



HAL
open science

Comprendre et concevoir l'interaction par microgestes

Adrien Chaffangeon Caillet

► **To cite this version:**

Adrien Chaffangeon Caillet. Comprendre et concevoir l'interaction par microgestes. Interface homme-machine [cs.HC]. Université Grenoble Alpes, 2023. Français. NNT : 2023GRALM088 . tel-04359801v2

HAL Id: tel-04359801

<https://hal.science/tel-04359801v2>

Submitted on 11 Jul 2024

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

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

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

École doctorale : MSTII - Mathématiques, Sciences et technologies de l'information, Informatique

Spécialité : Informatique

Unité de recherche : Laboratoire d'Informatique de Grenoble

Comprendre et concevoir l'interaction par microgeste *Understanding and designing microgesture interaction*

Présentée par :

Adrien CHAFFANGEON CAILLET

Direction de thèse

Laurence NIGAY

Professeure des universités, *Université Grenoble Alpes*

Directrice de thèse

Alix GOGUEY

Maître de conférence, *Université Grenoble Alpes*

Co-encadrant de thèse

Rapporteurs :

Michel BEAUDOUIN-LAFON

Professeur des universités, *Université Paris-Saclay*

Géry CASIEZ

Professeur des universités, *Université de Lille*

Thèse soutenue publiquement le 18/12/2023, devant le jury composé de :

Emmanuel DUBOIS

Professeur des universités, *Université de Toulouse*

Président

Michel BEAUDOUIN-LAFON

Professeur des universités, *Université Paris-Saclay*

Rapporteur

Géry CASIEZ

Professeur des universités, *Université de Lille*

Rapporteur

Fanny CHEVALIER

Assistant professor, *University of Toronto*

Examinatrice

Frédéric NOËL

Professeur des universités, *Grenoble INP*

Examineur



Remerciements

Enfin !

Après 10 ans d'études, je suis enfin arrivé au bout du chemin qui m'a mené à défendre le grade de docteur. Depuis mon premier stage dans le monde de la recherche en 3ème, beaucoup d'eau, mais surtout beaucoup d'encre et de sueur ont coulé.

Tout d'abord, je tiens à remercier ma directrice de thèse, Laurence Nigay, qui m'accompagne depuis le début de l'ENS et m'aide à construire une carrière axée sur la recherche en interaction humain-machine. Grâce à ses conseils et à son soutien, j'ai pu partir vivre en Suisse et au Canada, des expériences qui ont eu un impact majeur sur ma vie personnelle et professionnelle. Merci d'avoir investi en moi et de m'avoir permis d'écrire ce manuscrit. Je tiens également à remercier mon encadrant de thèse Alix Goguy, sans qui cette thèse et mes présentations auraient pris une tout autre direction artistique. Merci d'avoir toujours pris le temps quand j'en avais besoin. Enfin, je les remercie tous les deux pour leurs conseils, mais surtout pour leur confiance et la liberté qu'ils m'ont laissée dans mes projets de recherche. Je remercie également mes rapporteurs Géry Casiez et Michel Beaudouin-Lafon pour avoir accepté de relire et évaluer cette thèse. Je remercie aussi mes examinateurs Emmanuel Dubois, Fanny Chevalier et Frédéric Noël pour avoir accepté de participer à mon jury. C'est un honneur pour moi d'avoir ces cinq personnes dans mon jury. Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé dans la réalisation des projets de cette thèse, à commencer par mes stagiaires Matthieu, Carla, Vincent et Pedro, ainsi qu'Aurélien, Mike et Zhuzhi pour leur aide dans la conception des prototypes, mais aussi François pour nos discussions sur la RA/RV. Enfin, j'aimerais remercier toutes les personnes du laboratoire qui ont rendu l'expérience tellement plus chaleureuse, comme Gauthier, Laura, Vincent, Ophélie, Yidong, Elliott, et l'équipe IIHM plus globalement.

Cependant, une thèse réussie nécessite aussi un environnement sain en dehors du laboratoire. Pour cela, je dois évidemment remercier Claire et Diane pour leur soutien émotionnel durant les phases les plus difficiles de cette thèse, avant cette thèse et certainement après cette thèse. Je tiens également à remercier l'amicale des anciens, un peu par obligation, mais sans qui je serais sûrement devenu accro à WOW et n'aurais pas réussi en classe prépa. Je remercie ma mère, pour son soutien indéfectible et son investissement dans mes études, dont la relecture de cette thèse. Je remercie mon frère de continuer à subir les expériences de son frère, même à l'âge adulte. Je remercie mon père, qui m'a donné le goût de la science

et du système D. Plus généralement, je remercie ma famille, en particulier mes grands-parents qui ont participé à relecture de cette thèse, mais aussi Elios et tous ceux qui sont venus à ma soutenance.

Enfin, tu fais partie de ma vie depuis 2 ans maintenant et cette thèse n'aurait pas été possible sans toi, merci Noémie d'être là et d'être toi.

Résumé

Comprendre et concevoir l'interaction par microgestes

FR Au cours des trente dernières années, certains objets de notre quotidien se sont progressivement mués en véritables ordinateurs. Nos modes de vie changent avec ces mutations et il n'est pas rare que nous interagissions avec ces ordinateurs tout en effectuant d'autres tâches, p. ex. en vérifiant notre position GPS sur notre montre connectée pendant nos sorties vélo. Au cours de la dernière décennie, une nouvelle modalité d'interaction est apparue pour répondre à ces besoins : les microgestes de la main. Les microgestes de la main, simplifiés en microgestes, sont des mouvements rapides et subtils des doigts. Ils permettent d'interagir parallèlement à une tâche principale, car ils sont rapides et réalisables en tenant un objet. Cependant, s'agissant d'une modalité récente, le domaine de recherche manque encore de structure et parfois de cohérence. Il n'existe, par exemple, aucune convention pour nommer ou décrire les microgestes, ce qui peut entraîner des incohérences terminologiques entre les différents articles. De plus, la littérature se concentre principalement sur les systèmes de captation et de reconnaissance de ces microgestes. Ainsi, peu d'études examinent les propriétés attendues des microgestes, comme la rapidité ou le faible impact sur la fatigue physique dans certains contextes d'utilisation. De ce fait, cette thèse s'intéresse à l'étude des microgestes, de leur description à leur application dans un domaine précis, la [Réalité Augmentée \(RA\)](#), en passant par la captation et la reconnaissance de ceux-ci.

Notre démarche scientifique comprend trois étapes.

L'espace des possibles défini, dans une deuxième étape, nous nous concentrons sur la conception de systèmes de captation et de reconnaissance des microgestes. Après une revue de la littérature pour mettre en évidence la diversité des microgestes et les problèmes terminologiques, nous présentons μ Glyphe, une notation pour décrire les microgestes. Ensuite, nous présentons une étude utilisateur pour comprendre les contraintes imposées sur la faisabilité des microgestes lorsqu'un objet est tenu dans la main. Les résultats de cette étude ont été utilisés pour créer un ensemble de trois règles permettant de déterminer la faisabilité des microgestes dans différents contextes, c.-à-d. différentes [préhensions](#). Pour faciliter l'utilisation, nous avons réutilisé μ Glyphe pour fournir une description visuelle de ces règles. Enfin, nous étudions différentes manières de rendre un ensemble de

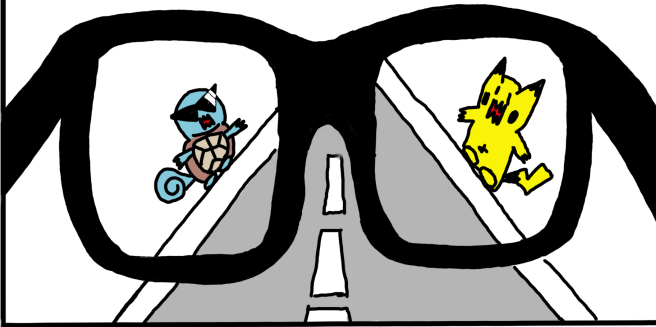
microgestes compatibles avec de nombreux contextes, c.-à-d. que chaque microgeste de l'ensemble soit réalisable dans tous les contextes.

Dans la deuxième partie, nous nous concentrons sur la conception de systèmes de captation et de reconnaissance de microgestes. Après une revue de ces systèmes dans la littérature, nous présentons les systèmes de captation mis en œuvre : deux gants. Nous présentons ensuite une étude utilisateur qui suggère un impact faible du port d'un gant sur la faisabilité des microgestes. Ensuite, nous présentons un système plus complet reconnaissant à la fois microgestes ainsi que les contextes de préhension et de la main libre. Nos études sur les taux de reconnaissance suggèrent que ce système est utilisable pour la détection de microgestes, avec un taux de 94%, mais doit être amélioré pour la reconnaissance de contexte, avec un taux de 80%. Enfin, nous présentons une preuve de concept d'un gant modulaire et d'un système de reconnaissance basé sur μ Glyphe pour permettre l'unification des systèmes de captation des microgestes.

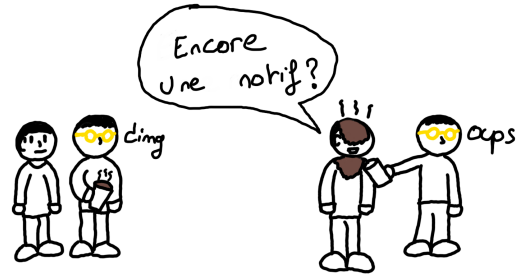
Notre dernière étape est alors dédiée aux techniques d'interaction basées sur les microgestes. Nous nous intéressons aux propriétés de microgestes pour la sélection 3D en RA. Ainsi, nous avons conçu deux techniques de sélection 3D basées sur le regard et les microgestes pour une interaction avec un faible impact sur la fatigue physique. Nos résultats expérimentaux suggèrent que la combinaison regard et microgestes permet une interaction rapide tout en minimisant la fatigue, en comparaison du pointeur virtuel usuel. Nous terminons sur une ouverture discutant l'extension de nos techniques afin d'intégrer la manipulation d'objets 3D en RA avec des microgestes.

Mots-clefs Interaction humain-machine ; microgestes

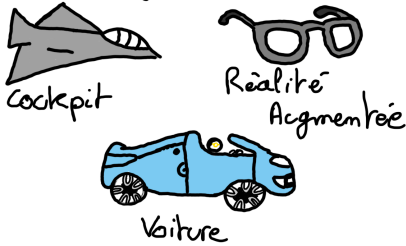
Dans le futur, on nous promet des lunettes de réalité augmentée pour tous, contrôlées par des gestes



Mais comment les utiliser de façon discrète, peu fatigante et même avec une tasse dans les mains ?



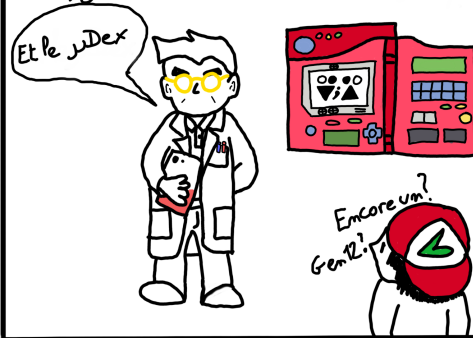
Ma thèse, c'est d'étudier les microgestes, des gestes rapides et subtils des doigts, pour interagir dans des contextes différents



PROBLÈME: les chercheurs n'ont pas la même terminologie



Alors, j'ai introduit une notation: juble



Puis il a fallu comprendre quel microgeste est faisable avec quel objet à l'aide d'une étiquette utilisatrice



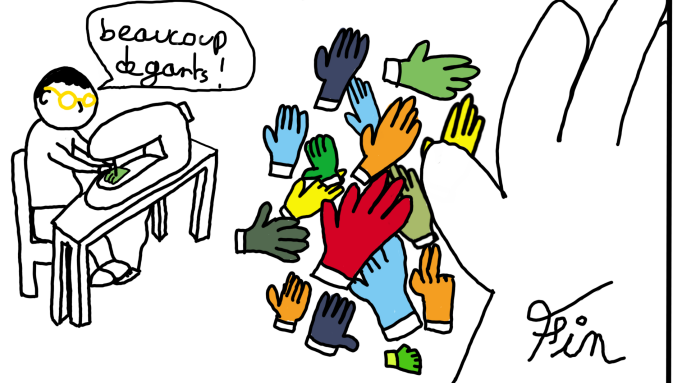
Et extraire des règles pour faciliter les travaux futurs



Pour finir, j'ai conçu une technique de sélection 3D



Mais pour ça, j'ai dû fabriquer des gants...



Abstract

Understanding and designing microgesture interaction

EN Over the last three decades, some of the objects we use in our daily life have gradually become computers. Our habits are changing with these mutations, and it is now not uncommon that we interact with these computers while performing other tasks, e.g. checking our GPS position on our smartwatch while biking. Over the last ten years, a new interaction modality has emerged to meet these needs, hand microgestures. Hand microgestures, simplified to microgestures, are fast and subtle movements of the fingers. They enable interaction in parallel with a main task, as they are quick and can be performed while holding an object. However, as it is a recent modality, the field of research still lacks structure and sometimes coherence. For instance, there is no convention for naming or describing microgestures, which can lead to terminological inconsistencies between different studies. Moreover, the literature focuses mainly on how to build systems to sense and recognize microgestures. Thus, few studies examine the expected properties of microgestures, such as speed or low impact on physical fatigue in certain contexts of use. As a result, this thesis focuses on the study of microgestures, from their description to their application in a specific field, i.e. Augmented Reality (AR), as well as their sensing and recognition.

Our scientific approach is comprised of three steps. In the first step, we focus on the space of possibilities. After a literature review to highlight the diversity of microgestures and terminological issues, we present μ Glyph, a notation to describe microgestures. Next, we present a user study to understand the constraints imposed when holding an object on the feasibility of microgestures. The results of this study were used to create a set of three rules to determine the feasibility of microgestures in different contexts, i.e. different grasps. For ease of use, we reused μ Glyph to provide a visual description of these rules. Finally, we study different ways of making a set of microgestures compatible with many contexts, i.e. that each microgesture in the set is feasible in all contexts.

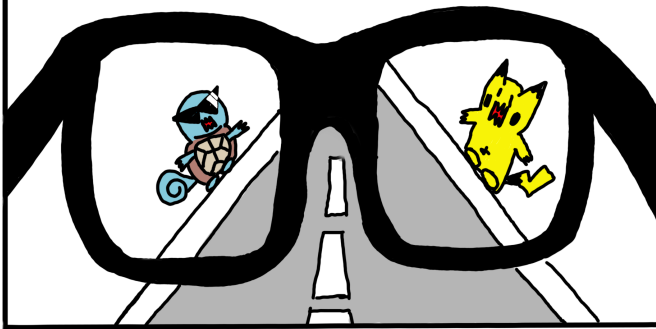
With the space of possibilities defined, we focus on the design of systems for sensing and recognizing microgestures. After a review of such systems in the literature, we present our easily reproducible sensing systems that we implemented, resulting in two gloves. We then present a user study on the impact of wearing these gloves on the feasibility of microgestures. Our results suggest that our gloves

have little impact on the feasibility of microgestures. Next, we present a more comprehensive system that recognizes both microgestures and contexts. Our studies on recognition rates suggest that our system is usable for microgesture detection, with a recognition rate of 94%, but needs to be improved for context recognition, with a rate of 80%. Finally, we present a proof-of-concept of a modular glove and a recognition system based on μ Glyph to enable the unification of microgesture sensing systems.

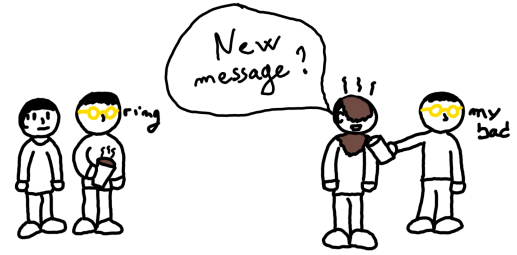
Our final step is then dedicated to interaction techniques based on microgestures. We focus on the properties of microgestures for 3D selection in AR. We have designed two 3D selection techniques based on eye-gaze and microgestures for interaction with low fatigue. Our results suggest that the combination of eye-gaze and microgesture enables fast interaction while minimizing fatigue, compared to the commonly used virtual pointer. We conclude with an extension of our techniques to integrate 3D object manipulation in AR.

Keywords Human-computer interaction ; microgestures

In the future, we are promised augmented reality glasses for everyone, controlled by gestures



But how to use them discreetly, without getting tired, and even with a cup of coffee in your hands?



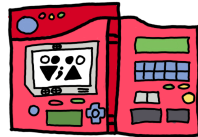
My PhD thesis focuses on microgestures, fast and subtle finger gestures, used to interact in various contexts



PROBLEM: researchers do not use the same terminology



Thus, I have introduced a notation: J-Dex



Then, I had to understand which microgestures are feasible with which objects, with the help of a user study



And extract rules to facilitate future works



Finally, I designed a 3D selection technique



But to do so, I had to make gloves...

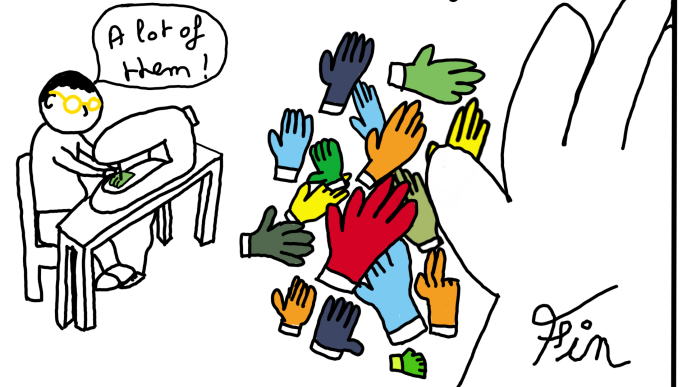


Table des matières

| | |
|---|-------------|
| Remerciements | iii |
| Résumé | vii |
| Abstract | xi |
| | |
| Table des matières | xv |
| Table des figures | xx |
| Liste des tableaux | xxiv |
| | |
| Introduction | 1 |
| Objectif | 3 |
| Contributions | 3 |
| Plan de la thèse | 4 |
| Notes de Lecture | 4 |
| | |
| I Espace des Possibles | 7 |
| | |
| 1 Définitions et contextes d'utilisation des microgestes | 9 |
| 1.1 Variété des microgestes | 9 |
| 1.2 Contextes d'utilisation des microgestes | 10 |
| 1.2.1 Contexte main occupée | 11 |
| 1.2.2 Contexte main libre | 12 |
| 1.2.3 Vers l'unification des deux contextes | 13 |
| | |
| 2 Notation de microgestes : μGlyphe | 17 |
| 2.1 Littérature sur les notations de gestes | 18 |
| 2.2 Notation μ Glyphe | 22 |
| 2.2.1 Mouvements, contextes et structure graphique | 23 |
| 2.2.2 Caractéristiques du mouvement : actionneur | 25 |
| 2.2.3 Autres caractéristiques du mouvement | 26 |
| 2.2.4 Caractéristiques du contexte : récepteur | 27 |
| 2.2.5 Combinatoire et factorisation des événements | 28 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.2.6 | Encapsulation | 29 |
| 2.2.7 | Notation concise | 30 |
| 2.3 | Expressivité théorique : pouvoir descriptif de μ Glyphe | 31 |
| 2.4 | Expressivité pratique : Facilité d'utilisation de μ Glyphe | 34 |
| 2.4.1 | Participants | 34 |
| 2.4.2 | Configuration | 34 |
| 2.4.3 | Ensembles de microgestes pour l'étude | 34 |
| 2.4.4 | Procédure | 36 |
| 2.4.5 | Mesures et hypothèses | 38 |
| 2.5 | Résultats | 39 |
| 2.5.1 | Lecture | 39 |
| 2.5.2 | Écrire en μ Glyphe | 40 |
| 2.6 | Discussion | 42 |
| 2.6.1 | Amélioration de la notation | 43 |
| 2.6.2 | μ Glyphe est utilisable | 43 |
| 2.6.3 | La littérature est ambiguë | 44 |
| 2.6.4 | Propriétés rares | 45 |
| 2.7 | μ Dex : outil en ligne pour faciliter l'utilisation de μ Glyphe | 46 |
| 2.8 | Conclusion | 50 |
| 3 | Faisabilité des microgestes en contexte main libre et main occupée | 53 |
| 3.1 | Taxonomies de préhensions d'objets | 53 |
| 3.2 | Ensemble de contextes et de microgestes étudiés | 55 |
| 3.2.1 | Contextes de préhension étudiés | 55 |
| 3.2.2 | Microgestes étudiés | 56 |
| 3.3 | Étude empirique de la faisabilité d'un microgeste | 57 |
| 3.3.1 | Protocole | 57 |
| 3.3.2 | Résultats | 58 |
| 3.4 | Étude conceptuelle de la faisabilité des microgestes | 64 |
| 3.4.1 | Règles de faisabilité des microgestes | 64 |
| 3.4.2 | Règles de faisabilité des microgestes en μ Glyphe | 64 |
| 3.4.3 | Application des règles | 66 |
| 3.4.4 | Validation de l'approche | 68 |
| 3.4.5 | Limites des règles | 68 |
| 3.5 | Discussions | 69 |
| 3.5.1 | Utiliser une analyse des Doigt Virtuel (DV) plutôt que des préhensions | 69 |
| 3.5.2 | Étudier des objets spécifiques | 70 |
| 3.5.3 | Distinguer une phalange dans un contexte de main occupée | 70 |
| 4 | Vers des microgestes faisables en contextes main libre et main occupée | 73 |
| 4.1 | Ensemble basé sur l'action | 73 |
| 4.2 | Ensemble basé sur l'actionneur | 75 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| II | Conception et Évaluation des Systèmes de Captation et de Reconnaissance | 79 |
| 5 | Systèmes existants de captation et reconnaissance | 81 |
| 5.1 | Types de capteurs | 81 |
| 5.1.1 | Capteurs de symboles μ Glyphe | 81 |
| 5.1.2 | Capteurs d'expressions μ Glyphe | 83 |
| 5.2 | Formes des dispositifs de captation | 84 |
| 5.2.1 | Augmentation de l'utilisateur | 84 |
| 5.2.2 | Augmentation de l'objet physique | 85 |
| 5.2.3 | Augmentation de l'environnement | 86 |
| 5.3 | Systèmes de reconnaissance | 86 |
| 6 | Captation : ingénierie et évaluation de gants | 91 |
| 6.1 | Fabrication de gants | 91 |
| 6.1.1 | Gant <i>Off-The-Shelf</i> (OTS) | 91 |
| 6.1.2 | Gant <i>Do-It-Yourself</i> (DIY) | 93 |
| 6.2 | Impact du gant | 94 |
| 6.2.1 | Protocole | 94 |
| 6.2.2 | Résultats | 95 |
| 6.3 | Conclusion | 98 |
| 7 | Reconnaissance : ingénierie et évaluation de reconnaisseurs de microgestes et de préhensions | 101 |
| 7.1 | Reconnaissance d'un ensemble de microgestes basé sur l'actionneur | 101 |
| 7.1.1 | Ensemble à reconnaître | 101 |
| 7.1.2 | Reconnaisseur de microgestes | 103 |
| 7.2 | Taux de reconnaissance des microgestes | 104 |
| 7.2.1 | Protocole expérimental | 104 |
| 7.2.2 | Résultats | 106 |
| 7.3 | Taux de reconnaissance de la préhension | 108 |
| 7.3.1 | Protocole | 108 |
| 7.3.2 | Modèle de classification | 109 |
| 7.3.3 | Taux de reconnaissance des douze préhensions | 109 |
| 7.3.4 | Détection du contexte main libre | 109 |
| 7.3.5 | Taux de reconnaissance des douze préhensions et de la main libre | 113 |
| 7.4 | Conclusion | 113 |
| 8 | Vers un système de captation et reconnaissance modulaire basé sur μGlyphe | 115 |
| 8.1 | Gant modulaire | 115 |
| 8.1.1 | Assemblage | 116 |
| 8.1.2 | Manchons | 117 |
| 8.2 | Serveur μ Poly | 118 |

| | | |
|---|--|------------|
| 8.2.1 | Architecture logicielle | 120 |
| 8.2.2 | Réalisation logicielle | 120 |
| III Microgestes pour la sélection 3D en Réalité Augmentée (RA) | | 125 |
| 9 | Techniques de selection 3D existantes | 129 |
| 9.1 | Sélection 3D | 129 |
| 9.1.1 | Modalités de pointage | 129 |
| 9.1.2 | Mécanisme de désambiguïsation | 131 |
| 9.2 | Concevoir une phase de désambiguïsation distincte | 132 |
| 10 | Conception et évaluation de techniques de sélection 3D basées sur les microgestes | 137 |
| 10.1 | Techniques conçues | 137 |
| 10.1.1 | Arm&MidAir | 138 |
| 10.1.2 | Look&MidAir | 138 |
| 10.1.3 | Look&Micro | 139 |
| 10.1.4 | Arm&Micro | 139 |
| 10.2 | Étude expérimentale préliminaire | 139 |
| 10.2.1 | Tâche | 140 |
| 10.2.2 | Participants | 140 |
| 10.2.3 | Design | 140 |
| 10.3 | Résultats | 141 |
| 10.3.1 | Temps | 141 |
| 10.3.2 | Erreur | 143 |
| 10.3.3 | Questionnaire NASA TLX | 143 |
| 10.3.4 | Analyse des rangs | 144 |
| 10.4 | Enseignements de l'étude exploratoire | 144 |
| 10.4.1 | Look | 144 |
| 10.4.2 | MidAir | 145 |
| 10.4.3 | Micro | 145 |
| 10.5 | Conception améliorée | 146 |
| 10.6 | Étude expérimentale de validation | 147 |
| 10.6.1 | Technique de référence | 147 |
| 10.6.2 | Hypothèses | 148 |
| 10.6.3 | Participants | 148 |
| 10.6.4 | Matériel et Protocole | 148 |
| 10.7 | Résultats | 149 |
| 10.7.1 | Temps | 149 |
| 10.7.2 | Erreur | 150 |
| 10.7.3 | Questionnaire NASA TLX | 150 |
| 10.7.4 | Analyse des rangs | 151 |
| 10.8 | Discussion | 151 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 10.8.1 | Temps | 152 |
| 10.8.2 | Erreurs | 152 |
| 10.8.3 | Fatigue | 152 |
| 10.8.4 | Demande mentale et courbe d'apprentissage | 153 |
| 10.8.5 | Préférence des utilisateurs | 153 |
| 10.9 | Limitations | 153 |
| 10.9.1 | Limitations matérielles | 153 |
| 10.9.2 | Perte de l'information spatiale | 154 |
| 10.9.3 | Participants | 154 |
| 10.9.4 | Loi de Fitts | 154 |
| 11 | Vers la manipulation 3D avec l'interaction directe et les microgestes | 157 |
| | Conclusion | 161 |
| | Résumé de la démarche scientifique et des contributions | 161 |
| | Perspectives de recherche | 163 |
| | Acronymes | 167 |
| | Glossaire | 168 |
| | Aide à la lecture | 169 |
| A | Antisèche pour l'étude expérimentale μGlyphe | 171 |
| B | Microgestes de la littérature | 175 |
| C | Analyse statistiques de l'étude utilisateur évaluant la notation μGlyphe | 185 |
| D | Activités Scientifiques | 187 |
| | D.1 Publications | 187 |
| | D.2 Autres activités | 188 |
| E | Bibliographie | 191 |

