure). The rotary on screen led to significantly more errors than the joystick, keypads, and slider ($p < .01$).

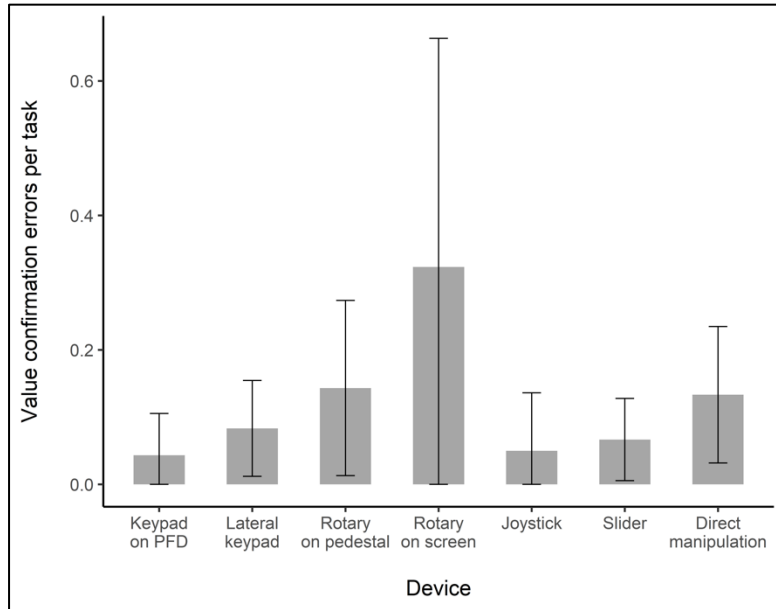


Figure 4-7: Number of value confirmation errors per task across devices. Error bars represent ± 1 SEM.

4.3.3 Overshoots

An overshoot was observed when the current value momentarily exceeded the target value **before** the participant confirmed the entry. Several overshoots could have occurred for one entry ex. if the current value went above, then below the target during adjustments. For this analysis, we excluded keypads as they were unable to produce overshoot. We found a significant effect of the device on the number of overshoots, $X^2(4) = 34.93$, $p < .001$ (see Figure). Significantly fewer overshoots were made with the rotaries than direct manipulation ($p < .001$) and the slider ($p < .01$). The joystick was also significantly more accurate than direct manipulation ($p < .05$).

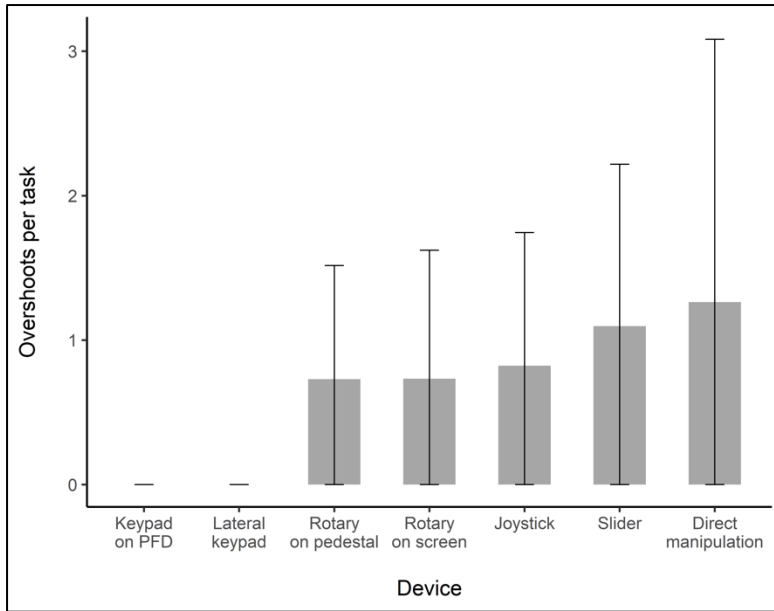


Figure 4-8: Number of overshoots per task across devices. Error bars represent ± 1 SEM.

4.3.4 Tracking task

During field selection, the device produced a significant effect on performance of the tracking task, $F(6, 114) = 3.08$, $p < .01$ (see Figure). Indeed, tracking accuracy when using direct manipulation was significantly worse than when using the slider ($p < .01$).

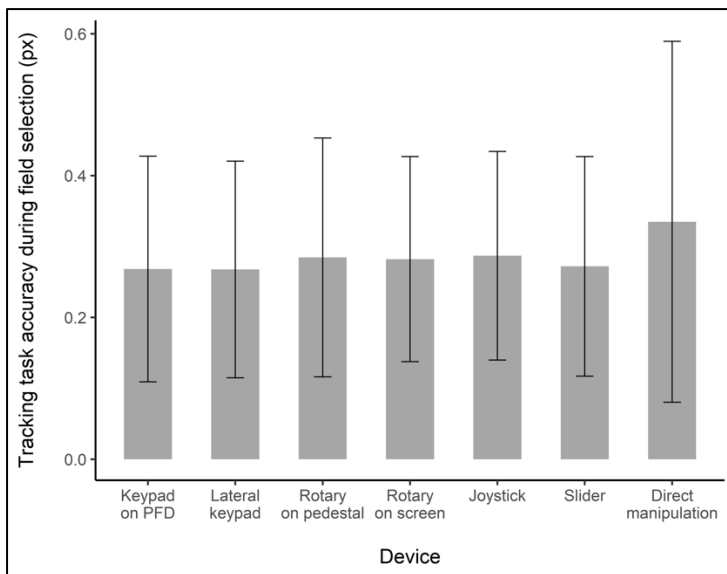


Figure 4-9: Tracking task accuracy during field selection across devices. Error bars represent ± 1 SEM.

The device also influenced tracking accuracy during data entry, $F(3.1, 66.18) = 0.58$, $p < .001$ (see Figure). Direct manipulation generated significantly worse tracking performance than all mechanical devices and keypads ($p < .05$), while the performance using the slider was significantly worse than the performance using the rotary on pedestal ($p < .05$).

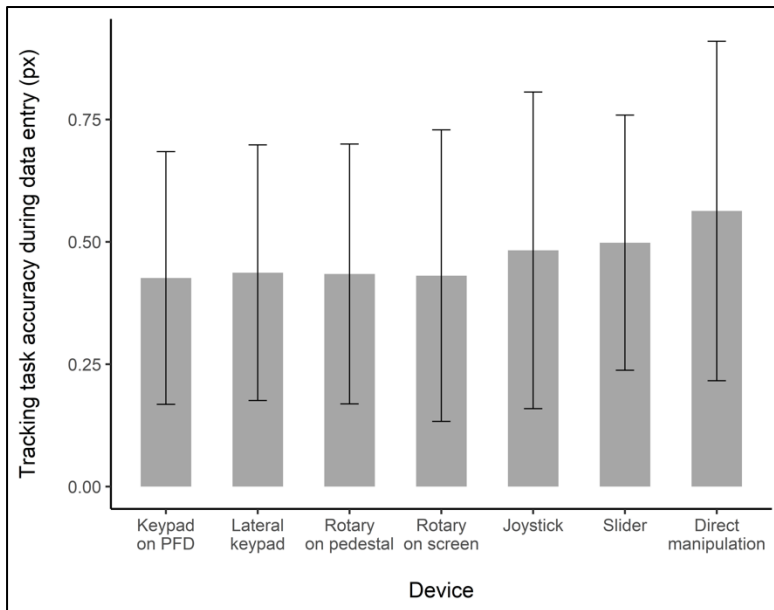


Figure 4-10: Tracking task accuracy during data entry across devices. Error bars represent ± 1 SEM.

4.3.5 Eye tracking

The device produced a significant effect on the percentage of fixation time allocated to the tracking task, $F(3.49, 62.79) = 0.58$, $p < .001$ (see Figure). Participants looked significantly less at the tracking task when using the slider compared to the joystick ($p < .05$), rotary on pedestal ($p < .001$) and keypad on PFD ($p < .01$). In addition to the slider, the rotary on pedestal led to a greater percentage of fixations on the tracking task than the joystick ($p < .05$), rotary on screen ($p < .01$), direct manipulation ($p < .01$), and side keypad ($p < .001$).

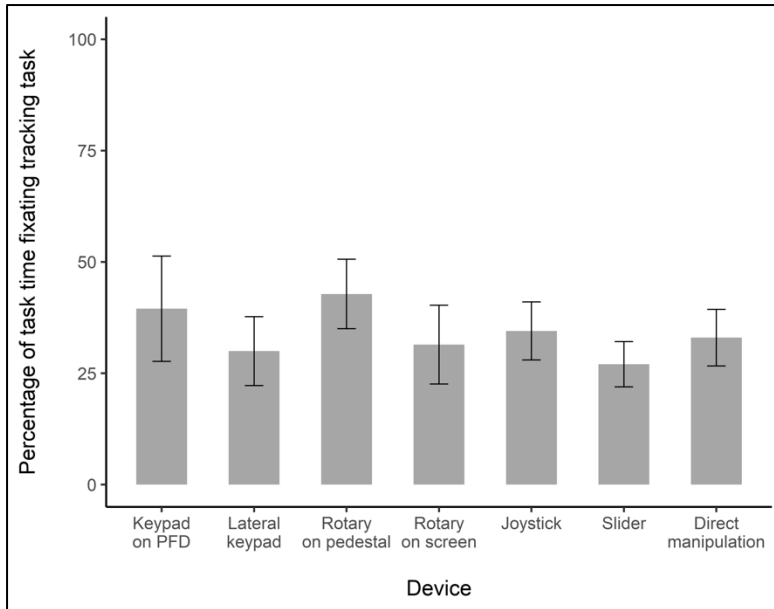


Figure 4-11: Percentage of task time fixating tracking task across devices. Error bars represent ± 1 SEM.

4.3.6 Workload

The effect of devices was also significant on workload, $X^2(6) = 17.96$, $p < .01$ (see Figure). NASA-TLX scores were significantly higher for direct manipulation compared to the joystick, rotary on pedestal, and both keypads ($p < .01$). When looking at each NASA-TLX dimensions, we found direct manipulation to impose higher demand on all dimensions, except physical demand. For this dimension, we observed that the rotary on screen was significantly more physically demanding than the joystick and the side keypad ($p < .05$). All other device combinations did not show significant differences.

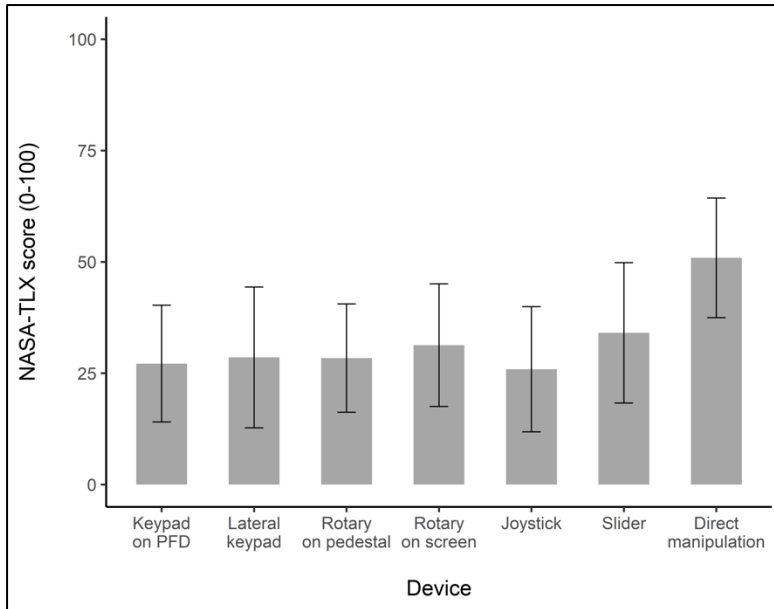


Figure 4-12: NASA-TLX workload score across devices. Error bars represent ± 1 SEM.