Table des figures

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Diversité des microgestes dans les deux contextes main libre et main occupée. | 8 |
| 2.1 | Éléments de base de la notation μ Glyphe | 16 |
| 2.2 | Exemple d'une description d'un geste en utilisant la notation introduite dans Charade [8]. Le geste représenté est un mouvement du bras vers le bas en fermant tous les doigts. | 20 |
| 2.3 | Exemple d'une carte de geste. Image reproduite depuis l'article GestureCards [53]. | 21 |
| 2.4 | Plan sagittal | 23 |
| 2.5 | Sommaire global de la notation μ Glyphe. | 31 |
| 2.6 | Procédure expérimentale (<ENTRÉE> représente la touche Entrée du clavier, <ESPACE> la touche espace). | 37 |
| 2.7 | Vue d'ensemble des résultats de l'étude avec des intervalles de confiance à 95 %. | 41 |
| 2.8 | Capture d'écran de μ Dex. Éditeur visuel μ Glyphe avec exportation L ^A T _E X. | 46 |
| 2.9 | Capture d'écran de μ Dex. Éditeur visuel μ Glyphe avec exportation Word en générant une image SVG ou PNG. | 47 |
| 2.10 | Capture d'écran de μ Dex. Base de données des microgestes : pour chaque microgeste, nom, description, article et description μ Glyphe. | 47 |
| 2.11 | Capture d'écran de μ Dex. Main animée en 3D générée à partir d'une description μ Glyphe et export SVG des images clés de l'animation. | 48 |
| 2.12 | Création d'une description graphique d'un microgeste à l'aide de l'exportation SVG. | 49 |
| 3.1 | Ensembles considérés et études réalisées pour identifier les contraintes imposées par la préhension d'un objet sur la faisabilité des microgestes. | 52 |
| 3.2 | Liste d'objets quotidiens utilisés comme références pour les objets que nous avons imprimés en 3D. | 55 |

| | | |
|------|---|-----|
| 3.3 | Distribution de la taille de la main (distance en cm entre la base de la paume et l'extrémité du majeur) des 20 participants à l'étude. | 57 |
| 3.4 | Nombre de participants ayant ignoré une combinaison contexte × microgeste | 59 |
| 3.5 | Score médian de Likert (échelle de 1-difficile à 4-facile) pour chaque combinaison de contexte × microgeste. | 60 |
| 3.6 | Nombre moyen de combinaisons contexte × microgeste ignorées par taille de main avec un ajustement polynomial et l'Intervalle de Confiance (IC) à 95 %. | 61 |
| 3.7 | Distributions des microgestes ignorés (en rouge) et non ignorés en fonction de la taille des mains pour les contextes Sphérique Grand et Palmaire Grand | 61 |
| 3.8 | Moyenne de Likert avec un intervalle de confiance à 95 % par longueur de main. | 61 |
| 3.9 | Faisabilité conceptuelle des microgestes pour chaque contexte. . . | 67 |
| 3.10 | Illustrations des limites de notre modèle prédictif sur la faisabilité des microgestes. | 69 |
| 4.1 | Conception d'ensembles compatibles avec un grand nombre de contextes à partir des résultats du chapitre précédent. | 72 |
| 4.2 | Score médian de Likert (échelle de 1-difficile à 4-facile) de l'ensemble basé sur l'action. | 74 |
| 4.3 | Score médian de Likert (échelle de 1-difficile à 4-facile) de l'ensemble basé sur l'actionneur. | 76 |
| 5.1 | Différentes formes de systèmes de captation pour les microgestes. . | 80 |
| 6.1 | Évolution et évaluation des systèmes de captation. | 90 |
| 6.2 | Gant OTS permettant de capter les microgestes pouce-doigt et flexion | 92 |
| 6.3 | Vue éclatée d'un capteur et de la position des capteurs sur notre gant DIY. | 93 |
| 6.4 | Pour chaque combinaison contexte × microgeste : nombre de participants qui l'ont ignorée. | 96 |
| 6.5 | Pour chaque combinaison de contexte × microgeste : score de Likert médian (échelle de 1-difficile à 4-facile). | 97 |
| 6.6 | Microgestes devenus faisables grâce à l'épaisseur du gant. | 98 |
| 7.1 | Système de reconnaissance des microgestes et du contexte. | 100 |
| 7.2 | Problèmes d'ambiguïté pour la détection des microgestes. | 102 |

| | | |
|------|---|-----|
| 7.3 | Détecter un tap ou un press . En haut, les deux courbes représentent les valeurs brutes lors d'un tap ou d'un press . En bas, la courbe représente la dérivée des valeurs brutes. Un tap ou un press est détecté quand la dérivée passe au-dessus du seuil $T_{\text{Début}}$ et ensuite en dessous du seuil T_{Fin} , en moins d'1 s. | 104 |
| 7.4 | Taux de reconnaissance moyen pour chaque microgeste dans un contexte spécifique. | 107 |
| 7.5 | Médiane des scores de Likert pour chaque microgeste dans un contexte spécifique. | 107 |
| 7.6 | Reconnaissance moyenne des préhensions, sur 3000 cycles d'entraînement et de test avec KNN, Naive Bayes et SVM, dans les trois conditions. | 110 |
| 7.7 | Reconnaissance moyenne des préhensions et de main libre, sur 3000 cycles d'entraînement et de test avec notre KNN modifié dans les trois conditions. | 111 |
| 7.8 | Reconnaissance d'une pose en main libre à l'aide du voisinage le plus proche (K-nearest neighborhood). | 112 |
| 8.1 | Système de captation et de reconnaissance modulaire de microgestes. | 114 |
| 8.2 | Patron et photo de la mitaine pour le gant en kit. | 116 |
| 8.3 | À gauche, photo du manchon co-fabriqué avec Gauthier Faisandaz. À droite, photo du manchon attaché à la mitaine. | 117 |
| 8.4 | À gauche, patron de découpe du manchon. À droite, photo du manchon avec boutons-poussoirs. Manchon co-fabriqué avec Michael Ortega. | 117 |
| 8.5 | À gauche, patron de découpe du manchon. À droite, photo du manchon avec des capteurs capacitifs. | 118 |
| 8.6 | Vue d'ensemble du serveur μ Poly. | 119 |
| 8.7 | Exemple de machine à état maintenue par μ Poly. Cette machine à état représente le microgeste multi-doigts de l'ensemble basé sur l'actionneur : $\left(\begin{array}{c} \circ \\ \nabla \\ \circ \end{array} ; \begin{array}{c} \circ \\ \blacktriangle \\ \circ \end{array} \right) \left \left(\begin{array}{c} \nabla \\ \circ \\ \circ \end{array} ; \begin{array}{c} \blacktriangle \\ \circ \\ \circ \end{array} \right) \right.$ $\begin{array}{c} \text{lo} \rightarrow \text{hi} \\ \text{hi} \rightarrow \text{lo} \end{array}$ | 121 |
| 8.8 | Exemple de fichier JSON représentant une description μ Glyphe. Ici, le microgeste élémentaire représenté est $\begin{array}{c} \circ \\ \nabla \\ \circ \end{array} \begin{array}{c} \bullet \\ \circ \\ \bullet \end{array} \begin{array}{c} \bullet \\ \circ \\ \bullet \end{array}$ | 121 |
| 8.9 | Capture d'écran de l'interface utilisateur pour spécifier les microgestes à reconnaître ainsi que leur durée pour le serveur μ Glyphe . | 122 |
| 8.10 | Évènement émis par le serveur μ Poly lorsque le microgeste x est reconnu. | 122 |
| 9.1 | Techniques de sélection 3D. | 128 |

| | | |
|------|---|-----|
| 10.1 | Utilisation du regard et des microgestes pour réduire la fatigue en Réalité Mixte (RM) par une technique en deux phases. | 136 |
| 10.2 | Résultats de l'étude préliminaire. | 142 |
| 10.3 | Scores bruts du questionnaire NASA TLX pour toutes les techniques. | 144 |
| 10.4 | Selon la manière dont les participants effectuent un <code>tap du pouce au doigt</code> pour naviguer dans la liste pendant la phase de <i>désambiguïsation</i> , le système reconnaît l'index comme A) ouvert ou B) fermé. | 145 |
| 10.5 | Résultats de l'étude de validation. | 149 |
| 10.6 | Scores bruts du NASA TLX. | 150 |
| 11.1 | Scénario possible d'une utilisation combinée de Look&MidAir et Look&Micro pour la manipulation d'objets 3D. | 156 |

Liste des tableaux

| | | |
|-----|--|-----|
| 1.1 | Résumé des noms de microgestes présentés dans ce chapitre. | 15 |
| 2.1 | Liste des dimensions cognitives et des caractéristiques du mouvement prérequisés pour une notation des microgestes. | 22 |
| 2.2 | Exemples de microgestes décrits à très haut niveau d'abstraction avec les glyphes de mouvement et de contexte de μ Glyphe. | 23 |
| 2.3 | Exemples de microgestes décrits à bas niveau d'abstraction en spéci- fiant les caractéristiques de l'actionneur comme définies par μ Glyphe. | 25 |
| 2.4 | Exemples de microgestes décrits à bas niveau d'abstraction en spéci- fiant les caractéristiques du récepteur comme définies dans μ Glyphe. | 27 |
| 2.5 | Séquence, choix and parallélisme : exemples de descriptions μ Glyphe. | 28 |
| 2.6 | Microgestes décrits en utilisant la version standard de μ Glyphe, en utilisant la représentation graphique de la main, et la version concise de μ Glyphe. | 30 |
| 2.7 | Expressivité théorique de μ Glyphe : descriptions de microgestes à deux niveaux d'abstraction et mise en évidence (●) de problèmes terminologiques existants dans la littérature. | 33 |
| 3.1 | Scores médian moyennes des microgestes par préhension avec un IC à 95% | 62 |
| 3.2 | Représentation visuelle des DV pour nos préhensions. | 65 |
| 3.3 | Descriptions μ Glyphe des microgestes étudiés. | 65 |
| 5.1 | Vue d'ensemble des systèmes de captation et de reconnaissance utilisés dans la littérature microgeste suivant les trois facettes : types de capteurs, formes des dispositifs de captation et types de systèmes de reconnaissance. | 88 |
| 9.1 | Première partie de la vue d'ensemble des techniques de sélection 3D vu dans ce chapitre suivant les trois facettes : modalité de pointage, modalité de sélection et mécanisme de désambiguation. | 134 |
| 9.2 | Seconde partie de la vue d'ensemble des techniques de sélection 3D vu dans ce chapitre suivant les trois facettes : modalité de pointage, modalité de sélection et mécanisme de désambiguation. | 135 |

| | |
|---|-----|
| 10.1 Rangs moyens (STD) des techniques pour la demande mentale, demande physique, préférence, la vitesse et la performance. | 145 |
| 10.2 Rangs moyens (STD) des techniques pour la demande mentale, demande physique, préférence, vitesse et performance. | 151 |
| B.1 Première partie de la série de microgestes dérivés du motif $\overset{\circ\bullet}{-}; \overset{\bullet\circ}{-}$ | 176 |
| B.2 Seconde partie de la série de microgestes dérivés du motif $\overset{\circ\bullet}{-}; \overset{\bullet\circ}{-}$ | 177 |
| B.3 Microgestes utilisant la pression. | 178 |
| B.4 Première partie de la série de microgestes dérivés du motif $\overset{\bullet\bullet}{-}$ | 179 |
| B.5 Seconde partie de la série de microgestes dérivés du motif $\overset{\bullet\bullet}{-}$ | 180 |
| B.6 Microgestes dérivés du motif $\overset{\circ\circ}{-}$ | 181 |
| B.7 Microgestes décrivant un dessin | 182 |

Introduction

Nos mains sont complexes. Elles sont constituées de 36 muscles, répartis entre la main et l'avant-bras, et de plusieurs dizaines de milliers de récepteurs tactiles. En considérant l'homoncule de Penfield [93], les neurones qui nous permettent d'agir et de percevoir avec nos mains représentent l'une des plus grandes zones de notre cortex cérébral. Cela n'est pas surprenant, étant donné le rôle central joué par nos mains dans nos activités quotidiennes. Nous les utilisons pour saisir et interagir avec différents objets et outils, ou pour percevoir des informations telles que la rugosité d'une surface ou la température. Cependant, nos mains sont également associées à un caractère plus symbolique. Les premières peintures réalisées par l'Homme sont des empreintes de mains. La langue française contient de nombreuses expressions centrées sur la main pour véhiculer, par exemple, un gage de qualité, comme « coussin main » pour un gant, ou pour véhiculer des émotions plus négatives, comme « avoir un poil dans la main ». Toutefois, la symbolique n'est pas seulement associée à la sémantique du mot main, mais aussi à la pose ou aux mouvements des doigts de la main. La langue des signes en est certes un bon exemple, mais de nombreux gestes et poses de la main sont utilisés quotidiennement pour communiquer avec d'autres humains, p. ex. un pouce levé. Ces gestes et poses de la main sont même utilisés à l'écrit avec les nombreuses émoticônes permettant de les représenter, p. ex. 🖐️, 🖐️, 🖐️ ou 🖐️. Toutefois, la signification de ces gestes n'est pas universelle. Ainsi, le geste avec le pouce qui touche l'index, 🖐️, signifie « OK » en Occident, mais il est utilisé pour parler d'argent au Japon. De ce fait, la communication avec les mains ne peut avoir lieu que si les différents interlocuteurs ont la même définition de chaque geste.

Les gestes de la main sont également devenus un moyen de communiquer avec nos machines, notamment dans le cadre de la [Réalité Augmentée \(RA\)](#). La RA permet d'afficher des contenus virtuels dans notre monde physique, et ce, peu importe l'environnement dans lequel se trouve l'utilisateur. Ainsi, pour interagir avec ce type de dispositif, il n'est pas possible d'utiliser les outils d'interaction standards d'un ordinateur, c.-à-d. le clavier et la souris. En effet, il serait difficile d'utiliser un clavier physique et une souris pour lire et répondre à un message textuel affiché tout en étant dans les transports en commun à l'heure de pointe. C'est pourquoi les casques de RA utilisent l'interaction avec des gestes de la main détectés par une caméra intégrée au casque. Ces gestes de la main sont souvent accompagnés d'un mouvement du bras pour permettre de l'interaction directe sur des objets virtuels. p. ex. pour appuyer sur un bouton. Cependant, des gestes plus subtils et discrets, ne concernant que des gestes des doigts de la main, ont été

identifié [103, 18]. Ainsi, la touche « Windows » du clavier, permettant d'ouvrir le menu principal Windows, est remplacée dans l'Hololens 1¹, un casque de RA, par un geste appelé *bourgeon*² pour ouvrir ce même menu. De plus, ces gestes permettent d'interagir en parallèle de sa tâche principale. La nouvelle AppleWatch³ dispose d'un geste, le *double-tap*⁴, permettant d'interagir avec sa montre, avec la main portant la montre, lorsque la main utilisée pour l'interaction est déjà occupées, c.-à-d. lorsque cette main tient un objet. Cependant, l'utilisation de ces gestes reste limitée, notamment en raison de la difficulté de créer un dispositif de captation de microgestes peu encombrant et efficace.

En recherche, ces gestes rapides et subtils de la main sont appelés **microgestes**. Ce terme a été introduit pour la première fois par Wolf et coll. [122] en 2011. Les avancées des études et technologies pour les microgestes se manifestent notamment par une prolifération de termes employés le plus souvent sans rigueur, en général les uns pour les autres. Par exemple, certaines études considèrent que les microgestes sont uniquement des mouvements des doigts sur la main [18] ou sur des objets [103], alors que d'autres prennent également en compte les mouvements du poignet [110]. De même, les notions de *rapide* et de *subtil* qui caractérisent un microgeste ne sont pas précisément définies. La majorité des études considèrent une limite de 4 secondes, introduite à l'origine par Ashbrook pour la microinteraction [5], mais d'autres proposent une limite d'une seconde, pour l'interaction par « réflexe » [85]. La notion de subtilité est, le plus souvent, associée au fait que les gestes des doigts sont plus subtils, c.-à-d. plus petits en termes d'amplitude, que les autres gestes en Interaction Humain-Machine (IHM), c.-à-d. les gestes du bras [18]. Dans cette thèse, nous considérons les microgestes comme des gestes des doigts de la main sans mouvement du poignet.

Le domaine des microgestes étant récent, la plupart des travaux se concentrent sur les systèmes de captation et de reconnaissance des microgestes. Par conséquent, peu d'études ont présenté et/ou testé les propriétés des microgestes. La seule propriété qui a été étudiée est le fait que les microgestes sont utilisables en parallèle d'une tâche principale [122, 103, 117]. En effet, les microgestes peuvent être réalisés sans regarder ses mains [56], et certains peuvent être réalisés alors que la main tient un objet [103]. Plusieurs autres propriétés sont attendues, comme la rapidité d'exécution et le faible impact sur la fatigue. Wambecke et coll. ont montré que, dans le cas du pilotage d'un avion, les microgestes peuvent être plus rapides que l'utilisation de boutons physiques dans le cockpit pour la sélection 2D et la sélection d'éléments dans un menu [117].

Nous constatons donc que le vaste espace des possibles que définissent les microgestes reste relativement inexploré et certaines incohérences, notamment terminologiques, entravent son exploration systématique. Pour permettre au domaine des microgestes d'évoluer, il est nécessaire de mieux comprendre ce que sont les

1. <https://learn.microsoft.com/fr-fr/hololens/hololens1-hardware>
2. <https://learn.microsoft.com/fr-fr/windows/mixed-reality/design/system-gesture>
3. <https://www.apple.com/fr/watch/>
4. https://www.youtube.com/watch?v=Nvb_Kta7v6U

microgestes, dans quels contextes ils peuvent être effectués et quels avantages ils pourraient apporter à l'interaction dans différents contextes. Ce constat a motivé les travaux de cette thèse.

Objectif

L'objectif de cette thèse est de comprendre et de concevoir l'interaction avec les microgestes. Notre démarche scientifique se compose de trois étapes

Tout d'abord ([partie I](#)), nous nous sommes intéressés à l'espace des possibles. Pour comprendre les microgestes, il faut pouvoir les décrire précisément afin de les comparer entre eux. Puis, il faut comprendre comment le contexte, c.-à-d. l'objet tenu par la main effectuant les microgestes, impacte la faisabilité des microgestes. Le but de cette première partie est de pouvoir identifier des ensembles de microgestes compatibles avec un grand nombre de contextes, c.-à-d. que chaque microgeste de l'ensemble est faisable avec chaque contexte étudié.

L'espace des possibles défini, dans une deuxième partie ([partie II](#)), nous avons exploré les différents systèmes de captation et de reconnaissance de microgestes. Le but de cette partie est de concevoir un système simple permettant de rapidement tester différents ensembles de microgestes dans différents contextes. Mais au-delà de la simple reconnaissance, nous avons aussi souhaité mesurer l'impact des dispositifs de captation sur la faisabilité des microgestes.

Notre dernière étape est alors dédiée aux techniques d'interactions basées sur les microgestes ([partie III](#)). Nous avons exploré l'interaction, en particulier la sélection 3D, avec des microgestes pour la [RA](#). Pour ce faire, comme les microgestes sont déjà partiellement utilisés en [RA](#), nous avons voulu tester des propriétés des microgestes, p. ex. la rapidité ou la fatigue engendrée, dans ce contexte.

Contributions

Nos recherches ont abouti à :

- la création d'une notation pour décrire les microgestes : μ Glyphe. Pour promouvoir cette notation, nous avons conçu une plateforme basée sur μ Glyphe permettant d'explorer facilement la littérature microgeste et d'utiliser μ Glyphe dans les articles scientifiques : μ Dex ;
- une étude expérimentale sur la faisabilité des microgestes dans 13 contextes incluant la main libre et douze contextes de [préhensions](#). En se basant sur cette étude, nous avons aussi introduit un modèle théorique pour déterminer si un microgeste est faisable ou non en se basant sur des représentations μ Glyphe des microgestes et des [préhensions](#). De plus, les résultats de cette étude ont permis l'exploration de deux façons de concevoir des ensembles de microgestes compatibles avec nos 13 contextes ;
- la conception de plusieurs systèmes de captation et de reconnaissance puis l'évaluation du système au niveau du taux de reconnaissance des microgestes,

des [préhensions](#) mais aussi en évaluant son impact sur la faisabilité des microgestes ;

- la conception d’une preuve de concept sur un système de captation et de reconnaissance modulaire basé sur μ Glyphe, nommée μ Poly, pour permettre d’unifier les différents systèmes de la littérature ;
- la conception et l’évaluation de deux techniques de sélection 3D, Look&Micro et Look&MidAir, en combinant regard et microgeste pour diminuer l’impact sur la fatigue physique.

Les publications associées à ces contributions sont listées dans l’[annexe D](#).

Plan de la thèse

Cette thèse est divisée en 11 chapitres, répartis dans 3 parties correspondant aux trois étapes de notre démarche scientifique. De plus, chaque partie est structurée de la même manière : un premier chapitre d’état de l’art, posant le contexte des études menées, et un dernier chapitre d’ouverture et extension des contributions présentées.

La première partie aborde l’espace des possibles. Le [chapitre 1](#) dresse un état de l’art sur des définitions d’un microgeste et des cas d’utilisation des microgestes. Le [chapitre 2](#) introduit et évalue la notation μ Glyphe. Le [chapitre 3](#) présente l’étude expérimentale sur la faisabilité des microgestes ainsi que le modèle théorique associé. Le [chapitre 4](#) conclut cette partie par l’exploration de différentes façons de rendre un ensemble compatible, en partant des résultats de cette première partie.

Le deuxième partie aborde les systèmes de captation et de reconnaissance des microgestes. Le [chapitre 5](#) dresse un état de l’art des systèmes existants de captation et de reconnaissance des microgestes. Le [chapitre 6](#) présente nos différents systèmes de captation ainsi que l’étude de l’impact du système sur la faisabilité des microgestes. Le [chapitre 7](#) présente nos systèmes de reconnaissance des microgestes et des [préhensions](#) ainsi que les études sur les taux de reconnaissance de ces systèmes. Le [chapitre 8](#) conclut cette partie par une preuve de concept d’un système de captation et de reconnaissance modulaire basé sur μ Glyphe.

La troisième partie étudie les propriétés des microgestes pour la [RA](#). Le [chapitre 9](#) dresse un état de l’art des techniques de sélection 3D en [RA](#). Le [chapitre 10](#) présente et évalue des techniques de sélection 3D en [RA](#) reposant sur le couplage du regard et des microgestes. Le [chapitre 11](#) conclut cette partie par une extension de nos techniques de sélection 3D pour la manipulation.

Enfin, nous concluons cette thèse avec un résumé des contributions et une discussion des travaux futurs.

Notes de Lecture

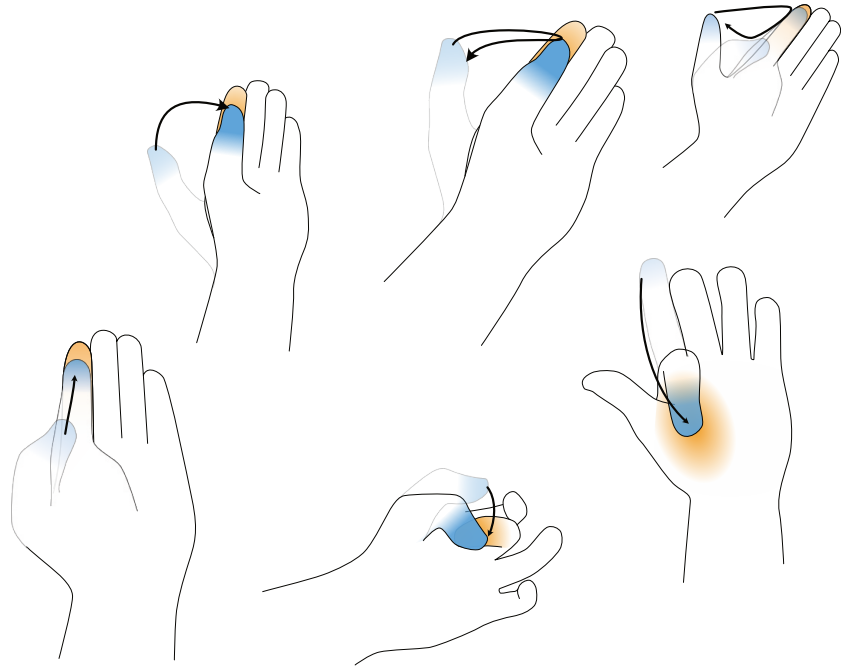
Certains termes courants en Interaction Humain-Machine sont conservés en anglais, tels que [tap](#) ou [press](#), pour faciliter la lecture. Cependant, chacun d’entre

eux est écrit en **bleu** et est référencé avec une définition et une traduction possible dans le glossaire. De façon similaire, les acronymes utilisés dans le manuscrit, p. ex. **RA**, sont aussi écrits en **bleu** et sont référencés dans le glossaire des acronymes. De plus, dans le manuscrit, nous avons utilisé l'accord par proximité⁵. Enfin, nous avons préparé une fiche de lecture à l'attention du lecteur, fiche qui regroupe certains concepts et mots clefs utilisés tout au long du manuscrit. Cette fiche peut être imprimée pour faciliter la lecture. Elle se trouve à la page **169**.

5. <https://www.epfl.ch/about/equality/fr/langage-inclusif/guide/principes/accord>

Première partie
Espace des Possibles

main libre



main occupée

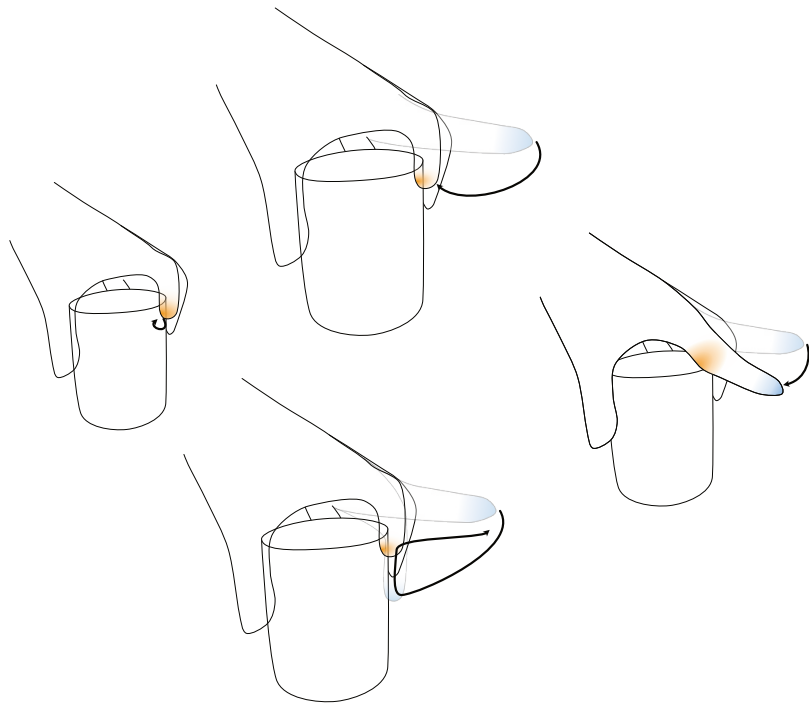


FIGURE 1.1: Diversité des microgestes dans les deux contextes main libre et main occupée.

Chapitre 1

Définitions et contextes d'utilisation des microgestes

Les microgestes sont des mouvements rapides et subtils des doigts [18, 103]. Dans cet état de l'art, nous présentons la grande diversité de microgestes puis nous présenterons les contextes d'utilisation dans lesquels ils sont exécutés. Les noms des microgestes sont laissés en anglais pour rester au plus proche de la terminologie proposée. Toutefois, nous proposons une traduction littérale que nous indiquerons sous la forme : `english-expression` [*version française*] ou `version française`

1.1 Variété des microgestes

Soliman et coll. définissent un espace de conception pour les microgestes pouce-doigt et doigt-pouce [105].

Cet espace de conception est organisé selon quatre axes : le type d'actions (c.-à-d. `tap` [*tap*], `slide` [*glisser*], et `draw` [*dessiner*]), le doigt qui initie l'action, la zone du doigt sur laquelle l'action est effectuée (p. ex., une phalange ou le côté du doigt) et l'état d'extension des autres doigts [105]. Par exemple, en considérant ces quatre axes de caractéristiques, nous pouvons différencier un `tap` du pouce sur la phalange basse de l'index d'un `tap` du pouce sur la phalange haute de l'index. En outre, ces deux microgestes peuvent être distingués en fonction de l'état des autres doigts de la main, p. ex. si l'annulaire et/ou l'auriculaire sont ouverts et/ou fermés pendant le mouvement. Ces quatre axes, à savoir l'action, l'actionneur, la surface et l'extension des doigts, peuvent être étendus à tous les types de microgestes et définissent une structure pour examiner les caractéristiques des microgestes.

Plusieurs études sur les microgestes définissent des actions supplémentaires à celles définies par Soliman et coll. [105]. Way et coll. définissent `touch` [*toucher*], `finger curl` [*courber le doigt*], `finger lift/extend` [*fermer/ouvrir le doigt*], et `open/close gap` [*ouvrir/fermer l'espace entre deux doigts*]. Ces actions ont été définies pour des microgestes reconnaissables par une caméra portée au poignet [118].

Chan et coll. définissent `tap` [*tap*], `swipe` [*swipe*], `draw` [*dessiner*] et `circle` [*des-*

siner un cercle]. Ces actions ont été identifiées à partir d'une étude d'élicitation auprès de 16 participants [18]. D'autres actions ont été étudiées mais jamais définies : comme *ream* [*ramer*] [122], *tab* [*toucher*] [122], *stretch* [*étirer*] [103], *press* [103], *up* [*en-haut*] [33] ou *flick* [*pichenette*] [28].

Pour les actionneurs, c.-à-d. les doigts qui effectuent les actions, alors que Soliman et coll. ne considèrent qu'un seul doigt [105] à la fois, d'autres études se concentrent sur les microgestes effectués par un groupe de doigts, p. ex. *tap* sur le pouce avec l'index et le majeur [18], ou vont plus loin dans le détail en considérant une articulation spécifique d'un doigt, p. ex. *finger lift* [*fermer le doigt*] [118] qui n'utilise que l'articulation entre la paume le doigt en opposition à *finger curl* [*courber le doigt*] qui utilise cette articulation ainsi que celles entre les phalanges des doigts.

Un microgeste peut également être caractérisé en fonction de la surface touchée par l'actionneur. Soliman et coll. définissent comme surface un doigt, une phalange ou le côté d'un doigt [105]. D'autres études présentent comme surface un groupe de doigts, p. ex. un *swipe* sur l'index et le majeur avec le pouce [18], et la paume, p. ex. un *tap* sur la paume avec l'index, le majeur et l'annulaire [18]. Cependant, les microgestes peuvent aussi être effectués sur des surfaces autres que le corps de l'utilisateur. Ainsi, Sharma et coll. définissent trois surfaces : sur le corps, sur l'objet et en l'air [103]. En ce qui concerne les objets, les surfaces peuvent être n'importe lesquelles, autres que celles de la main, p. ex. *external touch* [*toucher externe*] [118], ou un objet spécifique, p. ex. *drag up/down of the index or middle finger on the stylus* [*glisser vers le haut/bas de l'index ou du majeur sur le stylet*] [122]. En l'air, les microgestes sont effectués sans toucher aucune surface, p. ex. *stretch* [*étirer*] [103] et *triangle* [*dessiner un triangle*] [33].

Enfin, d'autres caractéristiques que l'état d'extension des doigts [105] ont été introduites. Par exemple, la pression est utilisée pour distinguer un *tap* d'un *force tap* [*tap fort*] [119] en caractérisant la force de l'impact de l'actionneur sur la surface, c.-à-d. faible pour un *tap* [*tap*] et forte pour un *force tap* [*tap fort*]. La Figure 1.1 présente plusieurs microgestes cités ci-dessus.

Dans la section suivante, nous présentons les différents contextes dans lesquels ces microgestes sont utilisés.

1.2 Contextes d'utilisation des microgestes

Les microgestes sont généralement utilisés pour les trois propriétés suivantes. 1) Ils sont nombreux, autorisant un large vocabulaire d'entrée [75, 105]. 2) Ils sont utilisables en parallèle d'une autre tâche [122]. 3) Ils sont toujours accessibles et permettent une interaction discrète [18, 123], rapide [123] et sans regarder ses mains [56].

Toutefois, il est parfois difficile de combiner les deux premières propriétés dues aux changements de contexte dans une journée, p. ex. en conduisant en tenant le volant ou pendant la relecture d'un document avec un stylo à la main. Ainsi,

nous constatons que les travaux existants sur les microgestes sont scindés en deux. D'un côté, l'étude des microgestes avec la main libre, c.-à-d. sans tenir d'objet, se focalisant sur l'exploration de l'expressivité des microgestes. De l'autre, l'étude des microgestes avec la main occupée, c.-à-d. en tenant un objet, se focalisant sur l'utilisation des microgestes en parallèle d'une autre tâche.

1.2.1 Contexte main occupée

En main occupée, les chercheurs rendent possible l'interaction tout en effectuant une autre tâche comme la cuisine [10], conduire [33] ou écrire [106].

Il existe deux approches pour étudier les microgestes en main occupée : la recherche de microgestes spécifiques pour une **préhension** donnée (*spécificité*) ou la recherche de microgestes similaires entre différentes **préhensions** (*compatibilité*).

En mettant l'accent sur la *spécificité*, les travaux antérieurs ont créé des ensembles de microgestes spécifiques à un objet tels qu'une poignée de vélo [110], un volant [33] ou une casserole [10]. Ces ensembles spécifiques permettent l'interaction en parallèle d'une tâche principale. Ainsi, dans la voiture, l'utilisateur peut interagir avec la console centrale, p. ex. le GPS ou la climatisation, sans enlever les mains du volant. Wolf et coll. ont défini des ensembles de microgestes, avec l'aide d'experts en biomécanique et de physiothérapeutes, pour trois contextes d'utilisation : un volant, une carte de crédit et un stylo [122]. Parmi les 21 microgestes identifiés, la plupart sont spécifiques à un seul objet, p. ex., **thumb up** [*pouce levé*] qui consiste à ouvrir son pouce, uniquement réalisable avec le volant. En effet, comme le stylo et la carte sont tenues par le pouce contre les autres doigts, il est compliqué de lever le pouce sans que l'objet ne tombe. Cependant, ces résultats peuvent difficilement être étendus à d'autres contextes de **préhension** d'un objet, voire même en contexte main libre. Or, pour permettre la démocratisation des microgestes, il est important de réussir à définir un ensemble de microgestes communs à de nombreux contextes pour familiariser les utilisateurs aux microgestes.

En se concentrant sur la *compatibilité*, Sharma et coll. ont mené une étude d'élicitation pour associer des microgestes à dix commandes (c.-à-d. sélectionner, supprimer, accepter/rejeter, suivant/précédent, augmenter/diminuer, déplacer, faire pivoter), dans différents contextes de main occupée. Ils ont comparé douze objets correspondant aux six façons de tenir un objet, c.-à-d. aux six **préhensions**, de la taxonomie de Schlesinger appliqués à deux tailles d'objets [103]. Ils ont identifié 5 actions faisables dans chacun des 12 contextes, c.-à-d. **tap**, **press**, **swipe**, **stretch** [*étendre*] et **draw** [*dessiner*]. Chaque action est associée à une commande. Par exemple, la sélection, quelle que soit la **préhension**, est associée à un **tap**. Cependant, pour une action donnée, l'actionneur est différent en fonction de la **préhension**. Par exemple, un **tap** est effectué avec l'index lorsque l'on tient un stylo et avec le pouce lorsqu'on tient un marteau.

Dans une seconde étude, Sharma et coll. ont abordé la question de la distinction entre les microgestes et les mouvements parasites des doigts lors de l'interaction avec des objets du quotidien. Leur premier ensemble de microgestes comprend 3 actions (**tap** [*tap*], **flexion** [*swipe vers l'intérieur*], et **extension** [*swipe vers l'extérieur*])

× 5 actionneurs, testé pour 36 scénarios (p. ex. allumer une bougie, ouvrir le beurre de cacahuète ou lire une lettre) avec 22 objets du quotidien (p. ex. bouteille de vin, éponge, cuillère) [102]. Après avoir étudié la faisabilité de ces microgestes dans chaque scénario, ils ont éliminé deux actionneurs possibles, l'annulaire et l'auriculaire. En effet, la moitié des microgestes effectués avec ces doigts étaient considérés comme difficiles à exécuter par les participants. De plus, ils ont ajouté 4 actions (`swipe left` [*swipe vers la gauche*], `swipe right` [*swipe vers la droite*], `zigzag` [*dessiner un zigzag*] et `circle` [*dessiner un cercle*]). Ce nouvel ensemble fût étudié avec 5 `préhensions`. Bien qu'en théorie, chacun des 21 microgestes (c.-à-d. 7 actions × 3 actionneurs) soit disponible pour chaque `préhension`, en pratique, les combinaisons `préhension` × microgeste n'étaient pas toutes faisables. Cependant, les auteurs n'ont pas listé toutes ces combinaisons impossibles. Dès lors, une question reste ouverte : quelles sont les contraintes imposées par la `préhension` et comment entravent-elles la réalisation de microgestes ?

En synthèse, les études existantes sur les microgestes avec la main occupée soulignent le compromis entre définir un ensemble limité de microgestes qui soient compatibles pour un grand nombre de contextes de `préhension` et définir un ensemble riche de microgestes mais pour un nombre restreint de contextes de `préhension`.

1.2.2 Contexte main libre

L'interaction par microgeste en main libre a aussi été étudiée pour être utilisée en parallèle d'une tâche principale, comme piloter un avion [117] ou faire de l'escalade [80]. Dans ce cas, l'utilisateur doit libérer l'une de ses mains et relâcher sa prise, c.-à-d. lever la main du manche ou du mur d'escalade, pour effectuer le microgeste.

De plus, les microgestes main libre sont souvent étudiés pour le pouvoir d'expression qu'ils offrent et pour le fait qu'ils sont toujours disponibles. Ces deux constats permettent de les étudier pour interagir avec de nombreux objets connectés comme des lampes [19], des montres connectées [123, 19, 56] ou des casques de `Réalité Augmentée (RA)` [35, 119, 118, 75]. En reposant sur des caractéristiques fines du mouvement, les ensembles de microgestes main libre sont grands. Par exemple, Soliman et coll. ont étudié un total de 53 microgestes contenant 6 actions, 4 doigts comme actionneurs, ainsi que 3 phalanges, les ongles et la paume comme surfaces. La reconnaissance des microgestes reposait sur la vision par ordinateur. Cette étude est une des premières à montrer qu'il est possible de créer un système de reconnaissance pour détecter un grand ensemble de microgestes. Way et coll. ont étudié l'utilisation de microgestes pour l'entrée de texte avec des Google glass [118]. Ils ont notamment distingué les microgestes selon qu'ils nécessitent une seule articulation (`finger lift` [*fermer le doigt*]) ou plusieurs lors de la fermeture d'un doigt (`finger curl` [*courber le doigt*]). A cause de la concentration et la réflexion requises pour exécuter le bon microgeste associé à la lettre souhaitée, les participants experts ont obtenu une vitesse d'un microgeste correct par seconde après 10 sessions d'étude, étalées sur un mois. Lee et coll. ont étudié l'utilisation de microgestes pour la `RA` en se focalisant uniquement sur des microgestes effectués

sur les ongles [75]. Leur ensemble de départ contient 144 microgestes. Ils ont ainsi étudié l'utilisation du **tap** sur 9 sous-surfaces de l'ongle (haut, bas, gauche, droite, milieu, haut-droit, haut-gauche, bas-droit, bas-gauche). Au final, en se basant sur les critères de facilité d'exécution, facilité à reconnaître, diversité et consistance, ils n'ont conservé que 29 microgestes. Ces microgestes sont : (**center tap** [*tap au centre de l'ongle*], **tip tap** [*tap sur le haut de l'ongle*], **vSwipes** [*swipe vers le haut/bas*], **flicks** [*pichenette*]) \times (pouce, index, majeur, annulaire, auriculaire) ainsi que **index-middle center Mult-Tap** [*tap au centre de l'ongle de l'index et du majeur*], **index-middle tip Mult-HSwipe** [*swipe vers la droite/gauche sur le bout des ongles de l'index et du majeur*] et **index-middle Mult-Flick** [*pichenette sur les ongles de l'index et du majeur*]. Enfin, Xu et coll. ont réalisé un clavier QWERTY pour l'entrée de texte en **RA** [123]. L'ensemble des touches du clavier ont été positionnées sur la phalange haute de l'index et accessibles par un **tap** du pouce. Ils ont obtenu une vitesse de frappe de 12 mots par minute, semblable aux performances obtenues en répartissant les touches sur les phalanges des deux mains (13 mots par minute) [119]. Alors que ces études sont basées sur des ensembles de microgestes définis par les concepteurs, des études d'élicitation visant à identifier des ensembles de microgestes en main libre définis par l'utilisateur ont été menées et ont conduit à d'autres types de gestes enrichissant l'espace des possibilités. Par exemple, Chan et coll. présentent un consensus sur un ensemble de microgestes entre 16 participants contenant 16 microgestes. L'ensemble comprend des microgestes impliquant des caractéristiques inexplorées par les concepteurs telles que l'utilisation de plusieurs doigts comme actionneur [18]. De plus, comparé à l'étude d'élicitation de Sharma et coll. en main occupée où l'ensemble final ne considère que les actions [103], l'ensemble de Chan et coll. considère certes moins d'actions différentes, mais obtient un ensemble deux fois plus grand en considérant un ou plusieurs actionneur(s) ainsi que différentes surfaces d'action.

En synthèse, les ensembles de microgestes construits pour être toujours disponibles et utilisables sont larges, soulignant le pouvoir d'expression des microgestes. Cependant, ces microgestes nécessitent une main libre et imposent donc de lâcher tout objet éventuellement tenu pour être réalisés.

1.2.3 Vers l'unification des deux contextes

A notre connaissance, seules deux études ont étudié le contexte main libre et main occupée. Cependant, ces deux études se sont concentrées sur le système de reconnaissance. Sharma et coll. ont proposé SparseIMU, un logiciel permettant de concevoir facilement un exo-squelette pour reconnaître 6 actions (**tap** [*tap*], **extension** [*swipe vers l'extérieur*], **flexion** [*swipe vers l'intérieur*], **abduction** [*swipe horizontale en effectuant une abduction*], **adduction** [*swipe horizontale en effectuant une adduction*], **circle** [*dessiner un cercle*]) avec 3 actionneurs différents dans 12 contextes de main occupée, p. ex. tenir une bouteille ou un livre, et le contexte main libre [104]. Toutefois, tout comme dans leur précédente étude [102], cet ensemble n'est pas entièrement compatible avec tous les contextes qu'ils ont étudiés. Par exemple, il n'est pas possible de faire un **thumb tap** [*tap du pouce*] en tenant un stylo avec son

pouce contre son index et son majeur. Saponas et coll. ont utilisé un bracelet pour détecter les microgestes dans trois contextes : main libre, tenir une tasse et tenir un sac [99]. Ils ont pris en compte quatre actionneurs : index, majeur, annulaire et auriculaire ; ainsi qu'une action spécifique pour chaque contexte : `tap` en main libre, `press` en tenant une tasse et `pull up` [*tirer la lanière vers le haut*] en tenant un sac. Dans les deux études ci-dessus, le but des auteurs était d'exposer le taux de reconnaissance de leur système.

En synthèse, les seuls ensembles de microgestes étudiés dans les deux contextes main libre et main occupée sont compatibles avec peu de `préhension` [99], comparé à ceux des études en main occupée, ou ne permettent pas d'explorer la richesse des ensembles de microgestes en main libre [99, 104].

Partant de ces constats, dans la première partie de ce manuscrit, nous allons explorer deux questions de recherche :

- Comment caractériser les contraintes liées aux contextes de `prévisions` pour aider à la conception d'ensembles de microgestes qui soient compatibles avec la main libre et la main occupée ?
- Est-il possible d'utiliser des caractéristiques d'ensembles de microgestes main libre, tel que les phalanges, en main occupée ?

Toutefois, la variété des microgestes, soulignée au début de ce chapitre et dans la [Table 1.1](#), soulève des problèmes terminologiques. Ainsi, avant de pouvoir répondre à ces deux questions ([chapitre 3](#), [chapitre 4](#)), il faut pouvoir décrire de façon claire et précise les microgestes. C'est l'objet du chapitre suivant ([chapitre 2](#)).



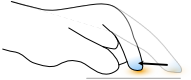



| Image | Nom du microgeste en anglais | Nom du microgeste en français | Articles |
|---|------------------------------|---|---------------------|
|  | Pinch | | [99] |
| | Press | | [20] |
| | Tab | <i>toucher</i> | [122] |
| | Tap | | [18, 105] |
| | Touch | | [118] |
| | Open/Close gap | <i>Ouvrir/fermer l'espace entre deux doigts</i> | [118] |
|  | Tap | <i>Tap</i> | [75, 102, 103, 117] |
|  | Drag | <i>Glisser</i> | [106, 122] |
| | Slide | <i>Glisser</i> | [105, 118] |
| | Swipe | <i>Glisser</i> | [103] |
| | Flexion/Extension | <i>Glisser vers l'intérieur/l'extérieur</i> | [102, 104] |
| | Drag&Drop | <i>Glisser déposer</i> | [122] |
| | Swipe | <i>Swipe</i> | [18] |
| | Flick | <i>Pichenette</i> | [28, 75] |
| | Multi-finger snap | <i>Claquement de plusieurs doigts</i> | [28] |
| | Ream | <i>Ramer</i> | [122] |
|  | Squeeze | <i>Presser</i> | [99] |
| | Pull up | <i>Tirer la lanière vers le haut</i> | [99] |
| | Press | <i>Press</i> | [103] |
| | Force tap | <i>Tap fort</i> | [119] |
|  | Strech | <i>Étirer</i> | [103] |
| | Lift/Extend | <i>Ouvrir/fermer le doigt</i> | [118] |
| | Curl | <i>Courber le doigt</i> | [118] |
| | Up | <i>En-haut</i> | [33] |
| | Thumb up | <i>Pouce levé</i> | [122] |
|  | Draw | <i>Dessiner</i> | [18, 105] |
| | Circle | <i>Dessiner un cercle</i> | [18] |
| | Triangle | <i>Dessiner un triangle</i> | [33] |
| | Zigzag | <i>Dessiner un zigzag</i> | [102] |

TABLE 1.1: Résumé des noms de microgestes présentés dans ce chapitre.

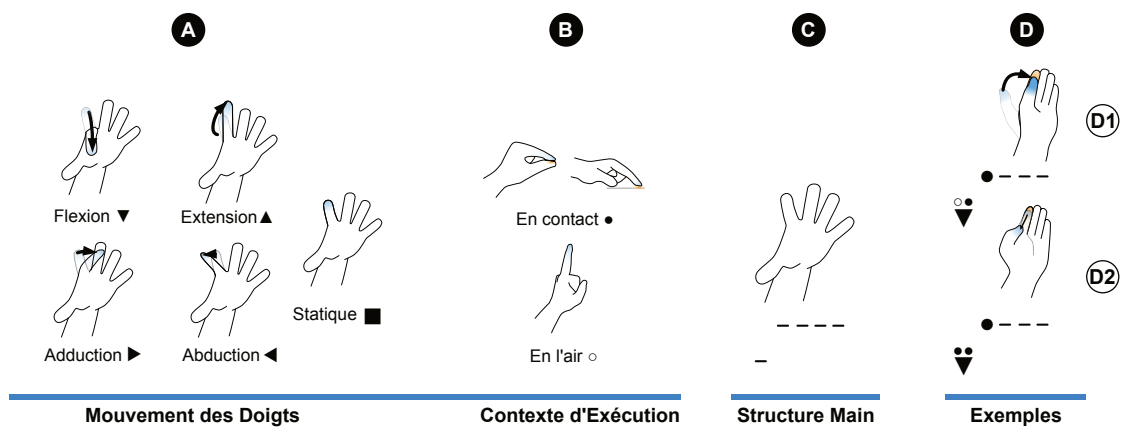


FIGURE 2.1: La notation μ Glyphe. Les éléments de base : **A)** mouvements des doigts et **B)** contextes d'exécution. **C)** Structure graphique basée sur une correspondance directe avec la main. **D)** Deux exemples : **D1)** toucher du pouce sur l'index : une flexion du pouce commençant en l'air et se terminant par un contact avec l'index, **D2)** glisser du pouce sur l'index vers la paume : une flexion du pouce commençant et se terminant au contact de l'index.