4.3.7 Discomfort

There was a significant effect of the device on discomfort, $X^2(6) = 25.53$, $p < .001$ (see Figure). The joystick received significantly higher overall discomfort score than the rotary on screen ($p < .01$) and direct manipulation ($p < .01$).

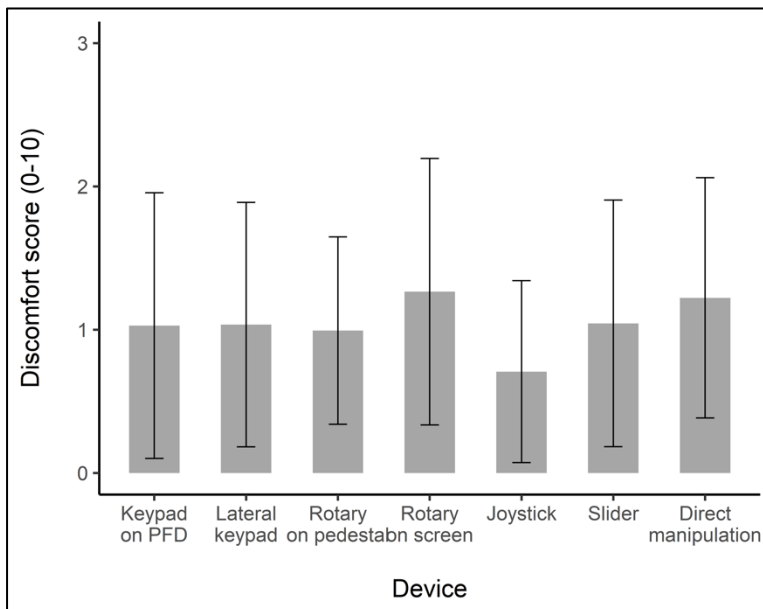


Figure 4-13: Overall discomfort score across devices. Error bars represent ± 1 SEM.

When looking at discomfort scores for specific body parts, we found no significant effect of the device used on discomfort to the neck ($X^2(6) = 8.94, p = .18$), upper back ($X^2(6) = 8.41, p = .21$), lower back ($X^2(6) = 5.85, p = .44$) and hand/wrist ($X^2(6) = 4.71, p = .58$). However, arm ($X^2(6) = 27.92, p < .001$) and shoulder ($X^2(6) = 16.88, p < .01$) discomfort were significantly affected by the device (see Figure). For the arm, the joystick was significantly more comfortable than the rotary on the screen, the keypad on PFD, and direct manipulation ($p < .001, p < .05, p < .01$, respectively). For the shoulder, the discomfort experienced with the rotary on screen was significantly higher than with the joystick ($p < .01$).

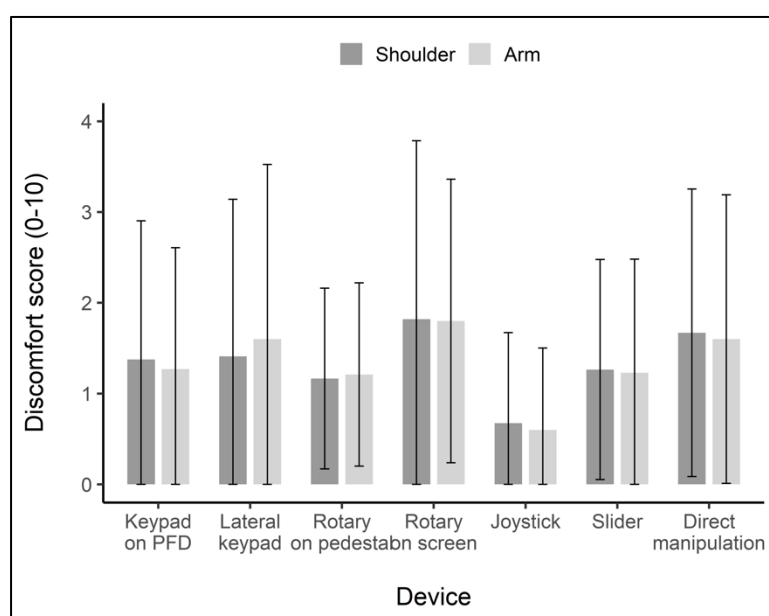


Figure 4-14: Discomfort score across devices and body part (shoulder and arm only), on a scale of 1 to 10 (1: No discomfort; 10: Extremely strong discomfort). Error bars represent ± 1 SEM.

4.3.8 Usability

The perceived usability of the devices showed significant differences for both small changes ($X^2(6) = 25.57, p < .001$) and large changes ($X^2(6) = 55.01, p < .001$), see Figure . Participants found small changes significantly more difficult to make using direct manipulation compared to joystick ($p < .01$) and rotary on pedestal ($p < .001$). For large changes, direct manipulation was similarly significantly less usable than the joystick ($p < .001$), keypad on PFD ($p < .001$), and side keypad ($p < .001$). At the other end of the spectrum, the side keypad was also rated as having significantly

better usability than the rotary on screen ($p < .05$), rotary on pedestal ($p < .05$), and slider ($p < .01$). The keypad on PFD was also significantly more usable than the slider for large changes ($p < .05$).

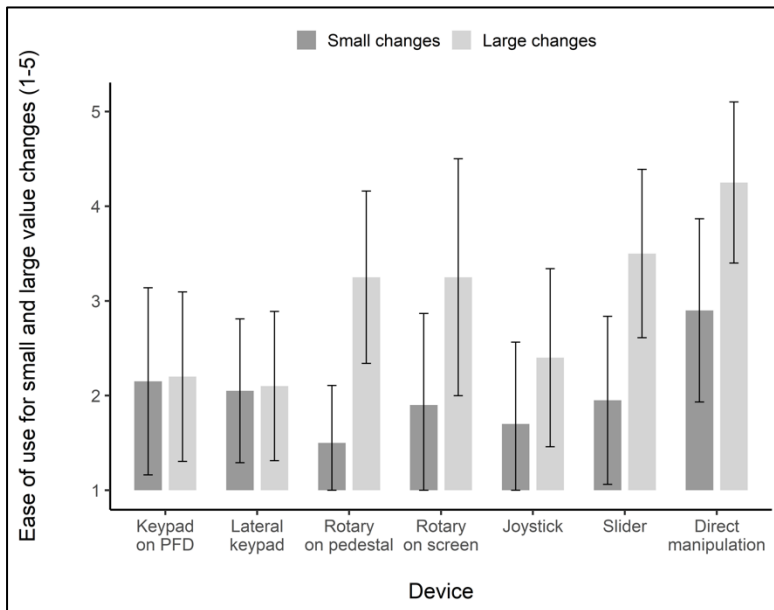


Figure 4-15: Ease of use score of devices on a Likert scale of 1 to 5 (1: Very easy, 5: Very difficult) for small and large value changes. Error bars represent ± 1 SEM.

4.3.9 Perceived task completion speed

We found a significant effect of the device used on the perceived speed of task completion, $X^2(6) = 49.09$, $p < .001$ (see Figure). The perceived speed when using direct manipulation was significantly slower than all other devices except the slider ($p < .05$), which was in turn perceived as significantly slower than the side keypad ($p < .01$).

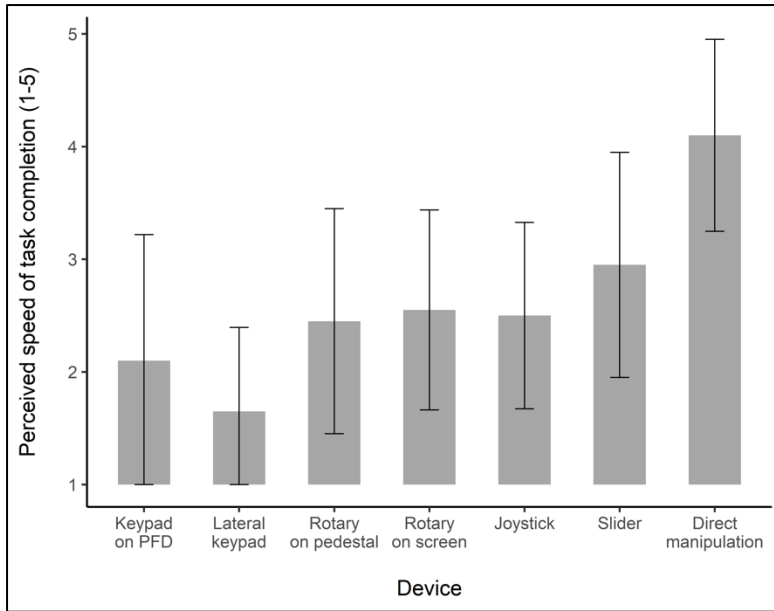


Figure 4-16: Perceived task completion speed by devices on a Likert scale of 1 to 5 (1: Very fast, 5: Very slow). Error bars represent ± 1 SEM.

4.3.10 Appreciation ranking

There also was a significant difference between the devices in the general appreciation ranking, $X^2(6) = 40.82$, $p < .001$ (see Figure). The pattern of significant differences was the same as for perceived speed, with direct manipulation significantly less liked than the joystick ($p < .001$), rotary on screen ($p < .05$), rotary on pedestal ($p < .001$), keypad on PFD ($p < .001$), and side keypad ($p < .001$), while the slider was also significantly less liked than the side keypad ($p < .05$).

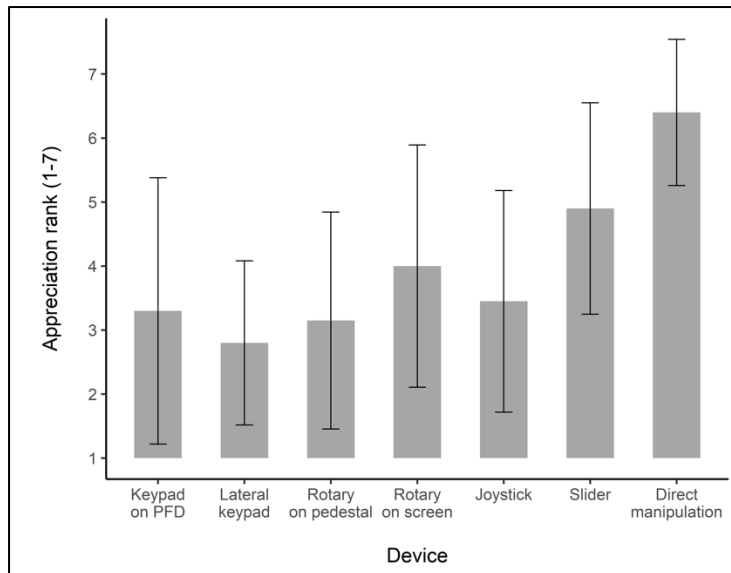


Figure 4-17: Ranking of devices on a scale of 1 to 7 (1: Most appreciated, 7: Least appreciated). Error bars represent ± 1 SEM.