Chapitre 2

Notation de microgestes : μ Glyphe

Les travaux de ce chapitre ont fait l'objet de deux publications : μ Glyphe : Une Notation Graphique pour Décrire les Microgestes [15] et μ Glyph : a Microgesture Notation [17].

Comme souligné dans le chapitre précédent, il existe une très grande variété de microgestes effectués en main libre ou main occupée. Or, en l'absence d'une terminologie précise et consensuelle, certains articles incluent une description textuelle détaillée de chaque microgeste [105, 18, 118, 119], d'autres articles décrivent un microgeste uniquement par un nom et une image [103, 102, 122, 28, 33, 20, 56, 75, 79]. Ce manque de précision peut conduire à une mauvaise interprétation d'un microgeste, p. ex. le microgeste `ream` [*ramer*] [122] pourrait correspondre à un microgeste où le doigt effectue une succession d'extension et flexion en l'air pour mimer l'action de ramer, mais correspond en réalité à un microgeste où l'index effectue des aller-retours sur le pouce.

De plus, les descriptions dans la littérature du domaine manquent souvent d'une définition précise des états initiaux et finaux d'un microgeste. Par exemple, un `tap` [18, 117] se termine-t-il par un contact ou en l'air ? Cette question des états initiaux et finaux consiste à identifier quelle partie du mouvement est essentielle pour décrire le microgeste. Nous illustrons cette question en faisant l'analogie entre un appui sur le bouton de la souris et un clic qui consiste à appuyer puis relâcher le bouton. Pour un `tap`, est-ce l'appui du doigt sur une surface qui constitue la partie clé du mouvement ? Ou est-ce l'ensemble de l'action (appuyer puis relever le doigt) ? Dans la littérature actuelle, un `touch` [122], un `tab` [122], un `tap` [18] et un `press` [20] sont équivalents à l'action d'appuyer sur le bouton de la souris, un `tap` [37] est équivalent à maintenir le bouton de la souris appuyé, tandis qu'un `tap` [117] est un clic sur le bouton.

L'absence de description précise entraîne des problèmes de dénomination. Ces problèmes ne sont pas anodins car ils rendent difficile la mise en relation et la comparaison des travaux de recherche. En effet, un même microgeste peut être désigné par plusieurs noms, comme l'illustrent les trois exemples suivants (décrits avec précision dans la Table 2.7) :

- `close gap between index and middle` [*fermer l'espace entre l'index et le majeur*] [118], `tap of index and middle` [*tap de l'index et du majeur*] [18]

- `drag` [*glisser*] [122] et `slide` [*glisser*] [105]
- `multi finger snap` [*claquement de plusieurs doigts*] [28] et `swipe across all fingers` [*swipe sur tous les doigts*] [18]

Par ailleurs, un même nom peut désigner des microgestes différents. Dans les trois exemples suivants, nous citons des noms utilisés pour différents microgestes et nous fournissons leurs descriptions précises qui mettent en évidence leurs différences dans le tableau 2.7 :

- `extend` [*étendre*] [118] et `extension` [*swipe vers l'extérieur*] [102]
- `tap` [*toucher*] [18] et `tap` [*tap*] [117],
- `press` [*toucher*] [20] et `press` [*press*] [103]

Dans ce chapitre, nous présentons μ Glyphe, (prononcé « micro »glyphe), une notation permettant de définir précisément les microgestes.

2.1 Littérature sur les notations de gestes

Les dimensions cognitives des notations introduites par Green [45] et enrichies par Green et Petre [44] définissent des principes qui peuvent guider la conception d'une notation utilisable. Ces dimensions fournissent un cadre pour le raisonnement et l'analyse des caractéristiques d'une notation. Il faut cependant noter que ces dimensions ne sont pas indépendantes : pour une notation donnée, un compromis entre les dimensions est réalisé en fonction des objectifs visés par la notation. En fonction des besoins, il est possible de se focaliser sur une sous-partie des dimensions qui représentent le mieux les caractéristiques essentielles visées. Ainsi, nous ne donnons que les définitions des dimensions utilisées dans ce chapitre.

Niveau d'abstraction¹ : disponibilité de différents niveaux et types d'abstraction.

Correspondance² : similarité de la notation à ce qu'elle représente.

Cohérence³ : facilité de deviner le sens des symboles après avoir appris une partie de la notation.

Verbo­sité/concision⁴ : caractéristique de l'expression résultante qui peut être verbeuse ou concise.

Bien qu'il existe différentes notations pour les mouvements et les gestes, nous nous concentrons sur les notations qui décrivent les mouvements des doigts, en particulier les notations multi-points (*multi-touch*). Nous invitons les lecteurs à lire GestureCards [53] pour un examen plus détaillé des notations multi-points. Nous fournissons ici un résumé des notations existantes organisées en trois types : textuelles, graphiques et hybrides combinant des descriptions textuelles et graphiques.

1. *Abstraction gradient*
2. *Closeness of mapping*
3. *Consistency*
4. *Diffuseness / terseness*

Les notations textuelles s'appuient sur un ensemble de lettres, chiffres, opérateurs et règles pour définir les gestes. Choi et coll. proposent une notation textuelle pour les gestes de la main en 3D qui utilise un codage numérique pour décrire la pose de la main [21]. Par exemple, une main fermée avec l'index ouvert est représentée par 51666 ; 2422-233. Il est complexe de lire et d'écrire une telle description sans connaître parfaitement la notation (faible **correspondance**). Krupka et coll. proposent également une notation textuelle basée sur XAML qui permet aux développeurs de décrire les gestes de la main en 3D comme des séquences de poses de la main en utilisant des mots-clés en langage naturel tels que « majeur » « au-dessus » et « index » [69]. Cependant, les deux notations restent au niveau du doigt et il n'est pas possible de décrire un **toucher** sur une partie d'un doigt, p. ex. un **toucher sur une phalange** ou un **toucher sur un côté d'un doigt**. Décrire des microgestes avec les poses de la main conduira également à des descriptions longues et verbeuses de la séquence des poses intermédiaires des doigts (faible **concision**).

Pour les gestes multi-points, les notations textuelles sont souvent construites de manière à être lisibles par l'ordinateur afin de créer des outils de reconnaissance de gestes. À cette fin, Proton++ utilise des expressions régulières et trois événements atomiques, à savoir le *touché* (D, pour *down*), le *mouvement* (M pour *move*), et le *relâché* (U, pour *up*), pour définir et reconnaître les gestes multi-points [67]. Ces événements atomiques sont représentés par la structure $E_{TID}^{A1:A2:\dots}$ où $E \in \{D, M, U\}$, TID est l'identifiant du toucher et $A1 :A2 :\dots$ sont les propriétés du toucher, p. ex. la direction de la trajectoire avec N (nord), S (sud), W (ouest), E (est), O (direction non détectée). Toutefois, des descriptions textuelles aussi précises peuvent devenir compliquées (faible **correspondance**). Par exemple, $D_1^O M_1^O * M_1^S M_1^{O|S} * M_1^E M_1^{O|E} * U_1^{O|E}$ décrit une trajectoire en forme de L. GeForMt utilise un ensemble d'événements de niveau supérieur définissant les gestes de base, p. ex. ligne ou cercle [64]. Les événements peuvent être combinés pour créer et reconnaître des gestes plus complexes. Par exemple, CONNECTÉ_DÉPART[LIGNE_SW ;LIGNE_SE] décrit deux doigts qui se touchent puis se séparent, l'un vers le sud-ouest et l'autre vers le sud-est. En utilisant des mots, les descriptions sont plus faciles à lire que celles de Proton++, mais il en résulte de longues expressions (faible **concision**). L'utilisation de mots comme dans GeForMt augmente la lisibilité humaine des descriptions. Cependant, lorsqu'il s'agit de décrire précisément la forme du geste, l'utilisation de mots peut conduire à des descriptions plus longues et plus difficiles à comprendre que les descriptions graphiques.

Les notations graphiques s'appuient sur un ensemble de symboles graphiques disposés dans l'espace. Les notations graphiques sont souvent conçues pour être lisibles par l'homme. Dans les notations multi-points, ces éléments graphiques sont souvent des flèches, pour les mouvements (forte **correspondance**), et des icônes, pour les caractéristiques supplémentaires. Par exemple, Monox utilise un ensemble de flèches différentes, p. ex. des têtes de flèches différentes, pour représenter les gestes de base, comme le glisser, le **swipe** et le glisser-déposer [42]. Monox est une notation gestuelle pour la conception collaborative et l'analyse des interactions

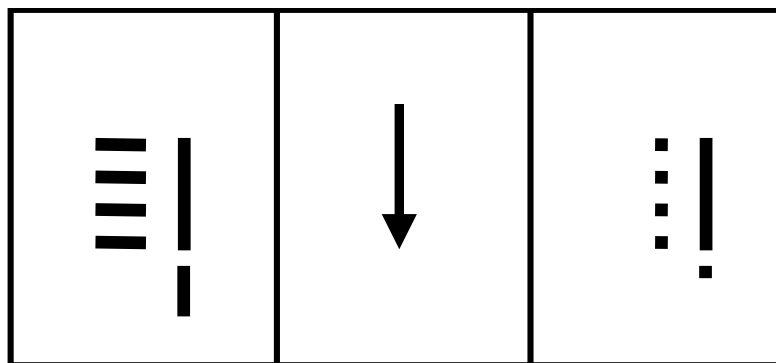


FIGURE 2.2: Exemple d’une description d’un geste en utilisant la notation introduite dans Charade [8]. Le geste représenté est un mouvement du bras vers le bas en fermant tous les doigts.

multi-points.

Baudel et coll. ont créé Charade, une application utilisant les gestes de la main en 3D[8]. Pour décrire les gestes, ils proposent une notation représentant le mouvement du bras avec la position initiale et finale de la main. Des symboles graphiques, p. ex. des points et des lignes, sont utilisés pour indiquer si un doigt est fermé ou non. Les symboles sont disposés dans l’espace selon une représentation de la main qui offre une forte **correspondance** (Figure 2.2). Toutefois, la notation repose sur la description du poignet et de la pose de chaque doigt (faible **niveau d’abstraction**). De plus, décrire l’interaction entre ces doigts, p. ex. le contact entre deux doigts, impliquerait l’introduction de nouveaux symboles et la refonte de la structure graphique de la notation.

La Labanotation est une notation de mouvements pour décrire la danse et les chorégraphies [47]. Elle utilise un ensemble de symboles graphiques pour représenter la partie du corps qui bouge, la durée, la direction et d’autres caractéristiques du mouvement. Un sous-ensemble spécifique de la notation se concentre sur les mouvements de la main et des doigts [48]. Cependant, il faut un apprentissage et une formation intensive pour lire et utiliser cette notation pour des descriptions précises : la liste complète des symboles graphiques de Labanotation est décrite dans 10 livres différents. Par conséquent, il est important pour une notation graphique d’avoir une grande transparence sémantique, c.-à-d. « qu’un novice peut facilement déduire la signification d’un symbole à partir de son apparence », afin de déplacer la charge cognitive de l’apprentissage et la mémorisation du symbole vers l’interprétation du symbole (forte cohérence avec les symboles connus par l’utilisateur). Néanmoins, la Labanotation résume les informations minimales qu’une notation de mouvements des doigts doit décrire : « [la notation] définit [...] les différentes parties [de la main] ainsi que la manière dont elles se plient, s’étendent ou entrent en contact avec des objets, une autre main ou une autre partie de la même main » [48]. Benesh est une autre notation de danse [9], qui représente le corps comme une portée (forte **correspondance**). Pour les mouvements, seuls les actionneurs (membres du corps en mouvement) sont décrits dans la portée de cinq lignes.

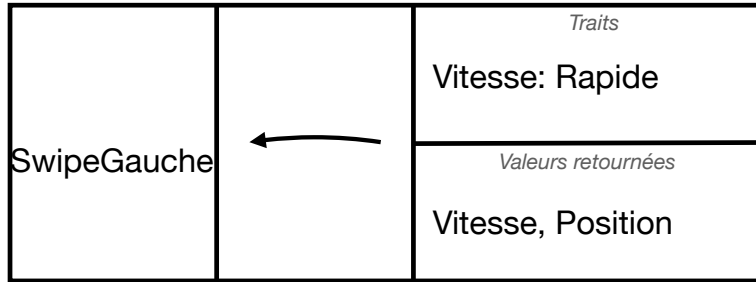


FIGURE 2.3: Exemple d’une carte de geste. Image reproduite depuis l’article *GestureCards* [53].

Les notations hybrides utilisent des éléments textuels et graphiques pour décrire chaque partie du mouvement avec la représentation la plus appropriée. Les éléments graphiques peuvent être utilisés pour abstraire des concepts qui nécessitent des descriptions textuelles complexes et/ou longues [89]. En outre, les symboles graphiques peuvent facilement représenter le contenu perceptuel du concept représenté, c.-à-d. une forte **correspondance**. Par exemple, les *GestureCards* [53], appelées cartes de geste en français, représentent graphiquement le mouvement (forte **correspondance**) et utilisent des éléments textuels supplémentaires pour spécifier des caractéristiques telles que la durée, la direction, la pression et la vitesse (forte **cohérence**). La Figure 2.3 présente une carte de geste pour le geste **swipe** vers la gauche.

Compte tenu de la variété des caractéristiques des microgestes déjà étudiés, nous concluons qu’une notation des microgestes doit :

- permettre la description sans ambiguïté d’une grande variété de microgestes ;
- permettre la description des microgestes à plusieurs niveaux d’abstraction (**niveau d’abstraction** [44]), p. ex. à un haut niveau, en ignorant quel doigt est touché par un autre doigt et à un bas niveau en décrivant le doigt qui effectue l’action, le doigt qui est touché ou d’autres caractéristiques telles que la pression exercée ou l’état d’extension d’un doigt ;
- avoir un ensemble stable d’éléments fondamentaux qui peut être étendu de façon cohérente (forte **cohérence** [44]) avec de nouvelles caractéristiques au fur et à mesure que la recherche sur les microgestes évolue (p. ex. l’exploration des ongles comme surface de contact [75]) ;
- être facile à lire et écrire pour faciliter une adoption généralisée dans la communauté (forte **correspondance** et **concision** [44]).

Sur la base de ces exigences, la Table 2.1 résume notre revue des notations existantes. La section suivante décrit μ Glyphe, une nouvelle notation que nous proposons pour combler les lacunes des notations existantes en répondant à toutes ces exigences.

| | Choi et coll. [21] | Krupka et coll. [69] | Proton++ [67] | GeForMt [64] | Monox [42] | Charade [8] | Labanotation [48] | GestureCards [53] | Texte/Images [18, 105] | μ Glyphe |
|--|--------------------|----------------------|---------------|--------------|------------|-------------|-------------------|-------------------|------------------------|--------------|
| Dimensions cognitives | | | | | | | | | | |
| Niveau d'abstraction description à plusieurs niveaux d'abstraction | - | - | - | - | - | - | ? | ? | + | + |
| Cohérence en particulier, robuste à l'ajout de nouvelles caractéristiques | - | ? | ? | ? | + | - | + | + | - | + |
| Correspondance correspondance claire entre la représentation et le mouvement | ? | ? | - | + | + | + | - | + | + | + |
| Verbosité/concision description concise du mouvement | + | - | + | - | - | - | + | - | - | + |
| Caractéristiques du mouvement | | | | | | | | | | |
| Description de l'état initial et final du mouvement | + | + | + | ? | ? | + | + | - | ? | + |
| Description des doigts | + | + | - | - | - | + | + | - | + | + |
| Description des autres parties de la main (phalanges, côté d'un doigt, paume, ...) | - | - | - | - | - | - | + | - | + | + |
| Caractéristiques autres que la direction du mouvement (pression, amplitude, durée, ...) | - | - | - | - | ? | ? | ? | + | + | + |

TABLE 2.1: Liste des dimensions cognitives et des caractéristiques du mouvement prérequis pour une notation des microgestes. Prérequis et notations existantes : « + » : la notation satisfait le prérequis, « ~ » : la notation satisfait partiellement le prérequis, « - » : la notation ne satisfait pas le prérequis.

2.2 Notation μ Glyphe

μ Glyphe est une notation hybride décrivant tous les mouvements possibles des doigts et le contact ou non d'un doigt avec une surface. En se référant aux *dimensions cognitives des notations* [44], la conception de la notation μ Glyph est la suivante. μ Glyphe est basé sur une représentation graphique de la main (**correspondance** élevée) où seuls les éléments clés du microgeste sont représentés. À cette fin, les symboles graphiques correspondent à un ensemble fini d'événements de bas niveau qui décrivent de manière concise (forte **concision**) tous les types de mouvements d'un doigt. Un microgeste est une séquence de mouvements des doigts dans un contexte d'exécution. Les symboles graphiques représentent aussi le contexte d'exécution, qui précise si le mouvement est effectué en l'air ou en contact avec une surface. La description textuelle est utilisée de manière cohérente (forte **cohérence**) pour les caractéristiques les plus fines du mouvement (**niveau d'abstraction**). La description textuelle contribue également à l'extensibilité de la notation en facilitant l'ajout de nouvelles caractéristiques du mouvement à l'avenir.

Après avoir exposé les grands principes de conception de la notation μ Glyphe, nous en faisons ci-dessous une présentation étape par étape. La [Figure 2.5](#) à la fin

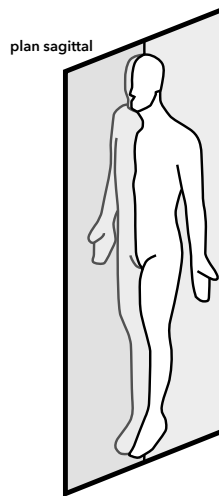


FIGURE 2.4: Plan sagittal





| Press | Glissement vers le bas | Glissement vers le haut | Relâcher |
|---|---|---|--|
|  |  |  |  |
| ◣ | ◣◣ | ◣◣ | ◣◦ |

TABLE 2.2: Exemples de microgestes décrits à très haut niveau d'abstraction avec les glyphes de mouvement et de contexte de μ Glyphe.

de la section résume toutes les étapes.

2.2.1 Mouvements, contextes et structure graphique

En se basant sur la biomécanique, nous utilisons les mouvements d'un doigt décrits dans la Figure 2.1. Un glyphe est associé à chacun de ces mouvements dérivés d'observations anatomiques [111]. Les cinq mouvements qui suivent font partie des éléments centraux de la notation μ Glyphe :

Extension (▲) : mouvement du doigt s'éloignant de la paume.

Flexion (▼) : mouvement du doigt se rapprochant de la paume.

Abduction (◄) : mouvement du doigt s'éloignant du plan sagittal, représenté dans la Figure 2.4.

Adduction (►) : mouvement du doigt se rapprochant du plan sagittal, représenté dans la Figure 2.4.

Statique (■) : absence de mouvement.

Les glyphes de mouvements choisis sont inspirés des symboles communément utilisés pour représenter les concepts *lecture* (\blacktriangleright métaphore pour le mouvement) et *arrêt* (\blacksquare métaphore pour l'absence de mouvement). L'orientation des triangles permet de représenter la direction des mouvements.

Ces mouvements s'effectuent dans un contexte d'exécution caractérisant si le mouvement est fait en l'air ou en contact avec une surface. Pour représenter le contact sur une surface nous avons choisi le glyphe \bullet (un cercle plein), comme dans de nombreuses représentations de gestes multipoints (p. ex., guide iOS⁵, Wikipedia « Pointing device gesture »⁶). Par opposition, le doigt en l'air est représenté par le glyphe \circ (un cercle creux). Seuls les contextes au début et à la fin du mouvement sont spécifiés définissant six cas possibles regroupés en deux groupes.

1. Contexte avec un seul glyphe de contexte

- \circ : le doigt est en l'air et reste en l'air, à la même position. Il n'y a pas de mouvement possible.
- \bullet : le doigt reste à la même position sur une surface. Des mouvements du doigt sont possibles, tous subtils. Par exemple, exercer une pression sur une surface nécessite un petit mouvement du doigt sur la surface sans pour autant changer de position de contact.

2. Contexte avec deux glyphes de contexte

- $\circ\circ$: le doigt se déplace d'une position à une autre en l'air.
- $\circ\bullet$: le doigt se déplace d'une position en l'air à une position en contact avec une surface.
- $\bullet\circ$: le doigt se déplace d'une position en contact avec une surface à une position en l'air.
- $\bullet\bullet$: le doigt se déplace en contact avec une surface, d'une position à une autre.

Extension (\blacktriangle), **Flexion** (\blacktriangledown), **Abduction** (\blacktriangleleft) et **Adduction** (\blacktriangleright) sont utilisables avec les contextes pour lesquels un mouvement est possible ($\circ\circ$, $\circ\bullet$, $\bullet\circ$, $\bullet\bullet$ ou \bullet). **Statique** (\blacksquare) est utilisable uniquement avec les deux contextes sans changement de position (\circ ou \bullet). Les glyphes de contexte sont placés au-dessus d'un glyphe de mouvement. Deux structures graphiques coexistent : $\bar{\quad}$ pour les contextes à un seul glyphe et $\bar{\bar{\quad}}$ pour les contextes à deux glyphes. Le glyphe $-$ (tiret) représente un emplacement non spécifié, un joker pour n'importe quel glyphe.

De la même façon que des lettres forment des mots, les groupes de glyphes forment des événements. Un événement est une combinaison de glyphes de mouvement et de contexte (p. ex. $\blacktriangledown^{\bullet\bullet}$). Ces combinaisons de glyphes permettent de décrire les microgestes à un niveau d'abstraction élevé, comme l'illustre la [Table 2.2](#), les microgestes élémentaires étant constitués d'un seul événement. En utilisant des

5. <https://support.apple.com/en-gb/guide/iphone/iph75e97af9b/ios>

6. https://en.wikipedia.org/wiki/Pointing_device_gesture



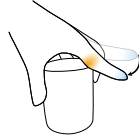


| Structure de la main | Flexion de l'index | Toucher de la phalange basse de l'index |
|---|---|--|
|  |  |  |
| _----- | $\overset{\circ\circ}{\nabla}$ ----- | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_b$ ----- |
| | Flexion MCP (metacarpophalangeal) de l'index | Flexion PIP (proximal interphalangeal) de l'index |
| |  |  |
| | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_{MCP}$ ----- | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_{PIP}$ ----- |

TABLE 2.3: Exemples de microgestes décrits à bas niveau d'abstraction en spécifiant les caractéristiques de l'actionneur comme définies par μ Glyphe.

emplacements non spécifiés pour les mouvements et/ou les contextes, les microgestes peuvent être décrits à un niveau d'abstraction encore plus élevé. Par exemple, un glissement du doigt peut être décrit comme le mouvement d'un doigt d'une position en contact sur une surface à une autre position, sans spécifier la direction. La description μ Glyphe correspondante est : $\overset{\circ\circ}{-}$. Il peut s'agir d'un glissement vers le haut $\overset{\circ\circ}{\blacktriangle}$ ou d'un glissement vers le bas $\overset{\circ\circ}{\blacktriangledown}$, par exemple.

Pour obtenir une description plus détaillée d'un microgeste (bas niveau d'abstraction), μ Glyphe inclut des caractéristiques de mouvement, telles que l'actionneur (la partie de la main qui exécute le mouvement), et des caractéristiques de contexte, telles que le récepteur (la partie de la main sur laquelle le mouvement est exécuté). Nous présentons ci-dessous ces caractéristiques des événements et expliquons comment combiner des événements pour décrire des microgestes composés de plusieurs événements.

2.2.2 Caractéristiques du mouvement : actionneur

L'actionneur représente la partie de la main, c.-à-d. le doigt, qui effectue le mouvement [105, 118, 56, 119, 99, 122, 18]. Pour spécifier ce doigt actionneur, nous adoptons une structure graphique représentant une main avec les positions des doigts : _----- (de gauche à droite : pouce, index, majeur, annulaire, auriculaire ;

voir la représentation de gauche dans la [Table 2.3](#)). Tout comme la structure graphique d'un événement, une description basée sur la main peut inclure des emplacements non spécifiés (—). Lorsqu'il est spécifié, un emplacement définit un événement. Par exemple, une flexion de l'index qui se termine en contact avec une surface est décrite comme suit : $\overset{\circ}{\nabla}---$.

Pour des descriptions plus fines, en accord avec les principes énoncés de la notation ([section 2.2](#)), d'autres caractéristiques de l'actionneur sont spécifiées textuellement, comme des indices de l'événement. Les parties du doigt qui entrent en contact avec une surface sont représentées par les symboles textuels suivants en tant qu'indices de l'événement : b (phalange basse), m (phalange médiane), t (phalange haute, *tip*) et n (ongle, *nail*). Par exemple, un **toucher de la phalange basse de l'index** s'écrit $\overset{\circ}{\nabla}_b---$. Des symboles supplémentaires indiquent le côté du doigt qui effectue le mouvement : l (gauche, *left*), r (droit, *right*), f (devant, *front*) et d (derrière). Par exemple, un **toucher du côté gauche de l'index** s'écrit $\overset{\circ}{\nabla}_l---$. Les phalanges et les côtés peuvent être combinés, p. ex. un **toucher du côté gauche de la phalange médiane de l'index** s'écrit $\overset{\circ}{\nabla}_{m,l}---$. Outre les parties des doigts, il est possible de spécifier les articulations des doigts qui effectuent le mouvement. Par exemple, le microgeste **finger lift** [*fermer le doigt*], présenté dans EMGRIE [118], est exécuté par une articulation spécifique du doigt. Pour décrire l'articulation du doigt, nous introduisons deux indices : MCP (métacarpo-phalangienne) utilisé dans EMGRIE [118], et PIP (interphalangienne) qui n'a encore jamais été utilisé dans la littérature microgeste. L'articulation MCP est entre le doigt et la paume. L'articulation PIP est entre les phalanges des doigts. Le microgeste **finger lift** [*fermer le doigt*] [118] s'écrit $\overset{\circ}{\nabla}_{MCP}$.

[Table 2.3](#) montre certains des exemples présentés ci-dessus comprenant, pour chaque microgeste, une représentation graphique et sa description μ Glyphe.

2.2.3 Autres caractéristiques du mouvement

Au-delà de l'actionneur du mouvement, nous introduisons des caractéristiques du mouvement lui-même.

Tout d'abord, lorsqu'il est en contact avec une surface, l'actionneur peut exercer une pression sur la surface [119, 118, 103, 125, 117]. Bien que, en théorie, nous puissions détecter un nombre infini de niveaux de pression, en pratique, et sans retour visuel, un utilisateur ne peut en distinguer qu'un nombre limité [120]. Dans la littérature sur les microgestes, il y a au plus trois niveaux de pression [119]. Nous représentons ces trois niveaux de pression par Lo, Md et Hi, respectivement pour un niveau de pression faible (*low*), moyen (*middle*) ou élevé (*high*). Si seuls deux niveaux sont utilisés, nous recommandons alors d'utiliser Lo et Hi. Dans la notation μ Glyphe, le niveau de pression est spécifié sous le glyphe de mouvement. Par exemple, un glissement avec un haut niveau de pression constant sur une surface s'écrit $\overset{\circ}{\nabla}_{Hi}$. Si le niveau de pression change entre le début et la fin du mouvement, le









| Toucher du pouce sur l'index | Toucher du pouce sur l'ongle du majeur | Toucher du pouce sur la base du majeur | Toucher de l'index sur la paume |
|---|---|---|---|
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

TABLE 2.4: Exemples de microgestes décrits à bas niveau d'abstraction en spécifiant les caractéristiques du récepteur comme définies dans μ Glyphe.

changement de pression est indiqué par une flèche entre les deux niveaux de pression. Par exemple, l'augmentation de la pression d'un doigt déjà en contact avec une surface s'écrit $\overset{\bullet}{\nabla}$. Si nécessaire, de nouveaux niveaux de pression peuvent être définis et des valeurs de pression peuvent être spécifiées, p. ex. une augmentation de la pression de 1 à 3 *Newton* $\overset{1N \rightarrow 3N}{\nabla}$.

Deuxièmement, les microgestes sont décrits comme des mouvements rapides et subtils [105, 18, 103], correspondant à deux caractéristiques du mouvement supplémentaires : la durée et l'amplitude du mouvement. Même si ces deux caractéristiques sont rarement utilisées dans la littérature sur les microgestes, elles peuvent être spécifiées sous le glyphe du mouvement. Par exemple, une durée maximale de 40 ms sans mouvements s'écrit $\overset{t < 40ms}{\blacksquare}$. De même, l'amplitude peut être utilisée pour spécifier un mouvement. L'analyse de la littérature a permis d'identifier trois amplitudes de mouvement : Cl (fermé, *Close*), Ha (entrouvert, *Half*) et Op (ouvert, *Open*). Par exemple, l'extension d'un doigt se terminant par un doigt entrouvert s'écrit $\overset{Op}{\blacktriangle}$ et la flexion d'un doigt complètement ouvert vers un doigt entrouvert s'écrit $\overset{Op \rightarrow Ha}{\nabla}$. En outre, la pose d'un doigt (p. ex. un doigt entrouvert) s'écrit $\overset{Ha}{\blacksquare}$. Il est également possible de spécifier le pourcentage d'ouverture du doigt. L'extension d'un doigt se terminant par un doigt ouvert à 25% s'écrit $\overset{\rightarrow 25\%}{\blacktriangle}$.

2.2.4 Caractéristiques du contexte : récepteur

Le récepteur est la surface de contact. Avec μ Glyphe, les caractéristiques d'un récepteur ne sont donc utilisées que dans des contextes où une surface de contact est impliquée. En se basant sur la littérature, μ Glyphe permet de décrire deux types de surfaces de contact : une partie de la main, p. ex. [105] et un objet, p. ex. [103].

Lorsque la surface de contact fait partie de la main, elle est décrite par le glyphe de contact (\bullet) sur la structure graphique représentant la main. Par exemple,





| Tap | Swipe du pouce sur l'index vers la paume | Tap de l'index ou du majeur sur le pouce | Tap de l'index et du majeur sur le pouce |
|---|---|--|--|
|  |  |  |  |
| $\nabla; \circ$ | $\circ \cdot \text{---} ; \nabla \cdot \text{---} ; \circ \cdot \text{---}$ | $\left(\begin{array}{c} \cdot \nabla \text{---} ; \text{---} \cdot \nabla \text{---} \\ \cdot \nabla \text{---} ; \text{---} \cdot \nabla \text{---} \end{array} \right) $ | $\left(\begin{array}{c} \cdot \nabla \text{---} \cdot \nabla \text{---} \\ \cdot \nabla \text{---} \cdot \nabla \text{---} \end{array} \right) ;$ |

TABLE 2.5: Séquence, choix and parallélisme : exemples de descriptions μ Glyphe. Sur la gauche, description à haut niveau d'abstraction d'un microgeste. Pour les trois suivants, descriptions à bas niveau d'abstraction d'un microgeste.

un **toucher** du pouce sur l'index s'écrit comme suit : $\nabla \cdot \text{---}$. Pour des descriptions plus détaillées, les caractéristiques de l'actionneur s'appliquent au récepteur. Les symboles textuels b (phalange basse), m (phalange médiane), t (phalange haute) et n (ongle) peuvent aussi décrire le récepteur. Par exemple, un **toucher** du pouce sur la base du majeur s'écrit comme $\nabla \cdot \text{---} \cdot \text{b}$ et un **toucher** du pouce sur l'ongle du majeur comme $\nabla \cdot \text{---} \cdot \text{n}$. Un contact sur la paume de la main est représenté par le glyph de contact (\bullet) au centre de la structure graphique représentant la main : $\text{---} \bullet \text{---}$. Par exemple, un **toucher** de l'index sur la paume de la main s'écrit : $\text{---} \bullet \nabla \text{---}$. Tandis que la représentation des doigts est nécessaire pour éviter toute ambiguïté de position, la paume n'est représentée que dans le cas où un contact s'effectue dessus. Enfin, si nécessaire, il est possible de représenter la surface qui vient d'être quittée avec le symbole \circ . Ainsi, un **relâcher** de l'index depuis le pouce s'écrit : $\circ \nabla \text{---}$

Si la surface de contact est un objet, ce dernier est représenté par un glyphe représentant un engrenage : $\text{---} \bullet \text{---}$. Toute information supplémentaire sur cet objet est représentée en indice du glyphe, en bas à gauche. Par exemple, un **toucher** de la base de l'index sur un objet, représenté dans la Table 2.3, peut être décrit plus précisément : $\text{---} \nabla \text{---} \cdot \text{b} \text{---} \text{---} \text{tasse} \text{---}$.

La Table 2.4 reprend les exemples de microgestes présentés ci-dessus, en fournissant pour chaque microgeste une représentation graphique et sa description selon la notation μ Glyphe.

2.2.5 Combinatoire et factorisation des événements

Les symboles suivants sont inspirés d'autres notations du mouvement [21, 107].

2.2.5.1 Séquence

Jusqu'ici, nous avons présenté une notation permettant de décrire un seul événement. Toutefois, un microgeste est souvent composé de deux événements ou plus. Une séquence d'événements est représentée par une suite d'événements séparés par un point-virgule « ; ».

Par exemple, un **swipe** du pouce vers le bas sur l'index s'écrit comme $\circ\bullet\text{---}$; $\overset{\circ}{\underset{\circ}{\blacktriangledown}}\bullet\text{---}$; $\circ\text{---}$ et un **tap** s'écrit, à un haut niveau d'abstraction, comme $\overset{\circ}{\underset{\circ}{\blacktriangledown}};$ $\overset{\circ}{\underset{\circ}{\blacktriangle}}$. Il est important de noter qu'à un niveau d'abstraction élevé, le(s) actionneur(s) du premier événement reste(nt) le(s) même(s) tout au long de la séquence. Par exemple, $\overset{\circ}{\underset{\circ}{\blacktriangledown}};$ $\overset{\circ}{\underset{\circ}{\blacktriangle}}$ peut représenter $\overset{\circ}{\underset{\circ}{\blacktriangledown}};$ $\overset{\circ}{\underset{\circ}{\blacktriangle}}$ ou $\overset{\circ}{\underset{\circ}{\blacktriangledown}};$ $\overset{\circ}{\underset{\circ}{\blacktriangle}}$ mais ne peut représenter $\overset{\circ}{\underset{\circ}{\blacktriangledown}};$ $\overset{\circ}{\underset{\circ}{\blacktriangle}}$.

2.2.5.2 Choix

Une description μ Glyphe d'un microgeste peut inclure un choix entre plusieurs valeurs d'une caractéristique. Le choix est alors représenté par un trait vertical « | ».

Par exemple, un **swipe** du pouce vers la droite sur la phalange basse ou médiane de l'index s'écrit $(\circ\bullet^b\text{---} ; \overset{\circ}{\underset{\circ}{\blacktriangledown}}\bullet^b\text{---} ; \circ\text{---}) \mid (\circ\bullet^m\text{---} ; \overset{\circ}{\underset{\circ}{\blacktriangledown}}\bullet^m\text{---} ; \circ\text{---})$. Une telle description est assez longue et pourrait être factorisée comme suit :

$\circ\bullet^{b|m}\text{---} ; \overset{\circ}{\underset{\circ}{\blacktriangledown}}\bullet^{b|m}\text{---} ; \circ\text{---}$. Cependant, cela peut introduire des ambiguïtés telles que : $\circ\bullet^b\text{---} ; \overset{\circ}{\underset{\circ}{\blacktriangledown}}\bullet^m\text{---} ; \circ\text{---}$. Pour spécifier que le choix décrit dans le premier événement doit être appliqué au deuxième événement, il convient d'ajouter une variable comme suit :

$x \in \{b|m\}, \circ\bullet^x\text{---} ; \overset{\circ}{\underset{\circ}{\blacktriangledown}}\bullet^x\text{---} ; \circ\text{---}$.

2.2.5.3 Parallélisme

Une description μ Glyphe peut inclure des événements parallèles, représentés par deux barres parallèles « || ». Par exemple, un **toucher de l'index et du majeur sur le pouce** s'écrit : $(\overset{\circ}{\underset{\circ}{\blacktriangledown}}\text{---} \parallel \bullet\text{---}\overset{\circ}{\underset{\circ}{\blacktriangledown}}\text{---})$. Là encore, la description est assez fastidieuse et peut être factorisée. À cette fin, les événements sont combinés, ce qui donne la description suivante $\bullet\overset{\circ}{\underset{\circ}{\blacktriangledown}}\overset{\circ}{\underset{\circ}{\blacktriangledown}}\text{---}$. Au-delà des événements réalisés en parallèle, si plusieurs valeurs d'une caractéristique sont utilisées en parallèle, elles sont décrites à l'aide des deux barres parallèles. Par exemple, un **toucher de l'index sur les phalanges hautes et médianes du pouce** : $\bullet_{t||m}\overset{\circ}{\underset{\circ}{\blacktriangledown}}\text{---}$.

La [Table 2.5](#) reprend certains exemples de microgestes présentés ci-dessus, en fournissant pour chaque microgeste une représentation graphique et sa description selon la notation μ Glyphe.


| Nom du microgeste | μ Glyph standard | μ Glyph concis |
|---|---|--|
| Toucher de la base de l'index | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_b---$ | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_b$ |
| Toucher du pouce sur l'ongle du majeur | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_n---$ | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_n(\bullet_m)$ |
| Toucher de l'index sur la paume | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_p---$ | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_p(\bullet)$ |
| Toucher de la base de l'index sur une tasse | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_b---$ tasse  | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_b(\text{tasse} \img alt="cup icon" data-bbox="635 240 670 255"/>$ |
| Swipe à gauche du pouce sur la base ou le milieu de l'index | $x \in \{b m\},$ $\overset{\circ\circ}{\leftarrow}_x---$; $\overset{\circ\circ}{\leftarrow}_x---$; $\overset{\circ\circ}{\leftarrow}---$ | $x \in \{b m\},$ $\overset{\circ\circ}{\leftarrow}_x(\bullet_x)$; $\overset{\circ\circ}{\leftarrow}_x(\bullet_x)$; $\overset{\circ\circ}{\leftarrow}$ |
| Toucher de l'index et du majeur sur le pouce | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_p \overset{\circ\circ}{\nabla}_p---$ | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_p(\bullet)$ |
| Carré dessiné par l'index en l'air | $\overset{\circ\circ}{\square}---$ | $\overset{\circ\circ}{\square}_i$ |

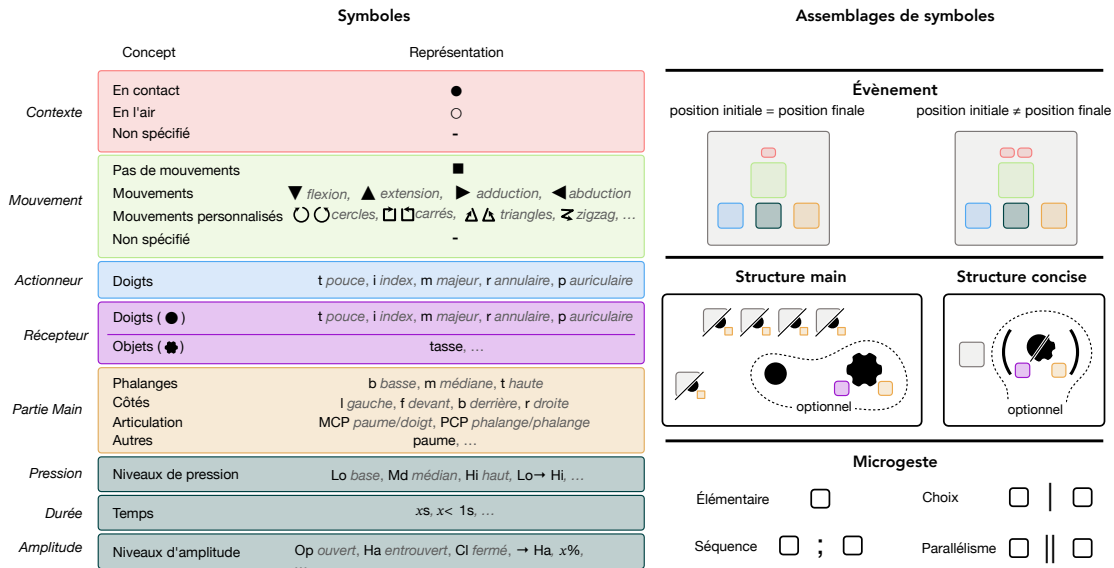
TABLE 2.6: Microgestes décrits en utilisant la version standard de μ Glyphe, en utilisant la représentation graphique de la main, et la version concise de μ Glyphe.

2.2.6 Encapsulation

Certains microgestes peuvent être décrits par une longue séquence d'événements μ Glyphe différents. Ceci peut rendre la description difficile à lire et à comprendre. C'est notamment le cas des microgestes basés sur le dessin de formes [18, 103, 102, 33, 122] (le plus souvent, un cercle). Ces microgestes sont systématiquement réalisés sur un plan 2D, en l'air ou sur une surface. Bien que chaque dessin puisse théoriquement être représenté par une succession d'événements (p. ex. $\overset{\circ\circ}{\nabla}$; $\overset{\circ\circ}{\blacktriangleright}$; $\overset{\circ\circ}{\blacktriangle}$; $\overset{\circ\circ}{\blacktriangleleft}$ pour un rectangle), il semble plus simple et intelligible de définir un nouveau symbole représentant le dessin à reproduire, p. ex. le symbole \square pour un rectangle dessiné dans le sens horaire. En utilisant ce symbole, la notation est simplifiée mais reste cohérente. Par exemple, un rectangle dessiné dans le sens horaire par l'index en l'air s'écrit $\overset{\circ\circ}{\square}---$. Pour maintenir la cohésion, les événements peuvent être encapsulés si et seulement si ils ont le même contexte ($\circ\circ$ ou $\bullet\bullet$), le même actionneur et représentent une progression monotone des autres caractéristiques du mouvement (p. ex. $\overset{\circ\circ}{\nabla}_{1N \rightarrow 2N}$; $\overset{\circ\circ}{\blacktriangleright}_{2N \rightarrow 2N}$; $\overset{\circ\circ}{\blacktriangle}_{2N \rightarrow 3N}$; $\overset{\circ\circ}{\blacktriangleleft}_{3N \rightarrow 4N}$ est encapsulé en $\overset{\circ\circ}{\square}_{1N \rightarrow 4N}$).

2.2.7 Notation concise

Jusqu'à présent, nous avons décrit un microgeste en utilisant une représentation graphique de la main pour rendre la description plus intelligible. Cependant, cette notation peut prendre beaucoup de place pour décrire un microgeste simple comme l'extension de l'index : $\overset{\circ\circ}{\blacktriangle}---$. Pour une description plus concise et plus avancée d'un microgeste, les doigts sont spécifiés par leur première lettre en bas à gauche du glyphe de l'événement. Par exemple, l'extension de l'index s'écrit

FIGURE 2.5: Sommaire global de la notation μ Glyphe.

en forme concise : $\overset{\circ\circ}{\underset{i}{\blacktriangle}}$. Les récepteurs peuvent également être spécifiés de manière plus concise. Ils sont représentés comme une fonction de l'évènement. Par exemple, un contact du majeur sur la base du pouce s'écrit : $\overset{\circ\circ}{\underset{m}{\blacktriangledown}}(\underset{t}{\bullet}\underset{b}{\bullet})$. Le reste de la notation est inchangée.

La Table 2.6 inclut des exemples de microgestes et leurs deux descriptions : la description basée sur la représentation de la main et la description concise.

2.3 Expressivité théorique : pouvoir descriptif de μ Glyphe

L'expressivité théorique fait référence à la capacité de μ Glyphe à décrire sans ambiguïté les microgestes existants, indépendamment de la facilité d'utilisation de μ Glyphe. En effet, la facilité d'utilisation, de lecture et d'écriture des descriptions μ Glyphe, c.-à-d. l'expressivité pratique de μ Glyphe, est l'objet de la section suivante.

Tout d'abord, nous montrons l'expressivité théorique de μ Glyphe en montrant que la notation englobe et étend les axes de l'espace de conception de Soliman et coll. [105]. Les quatre axes, à savoir *Action*, *Actionneur*, *Surface de contact* et *Flexion du doigt*, sont décrits dans le chapitre 1. Les trois premiers axes correspondent, respectivement, dans μ Glyphe à *mouvements et contextes*, *actionneur (caractéristiques du mouvement)* et *récepteur (caractéristiques du contexte)*. En outre, la section de μ Glyphe *caractéristiques du mouvement : actionneur* étend l'axe *Actionneur* de Soliman et coll. en prenant en compte les parties du doigt (phalanges, côtés) et les articulations du doigt. Le quatrième axe, *Flexion du doigt*,

décrit l'état d'extension des doigts qui ne sont pas l'actionneur et correspond à la section *autres caractéristiques du mouvement*, plus précisément l'amplitude du mouvement, de μ Glyphe. Comme l'indiquent Soliman et coll., il existe deux façons de décrire la *flexion du doigt*, en spécifiant soit le mouvement de flexion, soit la position du doigt. Avec μ Glyphe, d'une part, un mouvement de flexion est décrit à l'aide de Extension (\blacktriangle) et Flexion (\blacktriangledown), p. ex. l'extension d'un doigt se terminant par le doigt ouvert à x% s'écrit $\overset{\circ}{\blacktriangledown} \rightarrow x\%$. D'autre part, la position

du doigt est décrite avec Statique (\blacksquare), p. ex. un doigt ouvert à x% $\overset{\circ}{\blacksquare}_{x\%}$. Plus généralement, cet exemple montre que μ Glyphe prend en charge les deux façons courantes de décrire un microgeste : la description d'une séquence de mouvements ou d'une séquence de positions.

Deuxièmement, nous avons traduit avec μ Glyphe tous les microgestes décrits de manière précise et textuelle dans la littérature [105, 18, 118, 119]. Le but de cet exercice de traduction était de tester la capacité de la notation à permettre la spécification de subtiles différences décrites dans le texte. La Table 2.7 comprend un sous-ensemble de ces microgestes. En utilisant μ Glyphe, nous avons décrit plusieurs autres microgestes de la littérature. Les tables de l'annexe B contiennent la liste complète des microgestes décrits avec μ Glyphe. Au total, nous avons décrit 121 microgestes provenant de 18 articles. Parmi les articles considérés, certains fournissent des définitions et des schémas précis sur les caractéristiques des microgestes [105, 18, 119, 118], d'autres sont des articles fondateurs dans le domaine des microgestes, p. ex. [122, 103]. En outre, nous avons considéré des articles couvrant divers scénarios d'utilisation, p. ex. les avions [117], les voitures [33, 52, 122], les microgestes sur un stylo [106], les microgestes en main libre [20, 28, 56] et proposant divers mécanismes de reconnaissance, p. ex. les caméras [20], les gants [117], les bracelets [28, 99]. Certains articles nous ont également fourni des cas limites à décrire à l'aide de μ Glyphe, p. ex. Nailz [75] utilise *very tip* [*haut de la phalange haute*].

Enfin, nous avons souligné, en introduction de ce chapitre, certains problèmes terminologiques existants dans la littérature. Il convient d'examiner si la notation μ Glyphe résout ces problèmes en permettant une description précise et non ambiguë de ces microgestes. Sur la base de la description en μ Glyphe, nous pouvons identifier des microgestes similaires qui sont désignés par des noms différents dans la littérature. Par exemple, un *close gap between index and middle* [*fermer l'espace entre l'index et le majeur*] [118] et *tap of index and middle* [*toucher de l'index et du majeur*] [18] sont tous deux décrits par $\left(\overset{\circ}{\blacktriangleright}_{i(m)}(\bullet) \parallel \overset{\circ}{\blacktriangleleft}_{m(i)}(\bullet) \right)$. En outre, la description d'un microgeste avec μ Glyphe peut aider à distinguer les microgestes désignés par le même nom : *press* [*toucher*] [20] $\overset{\circ}{\blacktriangledown}$ et *press* [*press*] [103] $\overset{\circ}{\blacktriangledown}_{Lo \rightarrow Hi}$ ou *Tap* [18] $\overset{\circ}{\blacktriangledown}$ et *Tap* [117] $\overset{\circ}{\blacktriangledown}; \overset{\circ}{\blacktriangle}$. La Table 2.7 présente d'autres exemples d'ambiguïté que μ Glyphe permet de résoudre.

Pour faciliter le travail des chercheurs et des praticiens, nous avons créé une




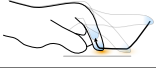



| Image | Nom du microgeste | μ Glyphe | Caractéristiques additionnelles |
|---|---|---|--|
|  | Press ● [20] Tap ● [18] Finger touches [118] Finger taps [105] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}(\bullet)$ $\overset{\circ\circ}{\nabla}$ $(x, y) \in A, \overset{\circ\circ}{\nabla}(x, y)$ | $A = \{i m r p\} \times \{b m f\}$ $A = \{i m r\} \times \{b m f\}$ |
|  | Tap ● [103] Tap ● [102] Tap ● [117] Pinch [99] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}; \overset{\circ\circ}{\blacktriangle}$ $(x, y) \in A, \overset{\circ\circ}{\nabla}(x, y); \overset{\circ\circ}{\blacktriangle}$ | $A = \{i m\} \times \{b m f\} \cup \{i, tl\} \cup \{r, n\}$ $A = \{i m r p\}$ |
|  | Swipe Left or Right ● [103] Extension ● [102] Drag ● [122] Slide ● [105] Slide thumb on finger [118] linear thumb-to-finger slides [105] | $\overset{\circ\circ}{\blacktriangle} \overset{\circ\circ}{\blacktriangle}$ $\overset{\circ\circ}{\nabla} \overset{\circ\circ}{\blacktriangle} \overset{\circ\circ}{\blacktriangle}$ $x \in A, \overset{\circ\circ}{\nabla}(x) \overset{\circ\circ}{\blacktriangle}(x)$ | $A = \{i m r p\}^n$, with $n \geq 1$ $A = \{i m r p\}$ |
|  | Swipe ● [18] Drag&Drop thumb on index-side [122] | $x \in A, \overset{\circ\circ}{\nabla}(x); (\overset{\circ\circ}{\nabla}(x) \overset{\circ\circ}{\blacktriangle}); \overset{\circ\circ}{\nabla}$ | $A = \{i (i m) (m r)\}$ $A = i-1$ |
|  | Swipe across all fingers with thumb [18] Multi-finger snap [28] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}(p); \overset{\circ\circ}{\blacktriangle}(t); \overset{\circ\circ}{\blacktriangle}(m); \overset{\circ\circ}{\blacktriangle}(i); \overset{\circ\circ}{\nabla}$ | |
|  | Squeeze/Pull up [99] Press ● [103] | $x \in A, \overset{\circ\circ}{\nabla}_{Lo \rightarrow Hi}(\bullet); \overset{\circ\circ}{\blacktriangle}_{Hi \rightarrow Lo}$ | $A = \{i m r p\}$ |
|  | Stretch [103] Extend [118] Up [33] Thumb up [122] | $\overset{\circ\circ}{\blacktriangle}_{MCP}$ $x \in A, \overset{\circ\circ}{\blacktriangle}_x$ | $A = \{i m (r p)\}$ $A = t$ |

TABLE 2.7: Expressivité théorique de μ Glyphe : descriptions de microgestes à deux niveaux d'abstraction et mise en évidence (●) de problèmes terminologiques existants dans la littérature.

base de données compilant chacun des microgestes présentés dans les tableaux de l'annexe B. Pour chaque microgeste, la base de données contient – quand elles existent – les informations suivantes : le nom utilisé dans l'article, la description textuelle, la description visuelle, le titre de l'article et son DOI, la description en μ Glyphe, et le contexte d'utilisation prévu (c.-à-d. si le microgeste est exécuté en main libre ou en tenant un objet). De plus, si le microgeste est effectué en tenant un objet, des informations sur les [préhensions](#) et les objets étudiés sont incluses.