4.4 Discussion

The goal of this experiment was to evaluate the performance of touch devices compared to mechanical devices historically used in cockpits for digit entry. Our study was intended to be a continuation of the Wynne et al. [22] paper: the aim of the experiment was the same, but the method was adapted according to the recommendations they issued. First, the tasks performed by participants were realistic and closely replicated the action of entering values into a PFD. Second, tasks were divided by the distance between the current value and the target value, which allowed for a finer-grained analysis of device performance. Finally, the tests were performed with right- and left-handed participants to test the impact of handedness on performance; on this point, the results tended to indicate that being right- or left-handed had no influence on completion time, workload, or discomfort. For ease of understanding, the rest of the discussion will be divided according to the variables of the experiment.

4.4.1 Field selection time

We found that the field selection time was significantly faster for touch devices than for mechanical devices. This appears to be because touchscreen selection was always done with a single movement

(a tap on the PFD or side panel) as opposed to mechanical devices which potentially required multiple cursor movements to reach the desired field, depending which field was initially highlighted.

For touch devices, those that used buttons on a side panel generally appeared to be faster than those requiring direct interaction with the PFD. This can be explained by the fact that the buttons on the side panel were located directly below the task statement and were grouped together. This made the eye-travel and arm movement shorter and consistent from task to task. However, the decision to integrate a side panel into a cockpit display should not be made solely based on this aspect: the results also showed that participants looked less at the tracking task with the side panel devices than with the PFD-based ones. This will be discussed in section 4.4.4.

4.4.2 Date entry time

Our assumptions regarding data entry time were mostly confirmed. Indeed, keypads were generally faster, consistent with previous studies [22], [35]. They were also clearly faster in the case where the distance between the target value and the initial value was large. However, the assumption that keypads and rotaries would be the fastest for small value changes did not hold: rotaries were significantly faster in this case. The natural explanation is that the time to enter a number with a keypad does not depend on the initial value, while rotaries do. It implies that rotaries start with an advantage for small changes (10 increment steps or less), which erodes as the target value moves away from the initial value i.e., larger size of task. In the case of large changes, even the slider was faster than the rotaries since it could cover a larger range of values in a shorter time. In this study, we implemented a rate-aiding feature to the rotaries to accelerate the increments with large changes. However, 9 out of 20 participants found that its use was not reliable enough and could be improved. Our results suggested that even with additional calibrations, keypads would retain their speed advantage over rotaries for large value changes.

It's also worth noting that keypads provided the fastest data entry despite the vibration, the prohibition on stabilizing the hand, and the minimal key size. As past research showed how vibration degraded keypad performance [35], [57], we can hypothesize that the performance gap between keypads and other devices would be even bigger in a stable, non-vibrating environment.

4.4.3 Errors and overshoots

First, it should be noted that the number of errors per task was very low (on average less than 0.4% for all devices). This comes from our definition of an error: an attempt to confirm an erroneous value. This happened as a result of misreading the task or the field value, or from an accidental activation of the confirmation mechanism. As such, it did not include all keypad missed presses, since an erroneous entry could be corrected before confirmation. The reasoning behind choosing such a definition was to monitor serious mistakes with real consequences on the flight safety. Conversely, inputs made before confirmation could be corrected and did not impact the movement of the aircraft. This confirmation mechanism was suggested in several previous articles [22], [36], [38], [42] to prevent errors when using touchscreens under vibration.

Second, it is important to qualify the results obtained for the number of errors. The larger number of errors observed with the rotary on screen compared to the other devices does not reflect a generalized failure of all rotaries; it mainly shows a hardware problem with our setup. Indeed, the 510 ± 150 gr actuation force of the button was insufficient to prevent inadvertent actuations during data entry. One interesting point is that despite its lower actuation force (400 ± 150 g), fewer errors were made with the rotary on pedestal. This means that the position of the rotary had an effect on the number of accidental clicks. Whether this was due to the extension of the arm and therefore the weaker support, or simply the angle of the device which involved a different finger grip, or a combination of both, we saw that the rotary on screen led to more unwanted clicks. Still, the rotary on pedestal was the device that led to the second-most errors. Future work should investigate higher actuation force for rotary to prevent inadvertent actuation.

While the errors produced with the rotary could be greatly reduced with another model, the problem of direct manipulation is more fundamental. In order to keep the PFD interface uncluttered, the value readouts of each field acted as confirmation buttons. Since they were located at the end of the scrolling tapes (except for HDG), participants would sometime inadvertently press them while trying to scroll. To eliminate this source of error, we suggest adding a confirmation button placed elsewhere on the screen e.g., in the lower right corner. With such a mechanism, it is likely that the error rate for direct manipulation would be similar to that of other touch devices.

We used the number of overshoots per task i.e., the number of times the current value exceeded the target value before being confirmed, to analyze the device accuracy for data entry. Keypads

were not included in the calculation of this variable since they could not produce overshoot. Of the devices analyzed, the direct manipulation produced the most overshoots, which invalidates our original hypothesis that the slider would be the more imprecise device, although the difference between the two was not significant. Even so, we found that using dragging motions (slide or scroll) on a touchscreen in a vibrating environment led to lower precision. Our results showed that the rotaries allowed for more accurate and therefore less time-consuming and frustrating input.

4.4.4 Tracking task

Our hypothesis that the slider and the side keypad would produce the worst tracking task performance turned out to be partially wrong. The slider was indeed one of the two worst performing devices for tracking, but the worst was, by far, direct manipulation. Based on the results, we realize that tracking performance is a result of two factors: task completion time and attention dedicated to tracking. Our hypothesis was based only on the second factor, and in that sense was more reflective of the eye tracking results. Indeed, participants looked less at the tracking task when using the slider and the side keypad, which was also confirmed by the participants themselves as half of them said they felt they looked at the tracking task less when using these devices. We had not considered that given the faster completion time of the tasks with the side keypad, the deviation between the cursor and the target would be smaller. Conversely, completing data entry tasks with the slider took more time. Combined with lower visual attention dedicated to the tracking task, this led to poor tracking performance.

Our theory also held up for direct manipulation, as long completion time led to poor tracking performance despite participants looking at the tracking task more than with side panel devices. In addition, a more serious problem occurred with this device. The participants' arm completely blocked their view of the tracking task when they scrolled the IAS tape because it was located on the left side of the PFD and the participants had to use their right hand. Under these conditions, it was therefore harder to track the target with the joystick.

The only result difficult to explain was the lack of performance difference between the two rotaries. The rotary on the pedestal generated significantly more fixations on the tracking task than the rotary on the screen, and their completion time was not significantly different. We believe that a more difficult tracking task requiring more sustained concentration would have generated a significant difference in performance between the two.

4.4.5 Workload and discomfort

Overall, the NASA-TLX scores obtained were low. Compared to the scores obtained in other tracking experiments, as surveyed in a recent meta-analysis [58], the workload scores for each device were in the first (both keypads, both rotaries, joystick and slider) or second (direct manipulation) quartile. This suggests that our tracking task was easier than 50% of the other 70 experiments surveyed by [58]. Although tracking was integral to our experiment, we emphasized to participants to focus on the data entry task. It also implies that data entry did not have a great impact on workload when combined with tracking.

The higher workload scores received by direct manipulation reflected its poor usability. Indeed, participants reported frustration when using it due to the time required to complete the tasks, and that the tape scrolling felt less responsive. The vibration made the scrolling movements more imprecise.

That said, our assumption was that the rotaries would generate the lowest workload, which turned out to be partially wrong. The rotary on pedestal was indeed in the group of devices with the lowest workload, but the rotary on screen was not. In fact, it was the one that had the highest physical demand scores. This is consistent with the results of the discomfort questionnaire, which points to the same finding, as the rotary on screen had the highest discomfort scores for shoulder and arm. During the interaction tasks, participants had to keep their arm extended for a significant period of time. Since the rotary was placed to the right of the touchscreen, the angle of the arm and the distance to reach it were greater than those required to interact with the screen itself. This added additional pressure on the shoulder and arm.

At the opposite end of the spectrum, the joystick received significantly lower scores than the rotary on screen for physical demand as well as arm and shoulder discomfort. Having the arm resting on a support closer to the body certainly explained this low physical demand, whereas all the other devices required active maintenance of the arm's position in space. Note that the differences in discomfort between the devices were small since the average scores for each ranged from 0.5/10 (extremely weak) to 2.0/10 (weak).

4.4.6 Usability, perceived speed and appreciation

It was observed that the usability score for each device roughly followed data entry time. This impression was confirmed using a Pearson correlation test, as a negative correlation was found between data entry time and usability score for small changes ($r(138) = -.42, p < .001$). For large changes, a negative correlation was also detected ($r(138) = -.46, p < .001$). Thus, it is understood that the speed of completion played an important role in the user perception of what makes a device usable. It can be argued that it is not exactly the actual speed that played a role on usability, but rather the perceived speed. Indeed, the correlation between the mean usability score for small and large changes and perceived speed was even stronger ($r(138) = .66, p < .001$). This finding holds true for all devices, as will be demonstrated in the following sections.

4.4.6.1 Keypads

The most common comment about the keypads was that it was very quick to select a field and to enter a value, as reported by 13 participants. 11 participants also found the keys too small, but this did not seem to have as big an influence on usability scores as the task completion time. It seems that despite the potential frustration of having to be precise in pressing small keys, being able to do the tasks quickly impacted usability more strongly.

4.4.6.2 Rotaries

Consistently with what was previously reported, participants appreciated the tactile feel of the rotaries for making small changes quickly and accurately, as claimed by 10 participants. In contrast, 9 participants found that the rate-aid mechanism did not work well enough and expressed that making large changes took too long, further making the link between speed and usability explicit.

In the case of rotaries, another element that may have affected usability was the way in which the field was selected. Indeed, 15 out of 20 participants preferred the rotary on pedestal to the rotary on screen for this segment of the task. This preference is explained by the way the selection cursor moved for each device. The movement of the cursor for the rotary on pedestal was always the same: a click upwards moved the cursor upwards, etc. On the other hand, the rotary on screen allowed a circular tabbing navigation, with the cursor moving between fields in the direction of the rotary's rotation. However, the movement of the cursor depended on its position: if it was in the upper part of the screen and the rotary was turned to the right, the cursor moved to the right as

expected. If the cursor was in the lower part of the PFD, a rightward rotation of the rotary caused the cursor to move to the left as it "rotates" around a central axis. This referential movement required an additional reflexive step and slowed down the reaching of the desired field, hence the stronger interest of the participants in selecting the field with the rotary on pedestal.

4.4.6.3 Joystick and slider

While for the other devices the usability and appreciation of a device seemed to depend on its ability to enter a value quickly, this was not clearly the case for the joystick and the slider. As a reminder, data entry time was similar between the two devices for small and medium changes, but the slider was slightly faster for large changes. Surprisingly, the joystick got higher scores for ease of use and perceived speed for large changes. For the joystick, participants noted the improvement in precision they felt during the test (8 participants). As for the slider, it was the difficulty of being precise and the fact of having committed several overshoots that stood out for 11 participants.

The difference in the assessment of performance between the joystick and the slider had an impact on the participants' perception of speed. Even though the slider was in fact slightly faster, the large number of adjustments needed to reach the correct value and the frustration this caused made the tasks longer to their eyes. This confirms the hypothesis posed earlier that it is perceived speed that is related to the usability of a device, not actual speed.

4.4.6.4 Direct manipulation

The slowness of the device, especially for large changes, was the most frequent comment (13 participants). With 9 participants, the difficulty of being precise when scrolling with vibration was the next most common remark.