2.4 Expressivité pratique : Facilité d'utilisation de μ Glyphe

L'expressivité pratique représente la facilité d'utilisation de la notation μ Glyphe par les chercheurs et les praticiens. Comme indiqué pour les notations de modélisation des tâches [6], la facilité d'utilisation d'une notation recouvre deux notions

distinctes. La première notion fait référence à la facilité avec laquelle une description μ Glyphe peut être lue et comprise. Cette notion d'utilisabilité intègre celles d'apprenabilité et de lisibilité. La seconde notion concerne la facilité avec laquelle les descriptions μ Glyphe sont générées et modifiées. Nous structurons l'étude expérimentale en fonction de ces deux notions d'utilisabilité : la lecture et l'écriture. Pour la partie lecture, l'étude s'inspire de la première étude menée par Hesenius et coll. pour évaluer la lisibilité des cartes de geste [53]. Pour la partie écriture, nous établissons notre propre protocole expérimental.

2.4.1 Participants

Les utilisateurs finaux de μ Glyphe sont des chercheurs et des praticiens de l'IHM. Par conséquent, nous avons décidé de recruter des participants qui travaillent dans des domaines liés à l'IHM et qui ont une formation universitaire. Nous avons recruté 18 participants non rémunérés (30 ans \pm 9) : 6 docteurs en IHM, 4 doctorants en IHM, 4 étudiants en stage en IHM, 2 ingénieurs de recherche en IHM et 2 doctorants d'un autre domaine qui travaillent avec des notations et ont un fort intérêt pour l'IHM. Pour le contexte, 6 participants avaient suivi un enseignement avec un examen il y a moins d'un an, 4 il y a moins de 5 ans, et 8 il y a plus de 5 ans.

2.4.2 Configuration

Les participants étaient assis à un bureau devant un ordinateur. Les descriptions et les vidéos étaient affichées sur l'écran de l'ordinateur. Les descriptions et les vidéos utilisées dans l'étude sont disponibles sur [Github](#)⁷. Pour la partie lecture, une description de microgestes était affichée à l'écran. Une caméra était placée devant les participants et ne capturait que leurs mains. Pour la partie écriture, une vidéo du microgeste était affichée à l'écran. Les participants utilisaient un clavier pour afficher la description/vidéo suivante. Les participants ont utilisé le clavier pour appuyer sur les touches ENTRÉE et ESPACE. Un stylo et du papier ont été placés sur le bureau pour que les participants puissent écrire leurs réponses.

2.4.3 Ensembles de microgestes pour l'étude

Pour comparer les différentes manières de décrire les microgestes, nous avons d'abord défini 4 ensembles de 10 microgestes à partir de la littérature. 3 ensembles sont utilisés pour la partie lecture (ensembles A, B et C) et 1 ensemble pour la partie écriture (ensemble E) de l'étude expérimentale. Les ensembles ont été conçus pour refléter les microgestes les plus courants dans la littérature. Chaque ensemble contient (énumérés ci-dessous dans cet ordre) : 3 `tap` [*tap*]/ `touch` [*toucher*], 3 `swipe` [*swipe*]/ `slide` [*glisser*]/ `drag` [*glisser*], 1 microgeste basé sur la pression ou l'amplitude, 2 microgestes ambigus et 1 microgeste qui représente le dessin d'une

7. <https://github.com/AChaffangeon/mGlyp-exp-material>

forme (p. ex. cercle, carré). Nous distinguons deux types d'ambiguïté. Premièrement, un microgeste dont le nom peut induire une mauvaise interprétation, p. ex. **Extension** [*swipe vers l'extérieur*] (Ensemble C 8). Deuxièmement, un microgeste dont le nom est en conflit avec un autre microgeste du même ensemble, c.-à-d. que les deux microgestes ont le même nom mais des actions différentes, p. ex. **Robin presses** [*Robin appuie*] (Ensemble A 8), en μ Glyphe $\overset{\circ}{\nabla}_{(t, \bullet_t)}$, et **Press** [*press*] (Ensemble A 7), en μ Glyphe $\overset{\circ}{\nabla}_{Lo \rightarrow Hi}$. En outre, chaque ensemble utilise des caractéristiques ou des combinaisons de caractéristiques similaires tout en couvrant un large éventail de symboles μ Glyphe. Par exemple, le premier microgeste de chaque ensemble est un **tap** sur le pouce avec le doigt « x » (un seul actionneur), avec doigt « x » différent pour chaque ensemble. Le deuxième microgeste est un **tap** avec différents actionneurs en parallèle. Enfin, pour la partie de l'étude consacrée à la lecture (ensembles A, B et C), chaque ensemble contient 5 microgestes décrits avec du texte et des images dans les articles d'origine et 5 avec des images uniquement. Les 5 microgestes avec images seulement sont : 5, 7-10 dans les ensembles A et B, et 3-4, 7-9 dans l'ensemble C.

Set A :

- 1 : Tap thumb with ring finger [18]
- 2 : Tap thumb with index and middle fingers [18]
- 3 : Finger Tap [105]
- 4 : Swipe accross all fingers with thumb [18]
- 5 : Drag and Drop Index On Thumb [122]
- 6 : Rotational thumb-to-finger slide [105]
- 7 : Press [103]
- 8 : Robin presses on the tip of his index finger [20]
- 9 : Tab [122]
- 10 : Triangle CW [33]

Set B :

- 1 : Tap thumb with index finger [18]
- 2 : Tap thumb with ring and pinky fingers [18]
- 3 : Fist Tap [105]
- 4 : Swipe middle and ring fingers with thumb [18]
- 5 : Drag thumb around object [122]
- 6 : Linear thumb-to-finger slides [105]
- 7 : Thumb up [122]
- 8 : Swipe left [102]
- 9 : Multi finger snap [28]
- 10 : ZigZag [102]

Set C :

- 1 : Tap thumb with middle finger [18]
- 2 : Tap all fingers together [18]
- 3 : Snip [122]
- 4 : Swipe right [102]
- 5 : Drag and Drop middle on index [122]
- 6 : Fingertip slide [105]
- 7 : Force tap [119]
- 8 : Extension [102]
- 9 : Ream [122]
- 10 : Draw circle [105]

Set E :

- 1 : Tap thumb with pinky finger [18]
- 2 : Tap palm with index, middle and ring fingers [18]
- 3 : Tap and Flap [105]
- 4 : Swipe index and middle fingers with thumb [18]
- 5 : Drag Index or Middle finger on stylus up/down [122]
- 6 : Linear finger-to-thumb slides [105]
- 7 : Stretch [103]
- 8 : Pressing down on the lateral side
of the upper index finger [117]
- 9 : Flexion [102]
- 10 : Square [33]

2.4.4 Procédure

Une session se compose de deux phases : une phase d'apprentissage et une phase d'expérimentation (Figure 2.6). Au cours de la phase d'apprentissage, nous avons informé les participants du contexte de la recherche et défini ce qu'est un microgeste. Nous avons également expliqué le but de l'étude, qui est de lire des descriptions de microgestes et de transcrire des microgestes à l'aide de μ Glyphe. Après avoir rempli un formulaire de consentement, nous avons remis aux participants une copie papier d'une antisèche (annexe A) qu'ils ont pu utiliser pendant l'étude. Les participants ont ensuite visionné une vidéo de 9 minutes expliquant μ Glyphe. La vidéo est disponible en français⁸ et en anglais⁹. Pour conclure la phase d'apprentissage, les participants ont écrit 5 microgestes en μ Glyphe. L'expérimentateur a exécuté chaque microgeste devant les participants, autant de fois que nécessaire, et les a aidés à trouver les bonnes réponses. Les microgestes étaient les suivants : un toucher avec le pouce $\overset{\circ}{\nabla}_t$, un glisser du pouce vers le haut ou le bas sur l'annulaire $\overset{\circ}{\nabla}_t(\bullet)|_t\overset{\circ}{\blacktriangle}(\bullet)$, une flexion de l'index jusqu'à être entrouvert $\overset{\circ}{\nabla}_i$, une extension suivie d'un toucher sur $\overset{\circ}{\nabla}_{Op \rightarrow Ha}$

8. <https://youtu.be/S9qYcMyZ0xs>

9. <https://youtu.be/aLfnP9StAMg>

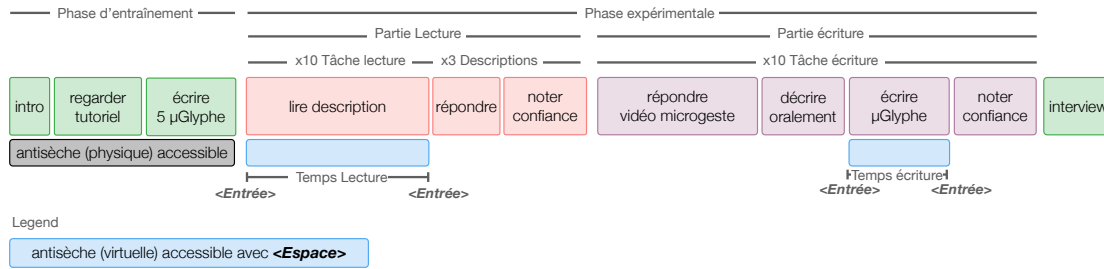


FIGURE 2.6: Procédure expérimentale (<ENTRÉE> représente la touche Entrée du clavier, <ESPACE> la touche espace).

le pouce avec l'index ou le majeur $x \in \{i|m\}, \overset{\circ}{\blacktriangle}; \overset{\circ}{\blacktriangledown}(\bullet)$ et un **press** de chaque doigt sur un objet $\underset{Lo \rightarrow Hi}{\overset{\bullet}{\blacktriangledown}}(\bullet)$. Jusqu'à ce stade, les participants pouvaient poser des questions sur μ Glyphe. Dans la suite de l'étude, l'expérimentateur a informé les participants qu'il ne répondrait plus aux questions et a récupéré la copie papier de l'antisèche. La phase de formation durait en moyenne 20 minutes.

La phase expérimentale était divisée en deux parties : la lecture et l'écriture. Pour la partie lecture, il était demandé aux participants de lire une description de microgestes et d'effectuer le microgeste correspondant. Nous avons utilisé trois types de description : μ Glyphe, μ Glyphe concis et texte+images extraits de l'article original. Pour chaque type de description, nous avons utilisé l'un des ensembles A, B ou C. Nous avons utilisé un carré latin pour contrebalancer l'ordre des descriptions et l'ordre des ensembles utilisés. Les microgestes de chaque ensemble ont été présentés dans un ordre aléatoire. Pour commencer un essai, les participants appuyaient sur la touche ENTRÉE, ce qui engendrait l'affichage d'une description à l'écran. Dès qu'ils avaient compris le microgeste, les participants appuyaient à nouveau sur la touche ENTRÉE. Le temps passé entre les deux appuis sur la touche ENTRÉE (TEMPS DE LECTURE) a été enregistré. Ensuite, la description était cachée et les participants effectuaient le microgeste devant une caméra pendant que l'expérimentateur notait le microgeste effectué à l'aide de μ Glyphe. Nous leur avons également demandé de décrire verbalement le microgeste et d'indiquer explicitement quand il commençait et se terminait. Enfin, les participants ont évalué leur niveau de confiance dans leur réponse sur une échelle de Likert en 6 points (1-pas du tout confiant, 6-très confiant).

Pour la partie écrite, les participants devaient décrire 10 microgestes en μ Glyphe. Nous avons utilisé l'ensemble de microgestes E et présenté chaque microgeste dans un ordre aléatoire. Les participants ont regardé une vidéo pour chaque microgeste. Ils pouvaient la regarder autant de fois qu'ils le souhaitaient. Ensuite, ils devaient décrire verbalement le microgeste à l'expérimentateur afin de s'assurer que les erreurs éventuelles dans la description μ Glyphe n'étaient pas dues à une erreur de compréhension sur le microgeste à écrire. Une fois correctement compris, les participants devaient écrire le microgeste avec μ Glyphe. Pour ce faire, les

participants ont d'abord appuyé sur la touche ENTRÉE, puis ont commencé à écrire la description μ Glyphe sur le papier. Nous leur avons demandé de décrire verbalement le microgeste au fur et à mesure qu'ils l'écrivaient. L'expérimentateur réexpliquait le microgeste si le participant en décrivait un autre à l'oral. Nous n'avons pas imposé de forme spécifique pour l'écriture en μ Glyphe, c.-à-d. standard ou concise. Après avoir terminé leur rédaction, les participants ont appuyé à nouveau sur la touche ENTRÉE. Le temps passé entre les deux appuis sur la touche ENTRÉE (TEMPS D'ÉCRITURE) a été enregistré. Ils ont ensuite évalué leur niveau de confiance sur une échelle de Likert en 6 points (1-pas du tout confiant, 6-très confiant).

Pendant la lecture et l'écriture avec μ Glyphe, les participants pouvaient accéder librement à une copie virtuelle de l'antisèche en maintenant la touche ESPACE enfoncée. Le nombre de fois où l'antisèche a été utilisée et le temps passé à l'utiliser ont été enregistrés. À la fin de l'étude, nous avons demandé aux participants quelle forme de μ Glyphe ils préféraient, pourquoi et s'ils avaient d'autres commentaires à faire.

La [Figure 2.6](#) résume la procédure expérimentale. La phase expérimentale durait en moyenne 40 minutes.

2.4.5 Mesures et hypothèses

Notre première hypothèse est que μ Glyphe est plus performant que les descriptions texte+images en termes d'exactitude des réponses et que les participants sont plus confiants dans leurs réponses. Notre deuxième hypothèse est que μ Glyphe est moins performant que les descriptions texte+images en termes de temps de lecture d'une description. Notre dernière hypothèse est que μ Glyphe peut être utilisé facilement après une courte période de formation, c.-à-d. un pourcentage élevé de réponses correctes, un nombre limité d'appels à l'antisèche et de temps passé sur celle-ci.

Sur la base de ces hypothèses, au cours de l'étude, nous avons enregistré les mesures suivantes : le nombre d'appels à l'antisèche, le temps total d'utilisation de l'antisèche, le temps total (TEMPS DE LECTURE/ÉCRITURE) passé sur un microgeste et l'évaluation de la confiance en soi des participants. Pour la partie lecture, l'expérimentateur a traduit les réponses des participants en μ Glyphe à l'aide de ses notes, des explications des participants et des vidéos. Les symboles de mouvement et de contexte ainsi que les combinaisons de séquences et de parallèles ont été déduites du microgeste exécuté par le participant. Le choix des événements et des caractéristiques supplémentaires a été déduit des explications orales des participants. Par exemple, pour un **Finger Tap** (Set A 3), un participant a effectué un **tap** avec le pouce sur la phalange haute de l'index devant la caméra, puis a expliqué verbalement que cela pouvait être fait sur l'index, le majeur ou l'annulaire et sur la phalange haute, médiane ou basse du doigt. Si la réponse traduite comportait des symboles supplémentaires, manquants ou incorrects, la réponse était considérée comme incorrecte. Pour la partie écrite, nous avons évalué une description μ Glyphe comme incorrecte s'il manquait un ou plusieurs symboles

ou si la structure était incorrecte. Si les participants étaient plus précis que prévu, mais que leur description μ Glyphe décrivait toujours correctement le microgeste présenté dans la vidéo, p. ex. un **tap** de la phalange haute du pouce sur le **petit doigt** au lieu d'un **tap** du pouce sur le **petit doigt** (Set W 1), la réponse était considérée comme correcte.

2.5 Résultats

L'analyse des données suit les recommandations pour une « communication statistique juste en IHM » (*fair statistical communication in HCI*) [32]. En plus de cette approche pour l'analyse des données, nous proposons en annexe l'analyse des données de lecture à l'aide de tests statistiques (**annexe C**). Les **Intervalles de Confiance (IC)** indiqués sont des intervalles de confiance à 95% calculés selon la formule $IC = 1,96 * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$, avec σ l'écart type et n la taille de l'échantillon considéré. Dans ce qui suit, les résultats sont formatés comme suit : (moyenne ou médiane $\pm IC$, $n = n$).

Nous indiquons également la **Proportion de chevauchement (PDC)** [25] lorsque nous comparons deux **IC**, c.-à-d. la quantité de chevauchement / la taille moyenne des bras de l'**IC** qui se chevauchent. En utilisant la recommandation 24 de [32], si **PDC** $< 0,25$, c.-à-d. si les **IC** se chevauchent visuellement de moins d'un quart de leur longueur, un raisonnement similaire à celui d'une p-valeur inférieure à 0,05 peut être utilisé. La **Figure 2.7** présente une vue d'ensemble des résultats.

2.5.1 Lecture

Temps : Dans l'ensemble, la lecture des descriptions de microgestes avec texte+images a été la plus rapide ($24 s \pm 3$, $n = 60$), suivie par μ Glyphe standard ($36 s \pm 4$, $n = 60$) et μ Glyphe concis ($42 s \pm 5$, $n = 60$). La différence entre texte+images et μ Glyphe standard (**PDC** : -1,4) ainsi qu'entre texte+images et μ Glyphe concis (**PDC** : -2,5) indique un effet, contrairement à la différence entre μ Glyphe standard et μ Glyphe concis (**PDC** : 0,66).

Réponses justes : Pour les réponses justes, les **IC** sont calculés sur les taux de réussite des participants. La lecture avec μ Glyphe standard a le plus grand nombre de réponses correctes ($90 \% \pm 3$, $n = 60$), suivi par μ Glyphe concis ($88 \% \pm 3$, $n = 60$) et texte+images ($46 \% \pm 4$, $n = 60$). L'analyse des **ICs** indique la présence d'un effet entre texte+images et μ Glyphe (**PDC** : -10,9) ainsi qu'entre texte+images et μ Glyphe concis (**PDC** : -11,1), mais pas entre μ Glyphe standard et μ Glyphe concis (**PDC** : 1,4). L'ensemble des microgestes utilisés (A, B ou C) ne semble pas avoir d'impact sur le taux de réponses justes (**PDC** $> 1,16$ en comparant deux à deux les ensembles de microgestes pour le même type de description).

En considérant les deux formes de μ Glyphe ensemble, il y a un total de 39 erreurs sur 360 lectures de descriptions μ Glyphe. Nous avons observé les types

d'erreurs suivants :

- symbole de choix « | » confondu avec le symbole de séquence « ; » (9 / 39) ;
- un symbole non pris en compte (8 / 39) ;
- symbole parallèle « || » confondu avec le symbole de choix « | » (5 / 39) ;
- le symbole « p » est interprété comme « paume » au lieu de « annulaire » (*pinky*) (3 / 39) ;
- autres types d'erreurs ponctuelles (8 / 39).

Pour les descriptions texte+images, sur les 97 erreurs commises lors de la lecture de 180 descriptions, les erreurs les plus fréquentes sont :

- positions de départ et d'arrivée incorrectes pour le microgeste, p. ex. un **tap** [*toucher*] [18, 105] ($\overset{\circ}{\blacktriangledown}$) réalisé en $\overset{\circ}{\blacktriangledown}$; $\overset{\circ}{\blacktriangle}$ (43 / 97) ;
- direction du microgeste incorrecte ou incomplète (11 / 97) ;
- un choix interprété comme une séquence (5 / 97) ;
- un **press** [*toucher*] [20] ($\overset{\circ}{\blacktriangledown}$) réalisé comme un **press** [*press*] [103] ($\overset{\circ}{\blacktriangledown}$) et un **press** [*press*] [103] réalisé comme un **press** [*toucher*] [20] ($\overset{\circ}{\blacktriangledown}$) et un **press** [*press*] [103] réalisé comme un **press** [*toucher*] [20] (4 / 97) ;
- Autres types d'erreurs ponctuelles (34 / 97).

Confiance : Les participants se sont montrés plus confiants dans leurs réponses après avoir lu des descriptions μ Glyphe standard ($5 \pm 0,1$, $n = 60$) et μ Glyphe concises ($5 \pm 0,1$, $n = 60$) que des descriptions texte+images ($4,5 \pm 0,2$, $n = 60$). L'analyse des IC suggère un effet entre texte+images et μ Glyphe standard (PDC : -2) ainsi qu'entre texte+images et μ Glyphe concis (PDC : -2), mais pas entre μ Glyphe et μ Glyphe concis (PDC : 2).

Antisèche : En moyenne, l'antisèche a été appelée plus souvent avec μ Glyphe concis ($0,8 \pm 0,5$, $n = 180$) qu'avec μ Glyphe standard ($0,5 \pm 0,3$, $n = 180$). Les participants ont passé en moyenne 1,5 s \pm 1,0 à lire l'antisèche pour μ Glyphe concis et 1,3 s \pm 1,0 pour μ Glyphe standard. Une analyse plus détaillée révèle que l'antisèche n'a jamais été appelée pour 37 % des microgestes (correspondant à 11 microgestes sur 30) lors de l'utilisation de μ Glyphe standard et pour 20 % des microgestes (6 microgestes sur 30) lors de l'utilisation de μ Glyphe concis.

2.5.2 Écrire en μ Glyphe

Temps : En moyenne, les participants ont écrit une expression μ Glyphe en 1 min 20 s \pm 19 s. Comme prévu, plus il y a de symboles à écrire et moins les symboles sont courants, p. ex. « l » pour gauche, plus il faut de temps pour écrire une expression μ Glyphe. En effet, les expressions comportant le moins de symboles, à savoir **flexion** [*glisser le doigt sur un objet vers la paume*], **stretch** [*étendre le doigt*], **square** [*dessiner un carré*] et **tap thumb with pinky** [*toucher du pouce avec l'auriculaire*], sont, en moyenne, écrites en moins de 40 s. Les expressions

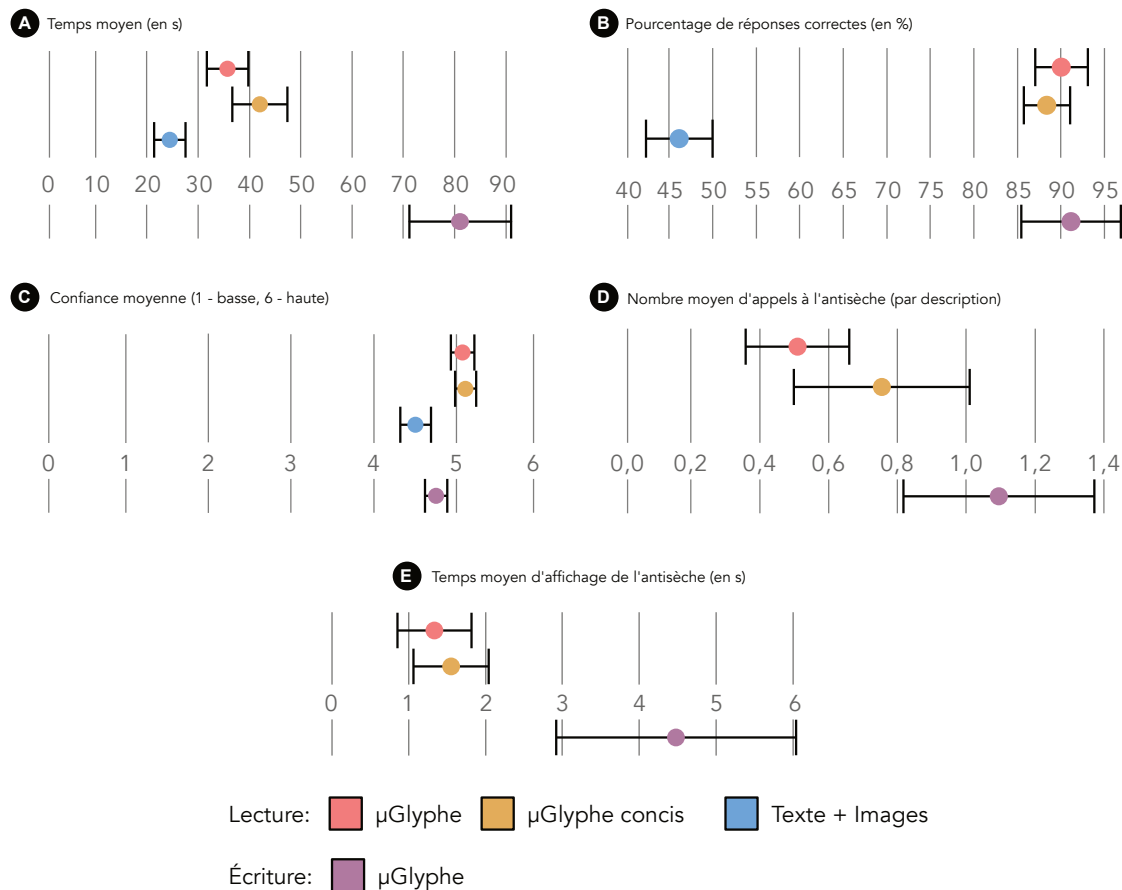


FIGURE 2.7: Vue d'ensemble des résultats de l'étude avec des intervalles de confiance à 95 %. **A)** Temps moyen de lecture et d'écriture en secondes. **B)** Pourcentage moyen de lecture et d'écriture de réponses correctes. **C)** Confiance moyenne des participants dans leurs réponses (1 - faible confiance, 6 - grande confiance). **D)** Nombre moyen d'appels à l'antisèche. **E)** Temps moyen passé sur l'antisèche pour la lecture et l'écriture.

comportant le plus grand nombre de symboles, à savoir `tap and flap` [*toucher et flexion/extension*], `linear thumb-to-finger slides` [*glisser du pouce sur doigts*] et `swipe index and middle finger with thumb` [*swipe sur l'index et le majeur avec le pouce*], sont écrites en moyenne en plus d'1 min 30 s. Les trois autres expressions, à savoir `tap palm with index, middle and ring finger` [*toucher la paume avec l'index, le majeur et l'annulaire*], `drag index or middle on stylus up/down` [*glisser l'index ou le majeur sur le stylo vers le haut/bas*], et `pressing down on the lateral tip of the index` [*appuyer sur le côté de la phalange haute de l'index*], prennent entre 1 min 4s et 1 min 44s à écrire.