4.4.7 Limitations

A first limitation of our study stems from our definition of an error as an erroneous confirmation. The idea came from a previous study by Cockburn et al. [6] that defined errors in a similar way, trying to define errors only as actions with undesired consequences. This also applies in our case, as any interaction before confirmation has no impact on airplane security. Still, a calculation of the number of interactions for each task compared to the minimum number of interactions would have allowed a better analysis of each device accuracy. Another limitation was the rate-aid calibration

of the rotaries that would require more investigation to improve its usability. The fact that participants did not wear a harness limiting their position as in a real cockpit was also an issue. Although we asked them to remain seated without leaning forward, it was not possible to control their position precisely. Finally, one participant had piloting experience, which implies a potential difference in the results, especially in the appreciation of the devices. Indeed, as presented above, participants liked the keypads the most. However, in a previous experiment [21], pilots reported having little interest in virtual keypads. This is also consistent with a discussion we had with a pilot during a preliminary test of our experiment. Thus, it is likely that the observations on device usability would have been different if more pilots had been selected as participants.

4.4.8 Future research

As the pros and cons of the devices tested in this study are becoming well documented, a way to deepen our knowledge in the field would be to repeat a similar study and proposing combinations of devices, for example the touchscreen for field selection and a rotary for data entry. Participants could also be offered two devices simultaneously to observe whether they use more one over the other. Also, since keypads seemed to be promising, it would be interesting to evaluate the performance of keypads located elsewhere on the screen e.g., keypads that can be dragged and dropped onto the PFD by the user. Several participants would also have preferred a physical keypad to a virtual keypad. Intuitively, this would retain the speed advantages of the virtual keypad while enhancing it with a better physical feel. However, research shows that physical keypads do not perform better than virtual ones [21], [40], and there is little point in testing a mechanical device when the trend is toward virtualization. More promising avenues such as digital input on a touchscreen with haptic feedback, as proposed by Wynne et al. [22], or using a speech-to-text system could be explored.

4.5 Conclusion

With the arrival of touchscreens in aircraft cockpits, it is necessary to ensure the performance and safety of touch devices that may replace mechanical ones. In this study, we compared both types of devices in the realistic setting of digital data entry on a flight display. The results showed that traditional rotary knobs provided faster data entry time than keypads when the target value was

close to the initial value, but that keypads were faster when the difference between the two values exceeded ten increments. The keypads also produced fewer errors, had higher usability scores, and did not show significant differences in workload and comfort. The realistic nature of the tasks, as well as the way they were divided in size categories, allowed this study to bring more nuance to previous research which placed the keypad as invariably faster than the rotary knob. Our results will allow for a more informed and safe design of touch devices in the cockpit and serve as a baseline for other comparative analyses of innovative data entry techniques.

Acknowledgements

We would like to thank Adam Schachner who built the flight deck rig and assisted us with the experimental design, as well as Nami Bae from CMC Electronics for her input in designing the interface. We also thank all participants who took part in this study.

CHAPITRE 5 DISCUSSION GÉNÉRALE

L'objectif de ce chapitre est de faire un retour sur la réalisation de l'expérience au cœur de ce mémoire, offrir une rétrospective sur les objectifs posés initialement ainsi que de revenir sur des éléments qui n'ont pas pu être intégrés à l'article. Dans un désir d'autocritique et d'amélioration continue, les limites de la recherche seront ensuite exposées.

5.1 Retour sur les objectifs de recherche

L'objectif principal de ce projet de recherche était de déterminer comment se comparaient les dispositifs mécaniques à des mécanismes d'interaction tactiles pour effectuer des entrées de données numériques dans un environnement soumis à la vibration. Ce but a été atteint, car les résultats de l'expérience ont permis d'établir un portrait très précis sur la question. En effet, nos résultats apportent de nouvelles nuances aux recherches précédentes ayant porté sur le même thème, ce qui était à la source de la définition de nos sous-objectifs initiaux. Prenons-les un à un pour évaluer leur degré de réussite individuel.

5.1.1 Évaluation d'une tâche réaliste

Le désir initial provenait de deux sources distinctes : le besoin clairement énoncé par Wynne et al. [22] de procéder à l'évaluation des dispositifs dans des conditions de tests représentatives des postes de pilotage réels, ainsi que le partenariat industriel avec CMC Électronique qui étaient à la recherche de résultats concrets pouvant être appliqués à leurs projets en avionique. Ce sous-objectif a été atteint avec succès. Nous avons conçu une expérience à la fois écologiquement réaliste dans le cadre de l'aviation civile et méthodologiquement valide sur le plan scientifique. Les conclusions obtenues ont une valeur certaine à la fois pour les domaines académique et industriel.

5.1.2 Confirmation de la disparité entre gestes de glissement et tapement

Nous sommes arrivés à la même conclusion que ce qui ressortait de la revue de littérature, c'est-à-dire que les interactions tactiles basées sur le glissement étaient moins appropriées que celles basées sur le tapement pour réaliser des tâches d'entrée de données. Puisque le glissement nécessite beaucoup de précision et que la vibration a un fort impact sur la position du doigt, les deux ne font

pas bon ménage. Tant le bouton-glissoir que les manipulations directes ont atteint un niveau de performance beaucoup plus faible que les autres dispositifs du test. Même si l'implémentation des manipulations directes avait été parfaitement fonctionnelle, le concept même de déplacer de longs rubans de données jusqu'à un point précis s'est avéré bien moins efficace que de simplement entrer la valeur sur un clavier numérique.

5.1.3 Impact de la position sur l'écran des mécanismes d'interaction tactiles

Il s'agit d'un de nos résultats les plus intéressants, alors que nous avons conclu que l'impact sur la performance à la tâche de suivi était très dépendant du mécanisme d'interaction. Les données de suivi oculaire nous ont fourni une partie de la réponse, alors que, conformément à nos attentes, les participants regardaient moins la tâche de suivi lorsque le mécanisme d'interaction était placé sur le panneau latéral à droite du PFD. La position du mécanisme d'interaction avait un impact significatif sur la précision du suivi mais seulement si l'entrée de donnée dépassait une certaine durée, bien que celle-ci soit difficile à quantifier avec précision. La position du clavier numérique n'avait pas d'effet significatif sur la tâche de suivi en raison de son temps de complétion très rapide (environ 4,5 s), alors que le contraire était vrai pour le bouton-glissoir (temps de complétion d'environ 7,0 s). La performance de suivi était donc dépendante à la fois de la position du mécanisme d'interaction tactile et du temps de complétion de l'entrée de données.

5.1.4 Enregistrement des données de mouvement oculaire

Nous avons rencontré quelques problèmes avec l'enregistrement du suivi oculaire. Plusieurs enjeux de fiabilité du dispositif nous ont empêchés de recueillir des données pour chaque participant et dispositif, ce qui nous a limités dans la puissance dans nos tests d'analyse statistique. D'autre part, nous avons réalisé trop tard les limitations du logiciel d'analyse des données de suivi oculaire, et ce sujet sera abordé plus en détail dans la section 5.4. Les données produites ont tout de même pu informer notre analyse comme discuté dans la sous-section précédente.

5.1.5 Catégorisation des tâches d'entrée de données par taille

Créer des groupements de tâches basés sur l'écart entre la valeur actuelle et la valeur cible aura été la décision nous ayant permis d'arriver à des conclusions bien plus nuancées sur les divers dispositifs évalués que ce que nous avons trouvé dans la littérature. Il s'agit d'un objectif

particulièrement bien atteint : nous avons pu montrer que dans un contexte réaliste de poste de pilotage, les claviers numériques virtuels permettaient l'entrée de données la plus rapide lorsque la valeur cible était à plus d'une dizaine d'incrément de la valeur initiale. Les boutons rotatifs étaient quant à eux plus rapides pour les plus petits écarts. Ces résultats viennent appuyer les précédentes études qui montraient l'avantage de vitesse pour les claviers numériques à un niveau de vibration faible à modérer, mais ajoutent des informations additionnelles sur les limites de cet avantage.

5.1.6 Intégration des commentaires subjectifs à l'analyse

Nous avons pu récolter de nombreuses données subjectives pour enrichir l'analyse de nos résultats, notamment la vitesse perçue de chaque dispositif, leur facilité d'utilisation et le classement global de préférence de chaque participant. De plus, nous avons amassé beaucoup de données qualitatives à travers nos discussions avec les participants, ce qui nous a permis de comprendre « pourquoi » ils préféreraient certains dispositifs à d'autres. En général, nous avons ainsi compris que la possibilité d'entrer la valeur rapidement était l'aspect le plus important pour que les participants apprécient un dispositif. Cependant, cette perception était a été influencé par la frustration engendrée lorsque le dispositif n'offrait pas la précision désirée. Ce sont les claviers numériques qui ont ainsi gagné la faveur des participants, mais comme mentionné dans l'article, il est possible que les pilotes ne soient pas du même avis. Gardons toutefois en tête que de nouveaux modes de transports aériens personnels comme les eVTOLs (*electric vertical take-off and landing*) [59] pourront être pilotés par des gens issus de la société civile et non des pilotes professionnels : ils n'auront donc pas le même profil, la même formation et la même expérience que ceux-ci.

5.2 Vérification des hypothèses

À la section 3.4.1, nous avons défini des hypothèses quant aux différences de performance anticipées entre les dispositifs. Ici, nous revenons sur ces hypothèses et répondons pour chacune si elle s'est trouvée supportée par nos résultats ou non. Des explications plus approfondies sont fournies à la section 4.4.

- *H1 : Les claviers numériques permettront l'entrée de données la plus rapide, et ce, peu importe la distance entre la valeur initiale et la valeur cible.* Cette première hypothèse est

généralement confirmée, alors que les claviers numériques ont produit temps d'entrée de données moyen le plus rapide de tous les dispositifs ($p < .01$). Cet écart provenait principalement des tâches de moyenne et grande taille, alors que les claviers numériques étaient significativement les plus rapides ($p < .01$ et $p < .05$, respectivement). Cependant, le bouton rotatif sur piédestal était plus rapide que les claviers numériques pour les petites tâches ($p < .05$).

- *H2 : Les dispositifs sur l'écran tactile, et plus particulièrement les claviers numériques, auront un taux d'erreur plus élevé, alors que ceux basés sur des mouvements de glissement mèneront à davantage de dépassements de la valeur cible.* La première partie de l'hypothèse est infirmée, alors que nous n'avons pas obtenu de résultats concluants en ce qui concerne les taux d'erreurs : seul le bouton rotatif sur piédestal se distinguait négativement sur ce plan par rapport aux claviers numériques ($p < .001$). Cependant, ce taux d'erreur élevé provenait essentiellement d'une limitation technique du bouton rotatif, et il est donc difficile d'en tirer des conclusions fiables. En ce qui a trait aux dépassements de la valeur cible, notre hypothèse a été entièrement confirmée. Les manipulations directes et le bouton-glissoire ont mené au plus grand nombre de dépassements, significativement plus que les boutons rotatifs ($p < .01$).
- *H3 : Les dispositifs mécaniques engendreront un inconfort plus faible, mais une charge mentale plus élevée que les dispositifs tactiles.* Les résultats supportent partiellement la première partie de l'hypothèse, le joystick ayant reçu les scores d'inconfort les plus faibles. Par contre, le bouton rotatif sur l'écran, de pair avec les manipulations directes, ont été classés comme les plus inconfortables ($p < .01$) : les dispositifs mécaniques s'étalent donc sur l'ensemble du spectre de l'inconfort. La seconde partie de l'hypothèse est infirmée, seules les manipulations directes ont reçu des scores de charge mentale significativement plus élevés que les autres dispositifs ($p < .01$).
- *H4 : La précision de la tâche de suivi sera plus faible pour les dispositifs tactiles placés dans un panneau virtuel.* Ce sont les manipulations directes, non placées sur un panneau latéral, qui ont engendré la plus faible performance à la tâche de suivi comparativement aux autres dispositifs ($p < .05$), bien que le bouton-glissoir ait été le deuxième moins précis.

L'hypothèse est donc infirmée, quoique tel que discuté à la section 4.4.4, le positionnement des dispositifs joue un rôle secondaire dans la précision du suivi.

5.3 Comparaisons avec la littérature

Il est intéressant d'analyser comment les résultats que nous avons obtenus se comparent à ceux recensés dans la revue de littérature, et plus particulièrement aux articles listés à l'annexe A : il s'agit des expériences se rapprochant le plus de la nôtre.

5.3.1 Temps de complétion

Nos résultats rejoignent ceux des autres articles alors que la sélection de champ était plus rapide avec l'écran tactile qu'avec les dispositifs mécaniques. Cela coïncide avec les résultats de sélection de cibles de [4], [7], [18]. Pour l'entrée de données, la rapidité du clavier numérique virtuel a généralement confirmé les résultats de [6], [22], tout en les nuancant. En effet, comme discuté précédemment, le clavier numérique virtuel était plus rapide que les boutons rotatifs uniquement si l'écart entre la valeur initiale et la valeur cible était supérieur à 10 incréments.

5.3.2 Taux d'erreur

Nos taux d'erreurs étaient globalement plus faibles que ceux rapportés dans [4], [7], notamment en raison de notre définition d'une erreur et de la distance notable entre les éléments d'entrée de données et de confirmation dans les interfaces tactiles. Similairement à nous, [6], [18] n'avaient pas trouvé de différences significatives entre les dispositifs pour des vibrations verticales semblables à celles que nous avons évaluées.

5.3.3 Charge mentale

Les scores de charge mentale différaient beaucoup d'un mécanisme tactile à l'autre. Ceux basés sur des mouvements de glissements menaient à davantage de frustration et une charge mentale plus élevée tel que trouvé dans [6], [22]. Cependant, nous n'avons pas trouvé d'écart significatif pour cette variable entre les boutons rotatifs et les claviers numériques comme [22], ce que nous parvenons mal à expliquer vu la grande similitude des autres résultats.

5.3.4 Confort

Ici, les données de la littérature diffèrent de ce que nous avons trouvé. Alors que [7], [29], [33] avaient tous déterminé que les écrans tactiles étaient plus inconfortables que les dispositifs mécaniques, nous n'avons pas trouvé d'écart entre les dispositifs des deux groupes. La très courte durée de nos tâches, et donc les extensions peu soutenues du bras, semble avoir joué un rôle dans cet écart.

5.3.5 Utilisabilité

Les avantages des écrans tactiles sur le plan de l'utilisabilité tels que définis dans la section 2.1 ont bel et bien été confirmés. Bien que certains dispositifs tactiles ne soient pas adaptés à la tâche, ceux qui le sont permettent une utilisation simple, rapide et somme toute grandement appréciée des utilisateurs, comme c'était le cas dans [7], [22].

5.4 Résultats non concluants

Bien que la majorité du projet de recherche se soit déroulé comme prévu, des difficultés techniques nous ont tout de même empêchés d'obtenir tous les résultats que nous envisagions au départ.

Le logiciel de test avait été programmé pour enregistrer deux variables qui n'ont finalement pas pu être utilisées pour l'analyse, soit le nombre d'interactions pour chaque tâche et l'ampleur des dépassements de la valeur cible. En raison de la complexité technique et du manque de temps pour s'assurer de leur bon fonctionnement, les résultats produits ont été considérés comme non valables et n'ont tout simplement pas été considérés. Il s'agissait heureusement de variables relativement mineures. Le nombre d'interactions avec le dispositif était une variable offrant peu d'information sur la complexité de l'interaction alors que sa valeur varie grandement d'un dispositif à un autre : un tapement sur une touche de clavier numérique n'équivaut pas vraiment à un mouvement de glissement de bouton-glisseur. Elle aurait pu avoir une certaine valeur si nous avions pu la comparer au nombre d'interactions attendu pour chaque tâche et ainsi en inférer l'efficacité. Quant à l'ampleur des dépassements de la valeur cible, elle aurait pu apporter plus de nuances aux résultats du nombre de dépassements de valeur en montrant par quelle distance l'utilisateur avait manqué la

cible. Instinctivement, un dispositif comme le bouton-glissoir engendrerait des dépassements de plus grande ampleur que les boutons rotatifs, mais nous n'avons pas pu confirmer cette hypothèse.

La plus grande déception est sans conteste le peu de résultats ayant pu être extraits de l'analyse des données de suivi oculaire. Nous avons bien pu déterminer la proportion de temps passé à regarder chaque partie de l'écran, mais là s'arrête la liste. À notre grand désarroi, le logiciel d'analyse de données ne permettait pas de segmenter chaque piste vidéo – c'est-à-dire l'ensemble des tâches réalisées par un participant avec un dispositif – en plusieurs sous-parties pouvant être analysées individuellement. Si cela avait été possible, nous aurions pu nous pencher sur les patrons de mouvements oculaires à l'annonce de chaque tâche et étudier de manière plus approfondie la durée de chaque fixation oculaire. Cette limitation est une conséquence du dispositif d'enregistrement et d'analyse du suivi oculaire que nous avons utilisé. Une autre technologie d'oculométrie, telle que Smart Eye ou Tobii Fusion, offrirait le niveau de granularité désiré. Cependant, l'investissement financier est conséquent et n'a pas pu être réalisé pour cette maîtrise.

5.5 Limites de la recherche

À la fin d'un projet comme celui-ci, il est impératif de jeter un regard critique sur les décisions qui ont été prises durant son cours. Nous avons donc dressé la liste des différents points d'améliorations possibles dans le cadre d'une étude similaire.

Avec le recul, le plus grand problème de notre approche aura été d'établir un cycle de développement de l'environnement technologique qui fut chronophage. Pour cette raison, le logiciel *Unity* ainsi que le code des dispositifs n'ont pas été assez optimisés avant la tenue des sessions de test. Cela s'explique quand même par l'ampleur de la tâche : concevoir les maquettes et les interactions de tous les dispositifs, apprendre et appliquer les notions d'électronique nécessaire, et programmer un environnement de test complet en moins de 6 mois. Les problèmes d'approvisionnement des composantes électroniques ont aussi joué un rôle dans les délais de conception, alors que les difficultés des chaînes de production liées à la COVID-19 étaient encore bien présentes en début 2022. Malgré tout, nous aurions pu faire un meilleur travail d'itérer rapidement dans le dernier droit et de recueillir davantage de commentaires externes quant au fonctionnement des dispositifs pour atteindre un niveau de qualité supérieur. Avec des sessions de

prétests plus régulières, il est possible que les petits accros techniques avec les manipulations directes (c'est-à-dire le long ruban défilant) et le changement de taux selon la vitesse d'incrément des boutons rotatifs auraient pu être réglés, au moins partiellement. Les autres difficultés techniques, comme le bogue d'affichage intermittent des manipulations directes et les ratés de certains enregistrements de données, sont quant à elles le résultat d'un simple manque de temps. Même s'ils étaient connus bien avant le début des tests, l'effort et le temps nécessaire pour les régler ont été considérés comme trop grands et leur résolution a donc été mise de côté pour améliorer d'autres parties de l'expérience.

Puisque le projet de recherche avait lieu au tout début de mon parcours en recherche, la phase de conception s'est déroulée en même temps que mon apprentissage du domaine de la conception des postes de pilotage. Certaines bonnes pratiques ont donc été apprises trop tard et n'ont pas été intégrées à l'expérience. En particulier, j'ai utilisé une logique de sélection « au toucher du doigt », c'est-à-dire que l'interaction avec un élément de l'écran tactile était déclenchée dès que le doigt de l'utilisateur entrait en contact avec lui. J'ai appris plus tard que la sélection « au levé du doigt » était plutôt à privilégier dans ce contexte [34], [42], puisqu'elle permet à l'utilisateur d'annuler sa sélection en glissant son doigt hors de l'élément en question. Cette option est particulièrement utile dans un environnement vibrant puisque le risque de faux mouvement est plus élevé.

Une autre limite de notre expérience est qu'elle s'est déroulée à un seul niveau de vibration, et que le profil de turbulence utilisé n'était pas particulièrement fort et uniquement limité à un déplacement vertical. Il s'agissait quand même d'un choix délibéré dans le cas de notre recherche afin de conserver un nombre raisonnable de variables à observer. Il faut mentionner que l'environnement évalué ne représente qu'un cas de vibration du spectre de vibrations et de turbulences possibles dans un vol réel.

Le fait d'avoir réalisé l'expérience avec le joystick de la tâche de suivi à gauche ne représente évidemment pas une situation réaliste pour tous les avions. Dans les avions de ligne Airbus, le pilote manipule bel et bien un joystick de sa main gauche, alors que le co-pilote utilise plutôt sa main droite [60]. D'autres avions utilisent plutôt des manches à balai ou des joysticks pouvant être tenus uniquement avec la main droite, comme le Lockheed-Martin F35 [15].

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce mémoire aura permis d'approfondir l'état des connaissances en ce qui concerne l'intégration des écrans tactiles dans les postes de pilotage d'avion. Nous avons mené une étude comparative de sept dispositifs d'entrée de données mécaniques et tactiles, pour évaluer lesquels permettaient d'améliorer la performance du pilote et de réduire ses erreurs, tout en réduisant sa charge mentale et son inconfort physique. Le tout aura été évalué à travers une série de tâches réalistes propres à la tâche de pilotage d'aéronef.

Alors que les boutons rotatifs sont les dispositifs d'entrée de données les plus utilisés dans les cockpits à l'heure actuelle, les résultats de notre étude ont montré que les claviers numériques virtualisés sur l'écran tactile permettent une saisie numérique autrement plus rapide. De surcroît, un plus grand écart entre la valeur initiale et la valeur cible exacerbe l'écart de vitesse entre ces deux dispositifs. Dans le cas d'un écart plus petit entre ces deux valeurs, les boutons rotatifs sont cependant légèrement plus rapides. Ils produisent également moins d'erreurs, mais sont plus inconfortables s'ils sont placés à proximité de l'écran. Dans un cas comme dans l'autre, la charge mentale pour effectuer la tâche est minimale.

Parmi les autres dispositifs testés, ceux utilisant un mouvement de glissement sur l'écran tactile ont généralement produit les résultats les moins probants. Puisque ces mouvements nécessitent une précision continue, la vibration a eu un impact important sur la performance des dispositifs tactiles qui en faisaient usage. La vitesse de complétion des tâches et le taux d'erreurs se trouvaient augmentés, ce qui créait également un sentiment de frustration chez les utilisateurs.

De nos résultats émane une série de recommandations visant à établir de bonnes pratiques de conception d'interfaces pour les applications sujettes à un niveau de turbulence faible à moyen:

- Préférer la sélection tactile directe aux dispositifs mécaniques pour la sélection ponctuelle de zones cliquables de l'interface.
- Dans la majorité des contextes où une entrée de données numériques est nécessaire, le clavier numérique virtuel est le dispositif à prioriser. Il permet la saisie la plus rapide en moyenne, en plus d'être reconnaissable, utilisable, confortable et peu demandant mentalement. D'autres recherches doivent toutefois être menées pour vérifier son efficacité à des intensités de vibration plus élevés.