Réponses correctes : En utilisant μ Glyphe, les participants ont écrit la bonne description $91\% \pm 6$ du temps. Il y a eu 16 erreurs sur 180 descriptions μ Glyphe écrites. Les erreurs les plus fréquentes sont les suivantes :

- fusion de contextes, c.-à-d. $\circ\circ$ écrit en \circ et $\bullet\bullet$ écrit en \bullet (5 / 16) ;
- événements fusionnés, c.-à-d. $\overset{\circ\circ}{\blacktriangledown}$; $\overset{\bullet\bullet}{\blacktriangledown}$ écrit en $\overset{\circ\circ}{\blacktriangledown}$ (2 / 16) ;
- direction de mouvement incorrecte ou manquante (2 / 16) ;
- symbole parallèle « || » au lieu du symbole de choix « | » (2 / 16) ;
- placement incorrect du symbole et glyphe de contact manquant (2 / 16) ;
- autres types d'erreurs ponctuelles (3 / 16).

Confiance : La confiance des participants dans leurs réponses était de $4,8 \pm 0,13$.

Antisèche : En moyenne, par microgeste, les participants ont appelé l'antisèche $1,1 \pm 0,6$ fois pour un total de $4,5 \text{ s} \pm 3,1$ consacrées à cette antisèche.

Formes d'expression μ Glyphe utilisées : En moyenne, les participants ont utilisé μ Glyphe standard 33 % du temps et μ Glyphe concis 67 % du temps. Cela varie considérablement en fonction du microgeste à écrire. En effet, `tap thumb with pinky` [*toucher du pouce avec l'auriculaire*], `tap palm with index, middle and ring` [*toucher la paume avec l'index, le majeur et l'annulaire*] et `stretch` [*étendre le doigt*] sont écrits en μ Glyphe standard par 8 participants (44 %) et en μ Glyphe concis par 10 participants (56 %). `Linear thumb-to-finger slides` [*glisser du pouce sur doigts*], `flexion` [*glisser le doigt sur un objet vers la paume*], `drag index or middle on stylus up/down` [*glisser l'index ou le majeur sur le stylo vers le haut/bas*] sont écrits en μ Glyphe standard par 3 participants (17 %) et en μ Glyphe concis par 15 participants (83 %).

2.6 Discussion

Dans cette section, nous présentons les leçons tirées de l'étude théorique et expérimentale de μ Glyphe.

2.6.1 Amélioration de la notation

Les résultats expérimentaux, tant pour la lecture que pour l'écriture de μ Glyphe, montrent des erreurs dans l'interprétation de deux symboles, à savoir les symboles de choix « | » et le symbole parallèle « || ». Nous avons observé que l'erreur consistant à lire un symbole de choix « | » comme un symbole de séquence « ; » ne se produisait que si le symbole de choix se trouvait dans de longues descriptions sur une seule ligne, mais ne se produisait jamais lorsqu'il était placé au début d'une nouvelle ligne. Par conséquent, nous recommandons aux utilisateurs de μ Glyphe d'écrire les longues descriptions en passant à la ligne avant chaque symbole de choix.

Les participants qui ont mal interprété un symbole parallèle « || » comme un symbole de choix « | » nous ont expliqué que, d'après leur connaissance des langages de programmation, le symbole « || » signifie pour eux un *ou* logique. Une façon de résoudre ce problème est d'utiliser un symbole parallèle incliné : « // ».

2.6.2 μ Glyphe est utilisable

Les résultats expérimentaux suggèrent que μ Glyphe est utilisable par les chercheurs et les praticiens. Nos participants ont d'abord trouvé μ Glyphe « effrayant » [P3] et *text+images* « plus facile à comprendre » [P4], mais finalement, μ Glyphe est « compréhensible » [P3], « précis » [P4], et « plus facile que *text+images* pour les microgestes complexes » [P4]. P8, chercheur en IHM, a apprécié le haut niveau de précision de la description pour les microgestes. De plus, P9, également chercheur en IHM, a souligné que « le fait d'avoir deux symboles [« t » et « p »] avec des significations différentes selon leur position, à droite ou à gauche du glyphe, demande de l'attention mentale », mais que « μ Glyphe reste simple à comprendre ».

Comme toute notation, μ Glyphe nécessite un certain entraînement pour être maîtrisée, même si « elle semble intuitive » [P11]. Comme exemple concret du besoin de formation, nous avons observé une erreur commune pendant la phase de formation qui ne s'est jamais produite pendant l'étude après que l'expérimentateur l'ait signalée aux participants : de nombreux participants ont représenté une flexion du pouce en utilisant le symbole ▲ (puisque le pouce va vers le haut, vers les autres doigts) alors que le glyphe correct est ▼ (puisque'il va vers le bas, vers la paume de la main). Ce point devrait être souligné dans la vidéo du tutoriel μ Glyphe. Cependant, même si P6 pensait qu'« il aurait besoin d'une heure de formation », d'après les résultats de l'étude, les participants ont réussi à lire et à écrire μ Glyphe correctement après un tutoriel vidéo de 9 min et 10 min d'entraînement à l'écrit.

Il n'existe pas de forme de μ Glyphe préférée par les participants pour la lecture d'expressions μ Glyphe. Alors que P7 et P15 ont trouvé la forme μ Glyphe concise « plus simple », « plus logique » et « plus visuelle » que la forme μ Glyphe standard, P12 a trouvé la forme μ Glyphe concise « pas intuitive » et a pensé qu'elle ne se souviendrait pas de sa signification dans une semaine. Cependant, pour l'écriture, 15 des 18 participants, y compris ceux qui préféraient la forme μ Glyphe standard, ont utilisé la forme concise pour écrire des microgestes néces-

sitant la spécification d'un choix de doigt, c.-à-d. les deux microgestes **linear finger-to-thumb slides** [*glisser du pouce sur doigts*] et **drag Index or Middle finger on stylus up/down** [*glisser l'index ou le majeur sur le stylo vers le haut/bas*]. Dans l'ensemble, les participants pensent que μ Glyphe standard est plus simple à comprendre [P3, P4, P11, P18, P19] mais que cette forme devient trop verbeuse pour les microgestes comportant de nombreuses caractéristiques [P13, P18, P20]. Ainsi, ils préfèrent μ Glyphe concis, appelé « forme experte » par un participant [P11], pour écrire et lire des « microgestes complexes », c.-à-d. des microgestes avec des choix d'événements et/ou de nombreuses caractéristiques [P4, P6, P9, P10, P13, P14, P17, P18, P19]. Nous en concluons donc que les deux formes d'expression μ Glyphe sont utiles.

2.6.3 La littérature est ambiguë

Les résultats expérimentaux confirment les problèmes terminologiques identifiés dans la littérature. Les participants ont commis plusieurs erreurs en lisant les descriptions de la littérature et n'étaient pas totalement confiants dans leurs réponses.

Il n'était pas rare que les participants ne sachent pas comment aborder certains microgestes, comme « **ream** » ou « **tab** ». Les noms ne donnaient pas une idée claire des microgestes correspondants. Dans ces cas, les participants se sont fiés uniquement aux images associées. Pour « **ream** » et « **tab** », cela n'a donné lieu respectivement qu'à 16 % et 50 % de réponses correctes. Pour « **press** », en revanche, les images ont aidé les participants à faire la différence entre $\blacktriangledown^{\circ}$ et $\blacktriangledown^{\circ}$, Lo \rightarrow Hi ce qui a permis d'obtenir 75 % de réponses correctes. Cependant, pour éviter toute ambiguïté, nous recommandons d'utiliser le nom « **toucher** » pour $\blacktriangledown^{\circ}$, comme dans [118, 122].

Nous avons également observé plusieurs erreurs dues à une mauvaise compréhension des états initiaux et finaux d'un microgeste, bien que la description textuelle soit précise. Par exemple, sur la base de la description précise d'un **tap** « **pressant une partie de la main sur une autre partie** » [18] ($\blacktriangledown^{\circ}$), les participants ont lu le microgeste comme $\blacktriangledown^{\circ}; \blacktriangle^{\circ}$, 61% du temps. Les commentaires des participants indiquent qu'ils ont été influencés par leur expertise en IHM, en particulier dans le domaine de l'interaction tactile. P7, étudiant en informatique, pensait que le nom et la description ne correspondaient pas, il a donc lu le mot **tap** d'une manière qui lui était familière, c.-à-d. un **tap** sur un écran tactile $\blacktriangledown^{\circ}; \blacktriangle^{\circ}$. P11 a indiqué que « dans [son] expérience [en tant qu'ingénieur de recherche en IHM], un tap est similaire à un clic de souris, alors qu'ici, il est similaire à un appui sur le bouton de la souris ». Par conséquent, même si un microgeste est décrit avec précision, son nom peut induire en erreur.

P16 a été surpris que les descriptions texte+images soient « moins compréhensibles que μ Glyphe », en particulier « pour déterminer l'actionneur ». En outre, pendant la partie écriture de l'étude, P13 a noté qu'il était difficile de déterminer

l'actionneur dans les vidéos, en particulier pour le **tap** puisque l'actionneur et le récepteur sont tous deux en mouvement.

Ces observations suggèrent qu'au-delà des descriptions précises, p. ex. avec μ Glyphe, la communauté doit se mettre d'accord sur des noms pour les classes de microgestes. Souvent, le nom implique des états initiaux et finaux en référence aux domaines plus établis de l'interaction tactile et de l'interaction gestuelle 3D. Comme première étape vers cet objectif terminologique, nous suggérons les noms suivants pour les classes de microgestes décrites dans μ Glyphe à un haut niveau d'abstraction :

- touch [*toucher*], tab [*toucher*] : $\overset{\circ}{-}$ (p. ex. $\overset{\circ}{\nabla}$);
- tap [*tap*] : $\overset{\circ}{-}; \overset{\circ}{-}$ (p. ex. $\overset{\circ}{\nabla}; \overset{\circ}{\blacktriangle}$);
- slide [*glisser*], drag [*glisser*] : $\overset{\circ}{-}$;
- ream [*aller-retour*] : $\overset{\circ}{\nabla}; \overset{\circ}{\blacktriangle} \mid \overset{\circ}{\blacktriangle}; \overset{\circ}{\nabla}$ et son extension aux aller-retours horizontaux : $\overset{\circ}{\blacktriangleright}; \overset{\circ}{\blacktriangleleft} \mid \overset{\circ}{\blacktriangleleft}; \overset{\circ}{\blacktriangleright}$;
- directional swipe [*swipe directionnel*], multi-finger snap [*claquement multi-doigts*], drag&drop [*glisser-déposer*] : $\overset{\circ}{-}; \overset{\circ}{-}; \overset{\circ}{-}$ (p. ex. $\overset{\circ}{-}; \overset{\circ}{\nabla}; \overset{\circ}{-}$).

2.6.4 Propriétés rares

En construisant la base de données, nous avons trouvé très peu d'exemples de microgestes qui nécessiteraient l'ajout de symboles textuels, tels que ceux des phalanges, dans μ Glyphe. Par exemple, Whitmire et coll. utilisent des **tap** à deux mains pour la saisie de texte [119]. Pour μ Glyphe standard, au lieu d'introduire un nouveau symbole, nous pouvons simplement dupliquer et refléter la structure graphique : $_-----$ (main gauche) et $-----_$ (main droite). Un autre exemple serait de différencier davantage les extrémités des doigts pour décrire un **tap** sur l'extrémité de l'index par le pouce [20]. Nous avons délibérément décidé de ne pas augmenter le nombre de symboles textuels afin de ne pas submerger les utilisateurs de μ Glyphe avec des abréviations pour seulement un ou deux microgestes étudiés. Au lieu de cela, nous avons laissé les utilisateurs profiter du fait que μ Glyphe est une notation hybride, en partie graphique et en partie textuelle, pour décrire avec précision les nouvelles zones de contact à l'aide de mots. Par exemple, $\overset{\circ}{\nabla}_{\text{t}}(\bullet_{\text{i}})_{\text{main gauche}}$; $\overset{\circ}{\blacktriangle}_{\text{t}}(\bullet_{\text{i}})_{\text{main gauche}}$ décrit un **tap** du pouce de la main gauche sur l'index de la main gauche. De même, $\overset{\circ}{\nabla}_{\text{t}}(\bullet_{\text{i}})_{\text{very tip}}$; $\overset{\circ}{\blacktriangle}_{\text{t}}(\bullet_{\text{i}})_{\text{very tip}}$ décrit un **tap** du pouce sur l'extrémité de l'index. Cet inconvénient peut être atténué à l'avenir : si la littérature évolue ou si de nombreuses études font un usage intensif de récepteurs jusqu'alors peu étudiés, de nouveaux symboles textuels peuvent être ajoutés à μ Glyphe, comme cela a été fait pour d'autres notations telles que la Labanotation [47]. Cependant, quel que soit le nombre de symboles textuels ajoutés, le cœur de la notation, c.-à-d. les mouvements, les contextes et les compositions d'événements, restera le même, ce qui démontre une certaine complétude de la notation μ Glyphe.

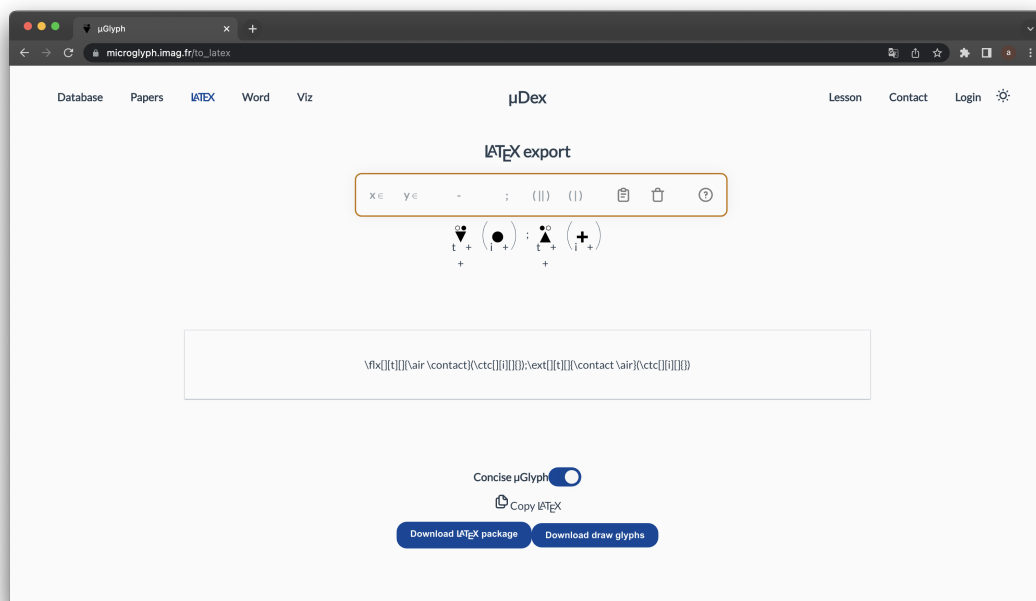


FIGURE 2.8: Capture d'écran de μ Dex. Éditeur visuel μ Glyphe avec exportation \LaTeX .

2.7 μ Dex : outil en ligne pour faciliter l'utilisation de μ Glyphe

Pour promouvoir l'adoption de μ Glyphe par les chercheurs et les praticiens de l'IHM, nous proposons un site web, le μ Dex, offrant trois services principaux.

Tout d'abord, nous avons mis en place un éditeur visuel pour les descriptions μ Glyphe avec une fonction d'exportation vers \LaTeX (Figure 2.8). Nous avons utilisé cet éditeur pour traduire les microgestes de la littérature en μ Glyphe et la fonction d'exportation vers \LaTeX pour créer les tables de l'annexe B. L'éditeur visuel peut aussi être utilisé pour générer une image SVG ou PNG d'une description μ Glyphe pour utiliser μ Glyphe avec Word (Figure 2.9).

μ Dex contient également la base de données complète, décrite précédemment, ainsi qu'un moteur de recherche permettant aux utilisateurs de formuler des recherches ciblées basées sur : 1) des descriptions μ Glyphe 2) des mots-clés qui correspondent aux symboles μ Glyphe, p. ex. « index » pour chercher toutes les descriptions μ Glyphe avec le symbole « i » 3) des mots-clés qui correspondent aux noms et descriptions des microgestes ainsi qu'aux descriptions des [préhensions](#) d'objets et des objets étudiés en relation avec les microgestes. La Figure 2.10 présente une capture d'écran du site μ Glyphe avec la base de données. Ce moteur de recherche permet aux utilisateurs d'explorer efficacement la base de données des microgestes existants, de mettre en relation et de comparer les études existantes. Pour ajouter un nouvel article, les chercheurs peuvent trouver nos coordonnées sur

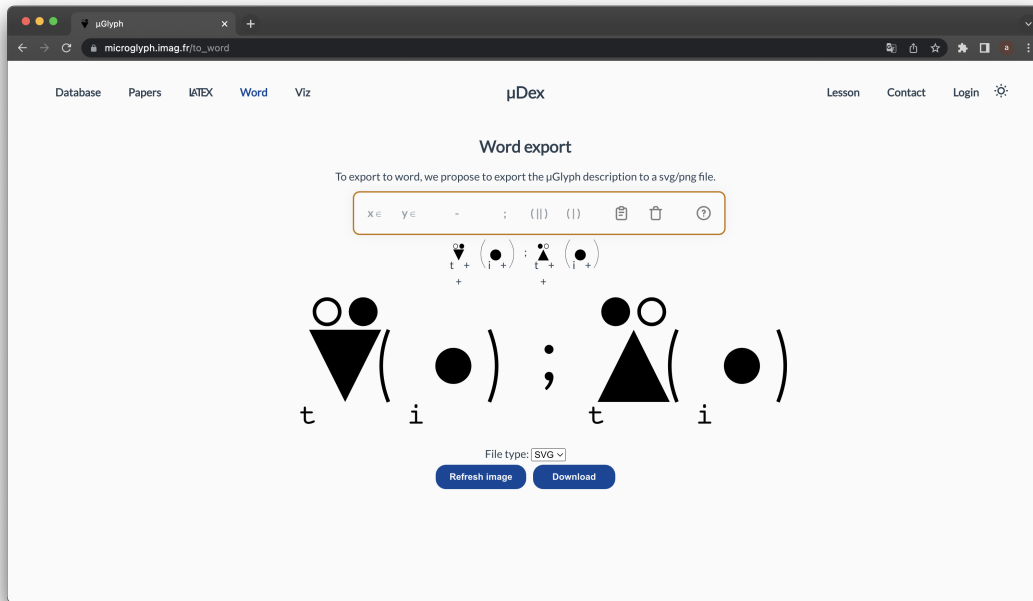


FIGURE 2.9: Capture d'écran de μ Dex. Éditeur visuel μ Glyphe avec exportation Word en générant une image SVG ou PNG.

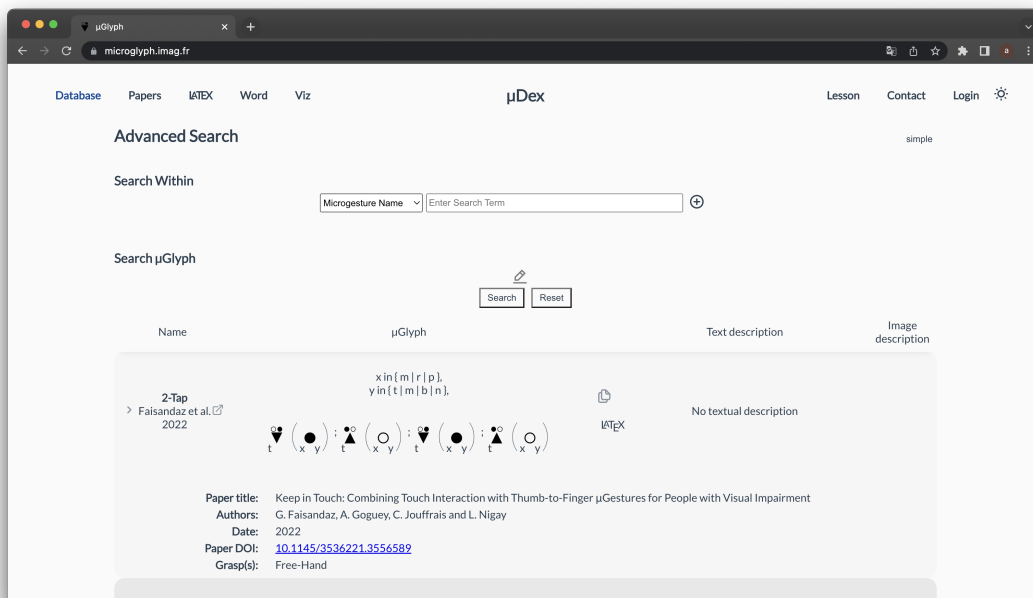


FIGURE 2.10: Capture d'écran de μ Dex. Base de données des microgestes : pour chaque microgeste, nom, description, article et description μ Glyphe.

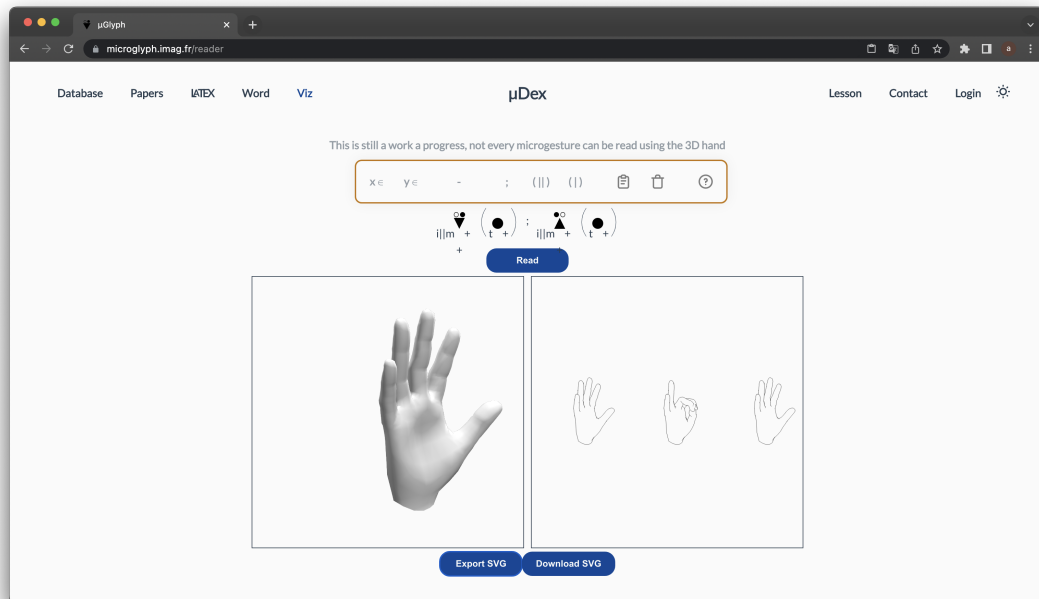


FIGURE 2.11: Capture d'écran de μ Dex. Main animée en 3D générée à partir d'une description μ Glyphe et export SVG des images clés de l'animation.

le site web pour nous envoyer leurs documents et les descriptions en μ Glyphe.