- Les mouvements de glissement sur l'écran tactile doivent être évités dans les environnements vibrants. Ils présentent une faible précision et engendrent conséquemment beaucoup de frustration chez les utilisateurs. Nous anticipons que des vibrations plus fortes exacerberaient ces caractéristiques.
- Afin d'anticiper le lien entre l'utilisation d'un dispositif et la précision à une tâche de suivi, il faut considérer deux variables. Le temps de complétion est celle qui a la plus grande influence: plus le dispositif est rapide, plus le suivi sera précis. Puis, la distance entre le dispositif (par exemple, la position du clavier numérique sur l'écran) et la tâche de suivi joue aussi un rôle. À temps de complétion égal, le dispositif plus éloigné de la tâche de suivi engendrera une performance moindre.

Une voie prometteuse pour de futurs travaux de recherche serait d'évaluer des dispositifs ne nécessitant aucune interaction, notamment la technologie voix-vers-texte (*speech-to-text*) pour dicter l'entrée de données numériques; ou encore la reconnaissance du mouvement des doigts (*mid-air interaction*) permettant d'interagir avec un système sans jamais y toucher [61]. Maintenant que nous savons que les claviers numériques virtuels peuvent adéquatement remplacer les dispositifs mécaniques, il reste un travail d'optimisation à effectuer: tester divers emplacements sur l'écran, différentes tailles de claviers et dispositions de touches. De même, de prochains travaux peuvent investiguer des mécanismes de mitigation des effets de la vibration afin de réduire le nombre d'erreurs tout en conservant la même vitesse de complétion [62].

La présente recherche s'inscrit comme une première étape dans le projet de recherche ADAIR (*Advanced airspace usability*), mis en place par Prof. Philippe Doyon-Poulin. Les autres étudiants impliqués dans ce projet pourront donc bénéficier des résultats pour leurs propres projets de conceptions d'interfaces destinées au poste de pilotage du futur.

RÉFÉRENCES

- [1] A. K. Orphanides et C. S. Nam, « Touchscreen interfaces in context: A systematic review of research into touchscreens across settings, populations, and implementations », *Applied Ergonomics*, vol. 61, p. 116-143, mai 2017, doi: 10.1016/j.apergo.2017.01.013.
- [2] P. D. Williams, « Increased light, moderate, and severe clear-air turbulence in response to climate change », *Adv. Atmos. Sci.*, vol. 34, n° 5, p. 576-586, mai 2017, doi: 10.1007/s00376-017-6268-2.
- [3] J. A. Dibble, « What the Birkman Method© Can Tell Us about the Psychological Profile of Business Aviation Department », *The International Journal of Aerospace Psychology*, vol. 32, n° 4, p. 307-317, 2022.
- [4] C. J. Lin, C. N. Liu, C. J. Chao, et H. J. Chen, « The performance of computer input devices in a vibration environment », *Ergonomics*, vol. 53, n° 4, p. 478-490, avr. 2010, doi: 10.1080/00140130903528186.
- [5] J. O. Wobbrock, E. Cutrell, S. Harada, et I. S. MacKenzie, « An error model for pointing based on Fitts' law », dans *Proceeding of the twenty-sixth annual CHI conference on Human factors in computing systems - CHI '08*, Florence, Italy: ACM Press, 2008, p. 1613. doi: 10.1145/1357054.1357306.
- [6] A. Cockburn *et al.*, « Turbulent Touch: Touchscreen Input for Cockpit Flight Displays », dans *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Denver Colorado USA: ACM, mai 2017, p. 6742-6753. doi: 10.1145/3025453.3025584.
- [7] N. A. Stanton, C. Harvey, K. L. Plant, et L. Bolton, « To twist, roll, stroke or poke? A study of input devices for menu navigation in the cockpit », *Ergonomics*, vol. 56, n° 4, p. 590-611, avr. 2013, doi: 10.1080/00140139.2012.751458.
- [8] C. Harvey, N. A. Stanton, C. A. Pickering, M. McDonald, et P. Zheng, « To twist or poke? A method for identifying usability issues with the rotary controller and touch screen for control of in-vehicle information systems », *Ergonomics*, vol. 54, n° 7, p. 609-625, juill. 2011, doi: 10.1080/00140139.2011.586063.
- [9] W. A. Rogers, A. D. Fisk, A. C. McLaughlin, et R. Pak, « Touch a Screen or Turn a Knob: Choosing the Best Device for the Job », *Hum Factors*, vol. 47, n° 2, p. 271-288, juin 2005, doi: 10.1518/0018720054679452.
- [10] A. Rydström, R. Broström, et P. Bengtsson, « A comparison of two contemporary types of in-car multifunctional interfaces », *Applied Ergonomics*, vol. 43, n° 3, p. 507-514, mai 2012, doi: 10.1016/j.apergo.2011.08.004.
- [11] M. R. Bhalla et A. V. Bhalla, « Comparative Study of Various Touchscreen Technologies », *IJCA*, vol. 6, n° 8, p. 12-18, sept. 2010, doi: 10.5120/1097-1433.
- [12] S. Kaminani, « Human computer interaction issues with touch screen interfaces in the flight deck », dans *2011 IEEE/AIAA 30th Digital Avionics Systems Conference*, Seattle, WA, USA: IEEE, oct. 2011, p. 6B4-1-6B4-7. doi: 10.1109/DASC.2011.6096098.

- [13] Garmin et G. L. or its subsidiaries, « Garmin G3X Touch™ Flight Displays for Certificated Aircraft », *Garmin*, 2022. <https://www.garmin.com/en-US/p/682215> (consulté le 30 novembre 2022).
- [14] Rockwell Collins, « Boeing 777X to feature touchscreen flight displays from Rockwell Collins », *Skies Mag*, 2016. <https://skiesmag.com/press-releases/boeing-777x-feature-touchscreen-flight-displays-rockwell-collins/> (consulté le 30 novembre 2022).
- [15] Lockheed Martin, « Ctrl + P: 3D Printing an F-35 Cockpit », *Lockheed Martin*, 26 janvier 2023. <https://www.lockheedmartin.com/en-us/news/features/2023/ctrl-p-3d-printing-an-f-35-cockpit.html> (consulté le 7 février 2023).
- [16] I. S. Mackenzie et W. Buxton, « A comparison of input devices in element pointing and dragging tasks », dans *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, 1991, p. 161-166.
- [17] P. M. Fitts, « The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement », *Journal of experimental psychology*, vol. 47, n° 6, p. 381, 1954.
- [18] Wang, D. Tao, J. Cai, et X. Qu, « Effects of vibration and target size on the use of varied computer input devices in basic human-computer interaction tasks », *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, vol. 32, n° 2, p. 199-213, mars 2022, doi: 10.1002/hfm.20938.
- [19] International Organization for Standardization, « Mechanical vibration and shock-evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 1: General Requirements. », ISO 2631–1, 1997.
- [20] A. J. Schachner, « Usability of Avionic Touchscreens Under Vibration: Supported versus Freehand Target Selection in Cockpit Conditions », masters, Polytechnique Montréal, 2022. Consulté le: 16 février 2023. [En ligne]. Disponible à: <https://publications.polymtl.ca/10321/>
- [21] H. Avsar, J. E. Fischer, et T. Rodden, « Designing touch screen user interfaces for future flight deck operations », dans *2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, Sacramento, CA, USA: IEEE, sept. 2016, p. 1-9. doi: 10.1109/DASC.2016.7777976.
- [22] R. A. Wynne, K. J. Parnell, M. A. Smith, K. L. Plant, et N. A. Stanton, « Can't Touch This: Hammer Time on Touchscreen Task Performance Variability under Simulated Turbulent Flight Conditions », *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 37, n° 7, p. 666-679, avr. 2021, doi: 10.1080/10447318.2021.1890492.
- [23] J. Brooke, « SUS: A “Quick and Dirty” Usability Scale », *Usability evaluation in industry*, vol. 189, n° 194, p. 4-7, 1996.
- [24] A. Alapetite, E. Møllenbach, A. Stockmarr, et K. Minakata, « A Rollercoaster to Model Touch Interactions during Turbulence », *Advances in Human-Computer Interaction*, vol. 2018, p. 1-16, oct. 2018, doi: 10.1155/2018/2698635.
- [25] K. M. Plewa, T. R. Eger, M. L. Oliver, et J. P. Dickey, « Comparison between ISO 2631–1 Comfort Prediction Equations and Self-Reported Comfort Values during Occupational Exposure to Whole-Body Vehicular Vibration », *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, vol. 31, n° 1, p. 43-53, mars 2012, doi: 10.1260/0263-0923.31.1.43.

- [26] K. McDowell, K. A. Rider, N. Truong, et V. J. Paul, « Effects of Ride Motion on Reaction Times for Reaching Tasks », *SAE Transactions*, vol. 114, p. 108-115, avr. 2005, doi: 10.4271/2005-01-1411.
- [27] W. E. Hick, « On the Rate of Gain of Information », *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, vol. 4, n° 1, p. 11-26, mars 1952, doi: 10.1080/17470215208416600.
- [28] R. Hyman, « Stimulus information as a determinant of reaction time. », *Journal of Experimental Psychology*, vol. 45, n° 3, p. 188-196, 1953, doi: 10.1037/h0056940.
- [29] Y.-J. Yau, C.-J. Chao, et S.-L. Hwang, « Effects of Input Device and Motion Type on a Cursor-Positioning Task », *Percept Mot Skills*, vol. 106, n° 1, p. 76-90, févr. 2008, doi: 10.2466/pms.106.1.76-90.
- [30] P. M. Salmon, M. G. Lenné, T. Triggs, N. Goode, M. Cornelissen, et V. Demczuk, « The effects of motion on in-vehicle touch screen system operation: A battle management system case study », *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 14, n° 6, p. 494-503, nov. 2011, doi: 10.1016/j.trf.2011.08.002.
- [31] N. Goode, M. G. Lenné, et P. Salmon, « The impact of on-road motion on BMS touch screen device operation », *Ergonomics*, vol. 55, n° 9, p. 986-996, sept. 2012, doi: 10.1080/00140139.2012.685496.
- [32] N. Mansfield, Y. Arora, et A. Rimell, « Computer Use on Moving Trains: Which Pointing Device? », dans *Contemporary Ergonomics 2007*, 1^{re} éd. Taylor & Francis, 2007, p. 255-260. doi: 10.1201/9781315106595-40.
- [33] T. Baldus et P. Patterson, « Usability of pointing devices for office applications in a moving off-road environment », *Applied Ergonomics*, vol. 39, n° 6, p. 671-677, nov. 2008, doi: 10.1016/j.apergo.2008.01.004.
- [34] S. Mayer, H. V. Le, A. Nesti, N. Henze, H. H. Bülthoff, et L. L. Chuang, « The Effect of Road Bumps on Touch Interaction in Cars », dans *Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, Toronto ON Canada: ACM, sept. 2018, p. 85-93. doi: 10.1145/3239060.3239071.
- [35] L. V. Coutts *et al.*, « Future technology on the flight deck: assessing the use of touchscreens in vibration environments », *Ergonomics*, vol. 62, n° 2, p. 286-304, févr. 2019, doi: 10.1080/00140139.2018.1552013.
- [36] A. Hamon, P. Palanque, R. André, E. Barboni, M. Cronel, et D. Navarre, « Multi-Touch interactions for control and display in interactive cockpits: issues and a proposal », dans *Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace - HCI-Aero '14*, Santa Clara, California: ACM Press, 2014, p. 1-10. doi: 10.1145/2669592.2669650.
- [37] S. Dodd, J. Lancaster, B. DeMers, et S. Boswell, « Multi-Touch Touch Screens on the Flight Deck: The Impact of Display Location, Display Inclination Angle and Gesture Type on Pilot Performance », dans *2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, San Diego, CA, USA: IEEE, sept. 2019, p. 1-10. doi: 10.1109/DASC43569.2019.9081723.

- [38] M. Smith, L. V. Coutts, et K. L. Plant, « Investigating the Usability of Touchscreens in a Turbulent Flight Deck », dans *2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, London: IEEE, sept. 2018, p. 1-10. doi: 10.1109/DASC.2018.8569749.
- [39] Y. Wan, J. C. Prinet, et N. Sarter, « Visual and auditory feedback to improve touchscreen usability in turbulence », dans *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, sept. 2017, p. 89-93. doi: 10.1177/1541931213601488.
- [40] S. Lee et S. Zhai, « The performance of touch screen soft buttons », dans *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Boston MA USA: ACM, avr. 2009, p. 309-318. doi: 10.1145/1518701.1518750.
- [41] C. Spence et V. Santangelo, « Capturing spatial attention with multisensory cues: A review », *Hearing Research*, vol. 258, n° 1-2, p. 134-142, déc. 2009, doi: 10.1016/j.heares.2009.04.015.
- [42] L. Wang, Y. Chen, et Y. Wang, « Survey on Introducing touch-screen into civil aircraft cockpit: Opinions of aircraft designers and pilots », dans *CSAA/IET International Conference on Aircraft Utility Systems, AUS 2018*, Guiyang, China: Institution of Engineering and Technology, 2018, p. 1260-1265.
- [43] S. R. Dodd, J. Lancaster, S. Grothe, B. DeMers, B. Rogers, et A. Miranda, « Touch on the Flight Deck: The Impact of Display Location, Size, Touch Technology & Turbulence on Pilot Performance », *2014 IEEE/AIAA 33rd Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, p. 2C3-1, 2014.
- [44] W. Rouwhorst *et al.*, « Use of touch screen display applications for aircraft flight control », dans *2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, St. Petersburg, FL: IEEE, sept. 2017, p. 1-10. doi: 10.1109/DASC.2017.8102060.
- [45] N. C. M. van Zon, C. Borst, D. M. Pool, et M. M. van Paassen, « Touchscreens for Aircraft Navigation Tasks: Comparing Accuracy and Throughput of Three Flight Deck Interfaces Using Fitts' Law », *Hum Factors*, vol. 62, n° 6, p. 897-908, sept. 2020, doi: 10.1177/0018720819862146.
- [46] « MIL-STD-1472H: Department of Defense Design Criteria Standard - Human Engineering », United States of America Department of Defense, 2020.
- [47] H. Grahn et T. Kujala, « Impacts of Touch Screen Size, User Interface Design, and Subtask Boundaries on In-Car Task's Visual Demand and Driver Distraction », *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 142, p. 102467, oct. 2020, doi: 10.1016/j.ijhcs.2020.102467.
- [48] S. Kaminani et R. Collins, « Touch screen technology in flight deck, how far is it helpful? », dans *2012 IEEE/AIAA 31st Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, Williamsburg, VA: IEEE, oct. 2012, p. 2D3-1-2D3-5. doi: 10.1109/DASC.2012.6382292.
- [49] M. Giebelhausen, S. G. Robinson, N. J. Sirianni, et M. K. Brady, « Touch Versus Tech: When Technology Functions as a Barrier or a Benefit to Service Encounters », *Journal of Marketing*, vol. 78, n° 4, p. 113-124, 2014.
- [50] H. Jeong et Y. Liu, « Effects of touchscreen gesture's type and direction on finger-touch input performance and subjective ratings », *Ergonomics*, vol. 60, n° 11, p. 1528-1539, nov. 2017, doi: 10.1080/00140139.2017.1313457.

- [51] A. Alapetite *et al.*, « Direct tactile manipulation of the flight plan in a modern aircraft cockpit », *Proc. of HCI Aero*, 2012.
- [52] M. Papadatou-Pastou *et al.*, « Human handedness: A meta-analysis. », *Psychological Bulletin*, vol. 146, n° 6, p. 481-524, juin 2020, doi: 10.1037/bul0000229.
- [53] National Aeronautics and Space Administration [NASA], « MATB-II », *MATB-II*. <https://matb.larc.nasa.gov/> (consulté le 25 octobre 2022).
- [54] MIL-STD-1472H, Department of Defense Design Criteria Standard Human Engineering, 2020.
- [55] S. G. Hart et L. E. Staveland, « Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research », dans *Advances in Psychology*, Elsevier, 1988, p. 139-183. doi: 10.1016/S0166-4115(08)62386-9.
- [56] G. Borg, *Borg's perceived exertion and pain scales*. Human Kinetics, 1998.
- [57] M. A. Smith, K. L. Plant, K. J. Parnell, R. A. Wynne, et N. A. Stanton, « Investigating the Usability of Touchscreen Interfaces in a Turbulent Flight Deck – For Panning and Numeric Data Entry Tasks », dans *SID Symposium Digest of Technical Papers*, août 2020, p. 1438-1441. doi: 10.1002/sdtp.14158.
- [58] R. A. Grier, « How High is High? A Meta-Analysis of NASA-TLX Global Workload Scores », *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, vol. 59, n° 1, p. 1727-1731, sept. 2015, doi: 10.1177/1541931215591373.
- [59] N. Swaminathan, S. R. P. Reddy, K. RajaShekara, et K. S. Haran, « Flying Cars and eVTOLs—Technology Advancements, Powertrain Architectures, and Design », *IEEE Trans. Transp. Electrific.*, vol. 8, n° 4, p. 4105-4117, déc. 2022, doi: 10.1109/TTE.2022.3172960.
- [60] Airbus, « Cockpits | Airbus », *Airbus*, 16 juin 2021. <https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/cockpits> (consulté le 7 février 2023).
- [61] B. I. Ahmad *et al.*, « Touchless Selection Schemes for Intelligent Automotive User Interfaces With Predictive Mid-Air Touch »:, *International Journal of Mobile Human Computer Interaction*, vol. 11, n° 3, p. 18-39, juill. 2019, doi: 10.4018/IJMHCI.2019070102.
- [62] G. R. Henderson, P. R. Hickman, et L. P. Bolton, « Correction of vibration-induced error for touch screen display in an aircraft », 10,996,793, 2021

ANNEXE A TABLEAU SYNTHÈSE

Table A-1 Synthèse de la littérature

Article	Variables			Résultats (performance de l'écran tactile: positif, mitigé, négatif)					
	Dispositifs testés	Intensité et/ou type de vibration	Type de tâche et tailles de zones cliquables	Temps de complétion	Débit	Taux d'erreur	Charge mentale	Confort	Utilisabilité
Baldus et Patterson, 2008	- Écran tactile - Souris - Pavé tactile	- Aucune - Vibration "normale" de tracteur à 7,5 km/h	Sélection de cibles (menus) - 1,3 x 0,7 cm - 2,0 x 0,8 cm	Souris et écran tactile plus rapides que pavé tactile.	Débit plus grand pour l'écran tactile.	X	X	Souris plus confortable que pavé et écran tactiles.	Souris plus utilisable que pavé et écran tactiles.
Yau et al., 2008	- Écran tactile - Boule de commande	- Aucune - Pilonnement (non quantifiée) - Roulis (non quantifiée) - Tangage (non quantifiée) - Aléatoire (combinaison des trois; non quantifiée)	Sélection de cibles - 0,6 cm	Écran tactile plus rapide que boule de commande.	X	Plus d'erreurs avec l'écran tactile que la boule de commande.	X	Boule de commande plus confortable que l'écran tactile.	X
Lin et al., 2010	- Écran tactile - Souris - Boule de commande	- Aucune - 0,22 m/s ² (simulation de vague) - 0,34 m/s ² (simulation de vague)	Sélection de cibles - 1,5 cm - 2,0 cm - 2,5 cm	Écran tactile plus rapide que souris et boule de commande, peu importe la vibration.	Débit plus grand pour l'écran tactile et la souris, peu importe la vibration.	- Plus d'erreurs avec l'écran tactile si vibration - Plus d'erreurs avec l'écran tactile pour cibles plus petites que 2,5 cm.	X	X	X
Stanton et al., 2013	- Écran tactile - Boule de commande - Pavé tactile - Bouton rotatif	X	Sélection de cibles (menus) - Taille non définie	Écran tactile plus rapide que les autres dispositifs.	X	Plus d'erreurs avec l'écran tactile que le bouton rotatif, mais pas plus que la boule de commande et le pavé tactile.	Pas de différence selon le dispositif.	Écran tactile moins confortable que les autres.	Écran tactile plus utilisable que les autres.
Cockburn et al., 2017	- Écran tactile - Boule de commande	- Aucune - 1,10 m/s ² - 2,15 m/s ²	Sélection de cibles - 0,8 cm - 1,6 cm	Écran tactile plus rapide que boule de commande pour grandes cibles, pas de différence pour petites cibles. Résultats cohérents peu importe la vibration.	X	X	Frustration plus grande avec écran tactile.	Pas de différence selon le dispositif.	X
			Entrée de données numériques - 2,6 cm	Écran tactile plus rapide que boule de commande, peu importe la vibration.	X	Plus d'erreurs avec l'écran tactile que la boule de commande.			
			Glisser-déposer - Taille non définie	X (pas rapporté, trop d'erreurs)	X	Moins d'erreurs avec l'écran tactile sans vibration, mais plus avec vibrations fortes.			
Wynne et al., 2021	- Écran tactile - Bouton rotatif	- Aucune - 0,37 m/s ² (vertical) - 0,26 m/s ² (omnidirectionnel) - 0,52 m/s ² (omnidirectionnel)	Entrée de données numériques - Taille variable selon le type d'interaction tactile	Écran tactile (plus particulièrement le clavier numérique virtuel) plus rapide que le bouton rotatif, peu importe la vibration.	X	X	X	X	Utilisabilité plus élevée pour l'écran tactile (plus particulièrement le clavier numérique virtuel) que le bouton rotatif, peu importe la vibration.
Wang et al., 2022	- Écran tactile - Souris - Boule de commande - Capture des mains	-Aucune - Latéral (non quantifiée) - Avant-arrière (non quantifiée) - Omnidirectionnelle (non quantifiée)	Sélection de cibles - 0,8 cm - 1,3 cm	Écran tactile et souris plus rapides que les autres dispositifs, peu importe la vibration et la taille de cibles.	X	- Plus d'erreurs avec l'écran tactile que la souris et la boule de commande pour la vibration latérale et omnidirectionnelle. - Plus d'erreurs avec l'écran tactile que la souris et la boule de commande pour les petites cibles.	Charge mentale plus faible pour l'écran tactile et la souris que les autres dispositifs, peu importe la vibration.	X	X
			Glisser-déposer - 2,0 cm - 3,0 cm	Écran tactile et souris plus rapides que les autres dispositifs, peu importe la vibration et la taille de cibles.	X	Plus d'erreurs avec l'écran tactile que la souris pour la vibration latérale et omnidirectionnelle. Peu d'impact de la taille de cible.		X	X

ANNEXE B APPROBATION ÉTHIQUE – CER-2122-55-D

CER-2122-55-D

POLYTECHNIQUE
MONTRÉAL

UNIVERSITÉ
D'INGÉNIERIE



Montréal, le 7 avril 2022

Objet: Approbation éthique – « Interactions sous vibration: Effets du dispositif d'entrée de données sur la sélection des modes de vol » - Projet CER-2122-55-D

M. Charles-Antoine Lanoix,

J'ai le plaisir de vous informer que le Comité d'éthique de la recherche, selon les procédures en vigueur, en vertu des documents qui lui ont été fournis, a examiné le projet de recherche susmentionné et conclu que ce dernier répond aux normes en vigueur au chapitre de l'éthique de la recherche énoncées dans la *Politique en matière d'éthique de la recherche avec des êtres humains* de Polytechnique Montréal.

Veillez noter que le présent certificat est valable pour une durée d'un an, soit du 7 avril 2022 au 8 avril 2023, pour le projet tel qu'approuvé au Comité d'éthique de la recherche avec des êtres humains.

Veillez noter que conformément aux exigences auxquelles l'institution et son personnel sont assujettis afin d'être admissibles aux fonds des organismes subventionnaires, il est de votre responsabilité de déposer au CÉR un rapport annuel ou un rapport final avant l'expiration de la présente approbation éthique afin de l'informer de l'avancement de vos travaux. Le formulaire à remplir est disponible à l'adresse suivante : (<http://www.polymtl.ca/recherche/formulaires-et-guides>).

De plus, il est de votre responsabilité d'informer le CER de toute modification importante qui pourrait être apportée au protocole expérimental avant sa mise en œuvre, de même que de tout élément ou événement imprévu pouvant avoir une incidence sur le bien-être ou l'intégrité des participant(e)s impliqué(e)s dans le projet de recherche. Nous vous invitons aussi à nous signaler tout problème susceptible d'avoir une incidence sur les membres de l'équipe de recherche.

Je vous souhaite bonne chance dans la poursuite de vos travaux.

Nous vous prions d'agréer, Monsieur, l'expression de nos sentiments les meilleurs,

Farida Cheriet, présidente
Comité d'éthique de la recherche
Polytechnique Montréal

c.c. Direction de la formation et de la recherche; Service des Finances
Philippe Doyon-Poulin, Professeur adjoint, Département de mathématiques et de génie industriel

Cochercheurs
p.j. Certificat # CER-2122-55-D

CER-2122-55-D

**POLYTECHNIQUE
MONTREAL**

UNIVERSITÉ
D'INGÉNIERIE



CERTIFICAT D'APPROBATION ÉTHIQUE

Le Comité d'éthique de la recherche de Polytechnique Montréal, selon les procédures en vigueur, en vertu des documents qui lui ont été fournis, a examiné le projet de recherche suivant et conclu qu'il respecte les règles d'éthique énoncées dans sa Politique en matière d'éthique de la recherche avec des êtres humains.

Projet	
Titre du projet	Interactions sous vibration: Effets du dispositif d'entrée de données sur la sélection des modes de vol CER-2122-55-D
Étudiant requérant	Charles-Antoine Lanoix , Candidat au PhD, Département de mathématiques et de génie industriel
Sous la direction de:	Philippe Doyon-Poulin, Professeur adjoint , Département de mathématiques et de génie industriel, Polytechnique Montréal
Avec la collaboration de:	Alexandre Ferreira Benevides, Marc Charbonneau (PolyMTL-LESIAQ) & Adam Schachner (CMC Electronique)


Financement	
Organisme	Fonds de démarrage de Philippe Doyon-Poulin / Stage rémunéré
No de UBR	
Programme	
No d'octroi:	
Titre original de l'octroi:	
Chercheur principal:	

MODALITÉS D'APPLICATION

Toute modification importante qui pourrait être apportée au protocole expérimental doit être transmise au Comité avant sa mise en œuvre.

L'équipe de recherche doit informer le Comité de tout élément ou évènement imprévu pouvant avoir une incidence sur le bien-être ou l'intégrité des participant(e)s impliqué(e)s dans le projet de recherche ainsi que tout problème susceptible d'avoir une incidence sur les membres de l'équipe de recherche.

Selon les règles universitaires en vigueur, un suivi annuel est minimalement exigé pour maintenir la validité de la présente approbation éthique, et ce, jusqu'à la fin du projet. Le questionnaire de suivi est disponible sur la page web du Comité.


 Ferida Cheriet, présidente
 Comité d'éthique de la recherche
 Polytechnique Montréal

Date de délivrance :
7 avril 2022

Date de fin de validité :
1er mai 2023

Date du prochain
 suivi :
8 avril 2023

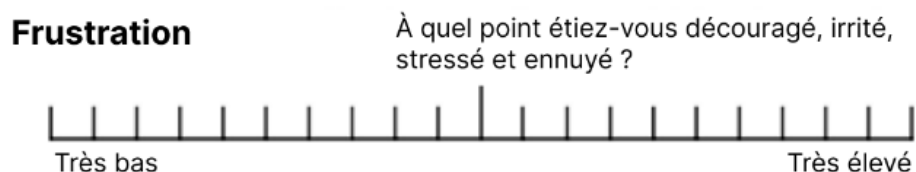
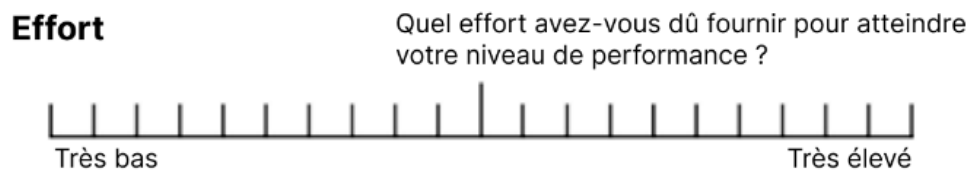
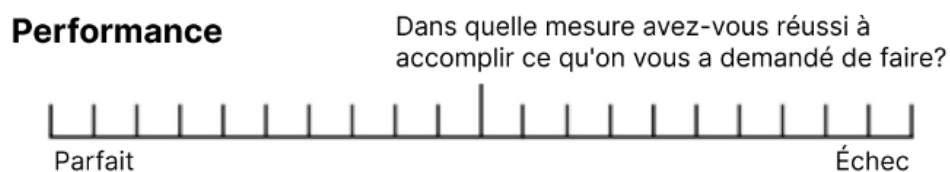
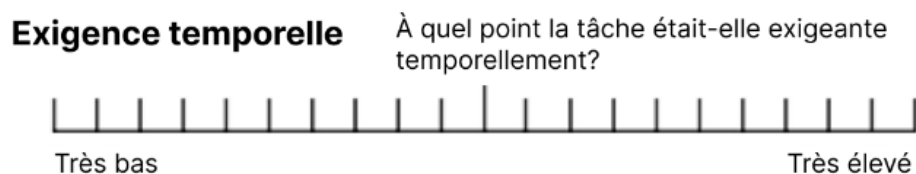
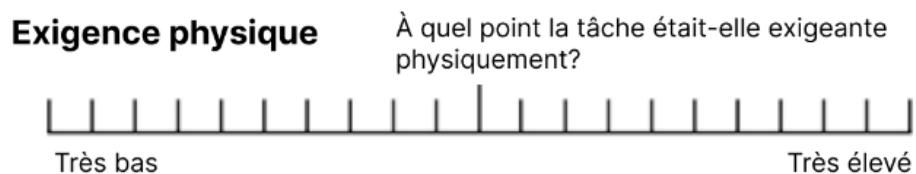
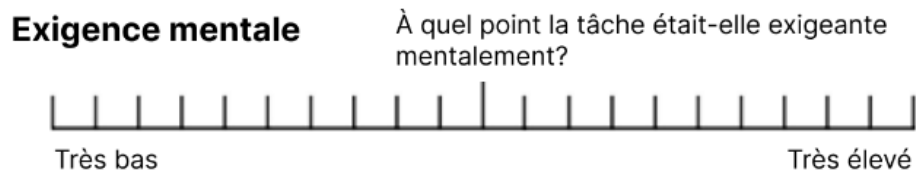
Comité d'éthique de la recherche
 avec des êtres humains
 Tél.: 514 340-4711 poste : 3755
 Fax : 514 340-4992
 Courriel : ethique@polymtl.ca

Adresse postale
 C.P. 6079, succ. Centre-Ville
 Montréal (Québec) Canada H3C 3A7

Campus de l'Université de Montréal
 2900, boul. Édouard-Montpetit
 2500, chemin de Polytechnique
 Montréal (Québec) Canada H3T1J4

ANNEXE C QUESTIONNAIRE NASA-TLX

Version française:



ANNEXE D QUESTIONNAIRE D'UTILISABILITÉ

Version française:

1. Sur une échelle de 1 à 5, 1 étant très difficile et 5 étant très facile, quel était le niveau de difficulté du dispositif pour effectuer des **petites modifications de valeurs**? Pourquoi?
2. Sur une échelle de 1 à 5, 1 étant très difficile et 5 étant très facile, quel était le niveau de difficulté du dispositif pour effectuer de **grandes modifications de valeurs**? Pourquoi?
3. Sur une échelle de 1 à 5, 1 étant très lent et 5 étant très rapide, quelle était votre perception de la **vitesse** à laquelle vous pouviez effectuer des modifications de valeurs avec ce dispositif?
4. Qu'avez-vous apprécié et moins apprécié de ce dispositif? Pourquoi?
5. Selon votre appréciation générale, classez ce dispositif d'entrée de données par rapport aux dispositifs précédents (s'il y a lieu).

Version anglaise:

1. On a scale of 1 to 5, with 1 being very difficult and 5 being very easy, how difficult was it to make **small value changes** using this device? Why?
2. On a scale of 1 to 5, with 1 being very difficult and 5 being very easy, how difficult was it to make **large value changes** using this device? Why?
3. On a scale of 1 to 5, with 1 being very slow and 5 being very fast, what was your perception of the **speed** at which you could make value changes with this device?
4. What did you like and dislike about this device? Why?
5. Based on your overall assessment, rank this data entry device in comparison to previous devices (if applicable).

ANNEXE E ÉCHELLE DE BORG CR-10

Version française :

Pour le dispositif testé, caractérisez l'inconfort ressenti avec une note (colonne de gauche) pour chacune des parties du corps suivantes:

- L'épaule droite
- Le cou
- Le haut du dos
- Le bas du dos
- Le bras droit
- La main et le poignet droits

Borg CR10 Scale® (2010)²⁰		
0	Rien du tout	
0.3		
0.5	Extrêmement faible	Tout juste perceptible
0.7		
1	Très faible	
1.5		
2	Faible	Léger
2.5		
3	Modéré	
4		
5	Fort	Intense
6		
7	Très fort	
8		
9		
10	Extrêmement fort	"Maximal"
11		
∫		
•	Maximum absolu	Plus haut possible

Version anglaise :

For the device tested, characterize the discomfort felt with a note (left column) for each of the following body parts:

- Right shoulder
- Neck
- Upper back
- Lower back
- Right arm
- The right hand and wrist

Borg CR10 Scale® (2010)²⁰		
0	Nothing at all	
0.3		
0.5	Extremely weak	Just noticeable
0.7		
1	Very weak	
1.5		
2	Weak	Light
2.5		
3	Moderate	
4		
5	Strong	Heavy
6		
7	Very strong	
8		
9		
10	Extremely strong	“Maximal”
11		
∫		
•	Absolute maximum	Highest possible