Enfin, pour présenter visuellement un microgeste, μ Dex comprend une vue d'un modèle de main 3D utilisant *three.js*¹⁰ et un outil pour générer des animations basées sur des descriptions en μ Glyphe¹¹. Après avoir saisi une description μ Glyphe, les utilisateurs peuvent regarder une animation de la main reproduisant le microgeste (Figure 2.11). Chaque partie de la description μ Glyphe est utilisée pour créer une image clé de l'animation. Pour jouer l'animation, les images-clés sont interpolées. Les utilisateurs peuvent faire pivoter le modèle de la main pour jouer l'animation sous n'importe quel angle. Un tel outil peut être utilisé pour expliquer les microgestes aux utilisateurs, à l'instar de l'Hololens 2¹² qui enseigne le geste du pincement à l'aide d'une main 3D¹³. En outre, les utilisateurs peuvent exporter un fichier SVG contenant toutes les images clés de l'animation. Cette fonction est inspirée d'Esquisse¹⁴ [1], pour aider les chercheurs à exporter facilement une description graphique d'un microgeste avec différentes orientations de la main, comme illustré dans la Figure 2.12. La fonction d'exportation est mise en œuvre à l'aide du plugin *three SVG rendering*¹⁵. Dans la suite, nous présentons des scénarios d'utilisation

10. <https://threejs.org>

11. L'outil d'animation est une preuve de concept. Il s'agit d'un travail en cours et, au moment de la rédaction, il ne fonctionne que pour certaines expressions μ Glyphe simples et concises.

12. <https://www.microsoft.com/en-us/hololens/>

13. <https://docs.microsoft.com/en-gb/windows/mixed-reality/mrtk-unity/mrtk2/features/ux-building-blocks/hand-coach?view=mrtkunity-2022-05>

14. <https://github.com/LokiResearch/EsquisseBlender>

15. <https://github.com/LokiResearch/three-svg-rendering>.

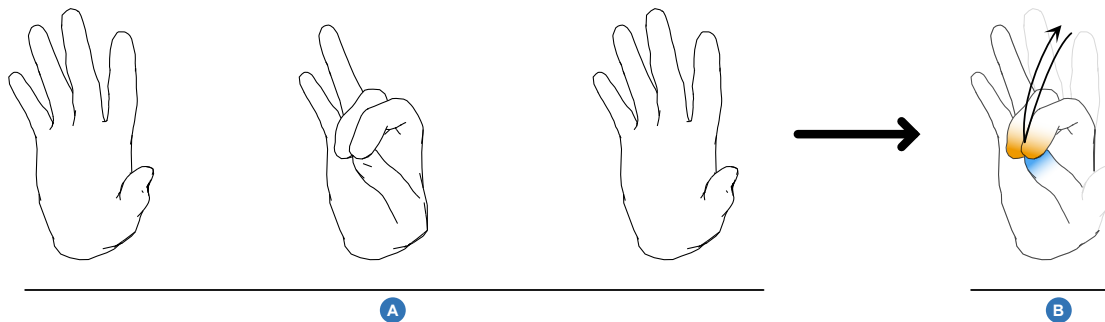


FIGURE 2.12: Création d'une description graphique d'un microgeste à l'aide de l'exportation SVG. **A)** Images clés exportées du visionneur de la main 3D ([Figure 2.11C](#)). **B)** La description graphique créée avec les images clés.

de l'outil.

Scénario 1 : Trouver une solution Claire est designer automobile. Elle souhaite concevoir une interaction par microgestes pour contrôler les appareils de la voiture, tels que l'autoradio, la climatisation et le système GPS. Pour ces tâches concrètes, elle a besoin de trouver un microgeste pour faire défiler une liste de haut en bas, tout en conduisant. Elle se souvient avoir lu un article dans lequel les utilisateurs font défiler une liste en [Réalité Mixte \(RM\)](#) en dessinant des cercles sur leur pouce : $\overset{\bullet\bullet}{\circ}(\bullet, \bullet)$ [20]. Elle se demande si des microgestes similaires ont été utilisés dans le contexte automobile. À cette fin, elle utilise le moteur de recherche avancé de μ Dex et saisit la description μ Glyphe suivante : $\overset{\bullet\bullet}{\circ}$; avec un filtre supplémentaire pour spécifier le contexte des microgestes : le volant. Les résultats de sa recherche incluent l'article de Wolf et coll. [122], qui présente un microgeste circulaire exécuté par le pouce sur les autres doigts tout en tenant le volant. Comme ce microgeste peut être difficile à réaliser si la main est trop petite par rapport au diamètre du volant, elle se demande si des recherches antérieures ont testé ce microgeste circulaire en l'air. Elle modifie donc la description du μ Glyphe comme suit : $\overset{\bullet\bullet}{\circ}$. Les résultats incluent deux articles supplémentaires [52, 33]. Après avoir étudié les articles identifiés, elle décide d'utiliser un cercle en l'air pour faire défiler les différentes listes associées à ses tâches concrètes initiales.

Résumé : μ Dex peut aider les praticiens de l'IHM à concevoir des interactions microgestes. L'outil favorise donc également la diffusion de l'interaction par microgestes dans des applications réelles.

Scénario 2 : Comprendre et s'inspirer Noémie débute un doctorat dans le domaine des microgestes. Ses encadrants, qui ont déjà travaillé sur le sujet, lui proposent plusieurs articles pour l'aider à démarrer sa revue de littérature. En particulier, la liste d'articles comprend l'étude d'élicitation de Chan et coll. [18]. Sur μ Dex, elle recherche les microgestes présentés dans cet article en saisissant le DOI de l'article. Dans les résultats, elle trouve le microgeste [tap du pouce avec l'index et le majeur](#) et veut comprendre comment l'exécuter. Elle lit d'abord la

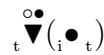
description textuelle extraite de l'article. Elle copie ensuite la description μ Glyphe et la colle dans le visualiseur de main 3D. Elle regarde ensuite l'animation 3D générée du microgeste correspondant. Plus tard, au cours de sa thèse, elle utilise l'exportation SVG pour créer des images de microgestes et utilise l'exportation L T X pour intégrer la description μ Glyphe du microgeste dans ses articles.

Résumé : Notre outil permet aux chercheurs de comprendre rapidement les travaux antérieurs sur les microgestes et de s'en inspirer. Pour les articles, l'outil facilite l'utilisation de la notation μ Glyphe et fournit un support pour l'illustration.

Scénario 3 : R diger sa thèse Adrien est en fin de thèse en IHM. Pour la rédaction de son manuscrit il doit retranscrire 118 microgestes de la littérature avec μ Glyphe dans son [annexe B](#). Pour les exemples simples, Adrien utilise directement les commandes L T X, p. ex. pour `press on tip of index` [*toucher sur le bout de l'index*] [20] :

```
1 $\flx [] [t] []{\air \contact}{\ctc[t][i] []{}}$
```

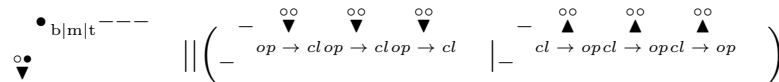
résultant en :



En revanche, pour les exemples compliqués en version non concise le code L T X est trop compliqué à écrire, p. ex. `tap and flap` [*toucher et flexion/extension*] [105] :

```
1 $
2 \MVT [] []{\flx [] [] []{\air \contact}}{\ctc[b|m|t] [] []{}}{\finger
3   }\finger}{\finger}
4 ||
5 \Big(
6   \MVT [] []{\finger}{\finger}{\flx [] [] [{$op \rightarrow cl$
7     ]}{\air \air}}{\flx [] [] [{$op \rightarrow cl$}]{\air \
8     air}}{\flx [] [] [{$op \rightarrow cl$}]{\air \air}}
9   |
10  \MVT [] []{\finger}{\finger}{\ext [] [] [{$cl \rightarrow op$
11    ]}{\air \air}}{\ext [] [] [{$cl \rightarrow op$}]{\air \
12    air}}{\ext [] [] [{$cl \rightarrow op$}]{\air \air}}
13 \Big)
```

résultant en :



Adrien se tourne donc vers l'éditeur visuel de μ Glyphe avec son option `export` vers le code L T X pour faciliter la rédaction de sa thèse.

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté μ Glyphe, une notation permettant de décrire sans ambiguïté et avec précision les microgestes   différents niveaux

d'abstraction. μ Glyphe est basée sur une représentation graphique et textuelle des mouvements des doigts, du contexte d'exécution et des caractéristiques optionnelles des mouvements. μ Glyphe vise à normaliser les descriptions de microgestes en fournissant une notation pratique aux chercheurs et aux praticiens de l'IHM. Pour évaluer la facilité d'utilisation de la notation μ Glyphe, nous avons mené une étude avec 18 participants. Après un cours de 9 minutes et une phase d'entraînement de 10 minutes, les participants ont pu lire correctement μ Glyphe dans 89 % des cas et écrire correctement dans 91 % des cas, contre 46 % avec les descriptions conventionnelles. Pour illustrer la puissance descriptive de la notation μ Glyphe, nous avons traduit en μ Glyphe un ensemble de 121 microgestes tirés de 18 articles de littérature. Nous avons rassemblé ces traductions, ainsi que leur texte original et les descriptions des images, dans une base de données en ligne, appelée le μ Dex. Pour faciliter l'adoption de la notation μ Glyphe, μ Dex inclut un ensemble d'outils permettant de rechercher dans la base de données, d'écrire et d'intégrer des expressions μ Glyph dans des articles de recherche basés sur L^AT_EX ou Word, ainsi que de visualiser les microgestes. Nous pensons que μ Glyphe peut servir de langage commun aux chercheurs et aux praticiens de l'IHM pour faire avancer le domaine de l'interaction par microgestes.

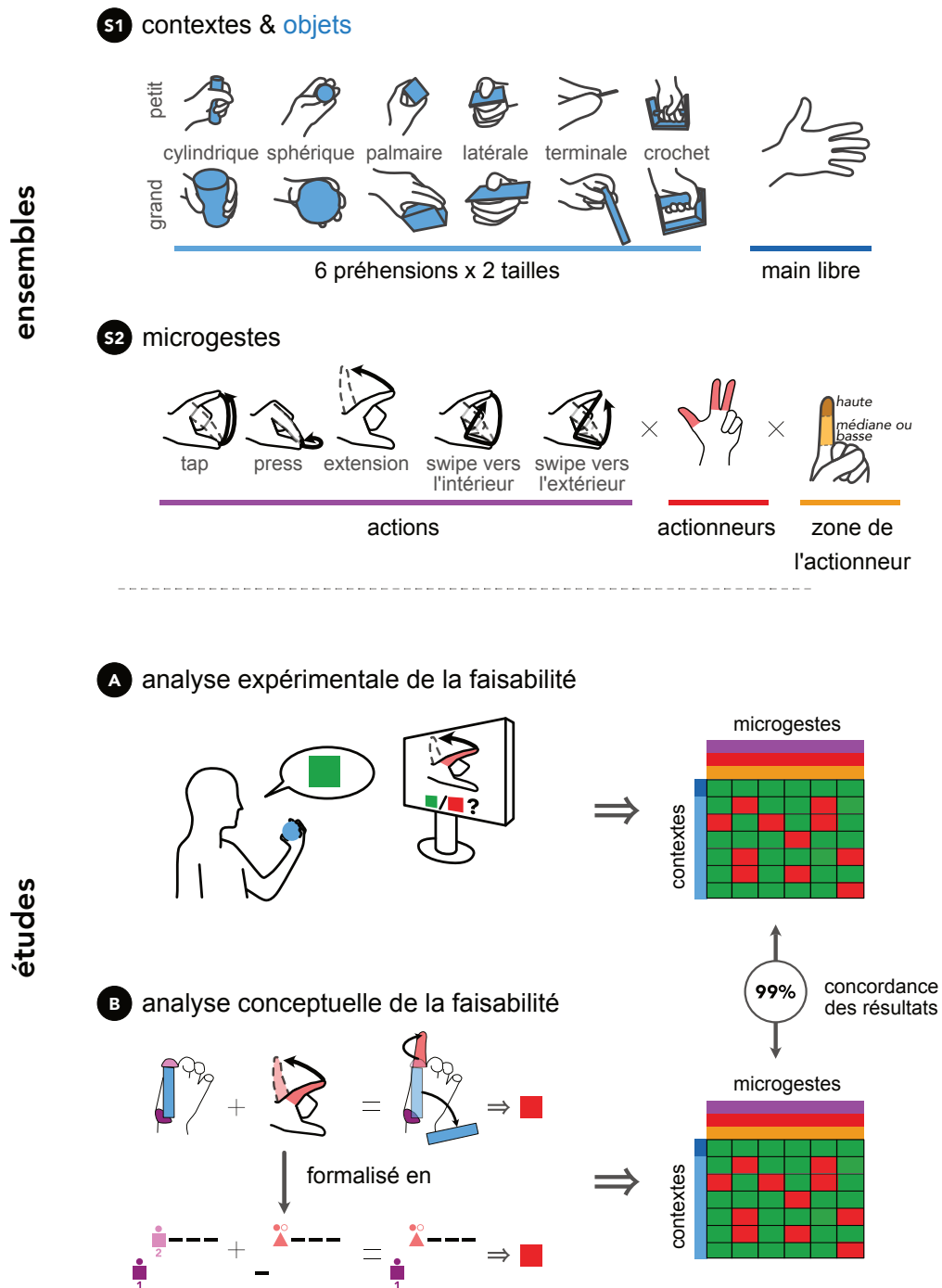


FIGURE 3.1: Ensembles considérés et études réalisées pour définir les contraintes imposées par la **préhension** d'un objet sur la faisabilité des microgestes. **S1)** Ensembles de contextes étudiés dans toutes nos études. **S2)** Ensemble initial de microgestes étudiés. **A)** Étude utilisateur sur la faisabilité de chaque combinaison contexte × microgeste des ensembles S1 et S2. **B)** Conceptualisation des résultats de A.

Chapitre 3

Faisabilité des microgestes en contexte main libre et main occupée

Les travaux de ce chapitre sont en cours de soumission à International Journal for Human Computer Studies

μ Glyphe, présentée dans le chapitre précédent, permet de décrire deux types de surfaces comme étant des récepteurs ([sous-section 2.2.4](#)) : une partie de la main ou un objet. Toutefois, comme énoncé dans le [chapitre 1](#), la littérature sur les microgestes est divisée en deux : les microgestes avec la main occupée d'une part, et la main libre d'autre part. La structure de la [section 1.2](#) reflète cette dichotomie.

Lorsque la main tient un objet, cela impacte les microgestes faisables. Par exemple, j'invite le lecteur à tenir un stylo entre le pouce et l'index et – attention à ne pas faire le tomber de trop haut – de faire un **tap** de votre index sur le **stylo**. Il est impossible de faire ce microgeste en tenant le stylo entre le pouce et l'index sans modifier la [préhension](#) du stylo. Avec μ Glyphe, nous pouvons décrire l'objet que nous tenons, mais pouvons-nous décrire les contraintes imposées par la [préhension](#) d'un objet pour en déduire si le microgeste est faisable ou non ? Avec ces contraintes, les ensembles de microgestes en main occupée faisables sur un grand nombre de contextes de [préhension](#) sont souvent plus petits que ceux en main libre.

Dans ce chapitre, nous présentons la première étude sur la faisabilité des microgestes dans différents contextes de [préhension](#) et de main libre. Dans cette étude, nous allons introduire des caractéristiques plus précises du mouvement en contexte de [préhension](#) : la zone de l'actionneur qui entre en contact avec la surface. Enfin, nous offrons une conceptualisation de ces résultats pour déterminer si un microgeste est faisable ou non sans faire d'études expérimentales. Cette conceptualisation s'appuie sur les caractéristiques de la [préhension](#) et μ Glyphe.

3.1 Taxonomies de [prévisions](#) d'objets

Les contextes de [prévisions](#) d'objets, que nous désignerons par [prévisions](#) dans la suite de ce chapitre par souci de concision, ont été étudiées dans de nombreux domaines de recherche, de la médecine à la robotique. Cela a donné lieu à plusieurs

taxonomies de **préhensions**. Une étude approfondie des taxonomies antérieures à 1994 a été publiée par Mackenzie et Iberall [83]. Les auteurs ont identifié la taxonomie de Schlesinger de 1919 [100], devenue la taxonomie de référence pour les travaux en IHM sur la **préhension**, que ce soit en utilisant un sous-ensemble [129, 99] ou la taxonomie complète [103, 54, 38]. L'objectif initial de Schlesinger était de regrouper les **préhensions** réalisables par l'humain afin de développer des prothèses de main fonctionnelles et efficaces. L'auteur se concentre sur les positions des doigts et de la paume et définit six **préhensions**, comme indiqué par Mackenzie et Iberall [83], traduit en français (basé sur les travaux récents en biomécanique [43]) en :

CYLINDRIQUE : tenir un objet cylindrique, p. ex. un marteau ou une tasse

SPHÉRIQUE : tenir un objet sphérique, p. ex. un pommeau de vitesse ou une balle de baseball

OPPOSITION PALMAIRE : tenir un objet avec la paume tournée vers l'objet, p. ex. une boîte d'allumettes ou une boîte de thé

OPPOSITION TERMINALE : tenir un petit objet, p. ex. une aiguille ou un feutre

OPPOSITION LATÉRALE : tenir un objet plat, p. ex. une carte de crédit

CROCHET : tenir un objet lourd, p. ex. un sac

Dans la suite, nous omettrons le mot **Opposition** dans **Opposition Palmaire**, **Opposition Terminale** et **Opposition Latérale** par souci de concision.

Une taxonomie plus récente, GRASP [39], fusionne 22 taxonomies de **préhensions**, dont celle de Schlesinger, et se fonde sur les caractéristiques suivantes : la force et la précision nécessaires à l'exécution de la **préhension**, la répartition de la force requise pour maintenir l'objet et la partie de la main qui applique la force. Au total, GRASP différencie 33 **préhensions**. GRASP inclut trois **préhensions** spécifiques à un objet, à savoir une **préhension** pour des ciseaux, une **préhension** pour des baguettes chinoises et une **préhension** pour une cigarette. Ces **préhensions** ne sont pas présentes dans la taxonomie de Schlesinger. En outre, un type de **préhension** dans la taxonomie de Schlesinger est décomposé en plusieurs types dans la taxonomie GRASP. Pour ce faire, GRASP identifie plusieurs variantes d'une **préhension** en fonction du nombre de doigts sur un objet, p. ex. les **préhensions** n°13, 14 et 27 correspondent à la **préhension** SPHÉRIQUE. D'autres variations d'une **préhension** dépendent de la taille de l'objet saisi, p. ex. les **préhensions** n°1, 2 et 3 correspondent à la **préhension** CYLINDRIQUE.

Dans la suite, nous utiliserons la taxonomie de Schlesinger avec chaque **préhension** instanciée en deux tailles, comme cela a été fait dans des travaux antérieurs dédiés aux microgestes [103, 102].

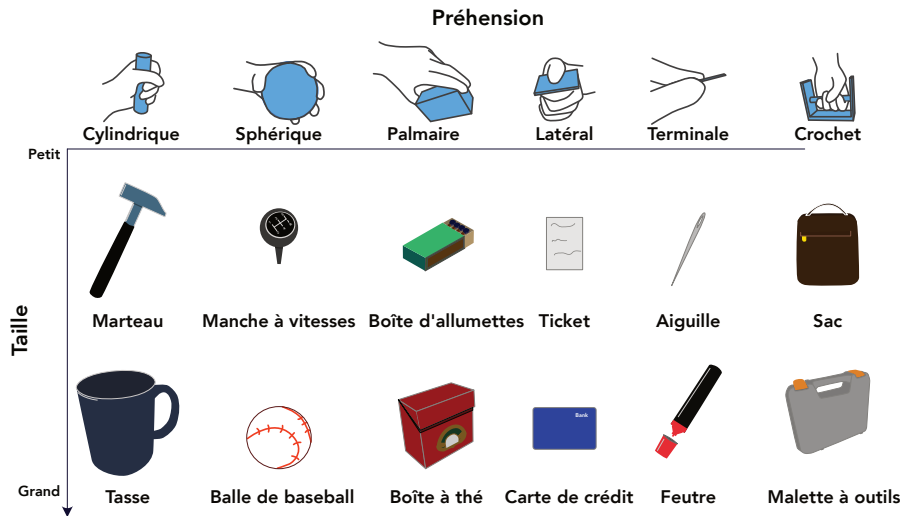


FIGURE 3.2: Liste d’objets quotidiens utilisés comme références pour les objets que nous avons imprimés en 3D.

3.2 Ensemble de contextes et de microgestes étudiés

Dans la suite, nous appelons contexte soit la main libre, soit un contexte de **préhension**, c.-à-d. une combinaison **préhension** \times taille. Ainsi, dans cette section, nous présentons les contextes et les microgestes choisis.

3.2.1 Contextes de **préhension** étudiés

Comme annoncé ci-dessus, nous combinons la taxonomie de Schlesinger [100] et la taxonomie détaillée de GRASP [39]. Ainsi, de manière similaire à trois études précédentes [54, 103, 104], nous considérons la taxonomie de Schlesinger avec deux tailles d’objets différentes, la taille étant une propriété dans la taxonomie GRASP. Par exemple, pour la **préhension** Terminale, les deux tailles permettent de différencier les cas où nous tenons une aiguille (**préhension** n°9 [39]) ou un feutre (**préhension** n°8 [39]). Afin de tester ces six **préhenions** et ces deux tailles, nous avons identifié douze objets du quotidien incitant la main à utiliser chaque combinaison de **préhension** \times taille. Ces objets sont répertoriés dans la Figure 3.2. Sharma et coll. ont précédemment rapporté que le poids de l’objet a peu d’influence sur les microgestes [103], tant qu’il permet une saisie confortable de l’objet. Cependant, pour éviter toute influence d’autres propriétés de l’objet, telles que sa rugosité ou sa rigidité, nous avons imprimé en 3D des versions abstraites de ces 12 objets à l’aide d’une imprimante en résine Form3¹. Les fichiers STL de ces objets sont disponibles sur Github². La Figure 3.1S1 montre les six **préhenions**, les deux tailles et les

1. <https://formlabs.com/fr/3d-printers/form-3>

2. <https://github.com/AChaffangeon/schlesinger-abstract-objects.git>

objets correspondants que nous considérons.

Outre ces contextes de **préhension**, nous considérons également le contexte *main libre*, c.-à-d. que la main ne tient pas d'objet. Au total, nous considérons (6 **préhensions** × 2 tailles) + main libre = 13 contextes.

3.2.2 Microgestes étudiés

Tout d'abord, notre ensemble comprend les actions les plus courantes :

- **tap** [119, 106, 122, 99, 79, 123, 103, 102, 90, 56, 70, 118, 18, 105, 75, 19, 80, 110, 117, 76] : un doigt entre en contact ponctuel avec une surface pendant un court laps de temps ;
- **swipe vers l'intérieur** [119, 129, 10, 106, 122, 79, 123, 103, 102, 90, 18, 105, 75, 33, 80, 76, 127] : un doigt entre en contact avec une surface, puis glisse dessus vers la paume, avant de relâcher le contact ;
- **swipe vers l'extérieur** [119, 129, 10, 106, 122, 79, 103, 102, 90, 18, 105, 75, 33, 80, 76, 127] : un doigt entre en contact avec une surface, puis glisse dessus en s'éloignant de la paume, avant de relâcher le contact ;
- **extension** [122, 103, 70, 118] : un doigt s'ouvre complètement pendant une courte période.

Nous considérons également le **press** des doigts, c.-à-d. l'application d'une forte pression avec un doigt sur une surface pendant un court laps de temps. Cette action est prometteuse dans les contextes de **préhension** car elle peut être réalisée sans déplacer l'actionneur sur ou hors de l'objet. Par rapport à l'ensemble de Sharma et coll. [103], nous ne retenons pas les **swipe horizontaux** qui sont principalement utilisés avec comme un seul type d'actionneur, le pouce [103, 102, 106, 129, 122, 90, 18, 105, 75, 76, 127]. Les autres doigts, p. ex. l'index ou le majeur, sont moins utilisés comme actionneur pour un **swipe horizontal** [103, 102, 52, 84, 33]. Cette action est donc moins générique que les autres. Selon Chan et coll. [18], les microgestes de dessin sont principalement utilisés lorsqu'aucun autre microgeste n'est disponible. Ainsi, pour réduire le nombre de microgestes et donc le temps d'expérimentation, nous nous concentrons sur les actions suivantes : **tap**, **press**, **extension** et **swipe vers l'intérieur/extérieur**.

Au-delà des actions réalisées, nous considérons deux caractéristiques supplémentaires des microgestes pour enrichir l'ensemble des microgestes.

Tout d'abord, nous distinguons l'actionneur du microgeste. Wolf et coll. [122] et Sharma et coll. [102] ont signalé des difficultés pour l'annulaire et l'auriculaire pour effectuer des microgestes sur un objet en raison de restrictions biomécaniques. Nous avons donc décidé de supprimer de notre ensemble de microgestes tout geste ayant l'un de ces deux doigts comme actionneur.

Deuxièmement, pour **tap** et **press**, nous distinguons la zone de l'actionneur qui **tap/press** la surface : la phalange haute et la phalange **médiane ou basse (mob)**. Nous avons décidé de fusionner la phalange médiane et la phalange basse car, lors d'une étude pilote, nous avons remarqué que les deux phalanges travaillaient



FIGURE 3.3: Distribution de la taille de la main (distance en cm entre la base de la paume et l’extrémité du majeur) des 20 participants à l’étude.

ensemble. Un **tap** de la phalange médiane sur un objet de grande taille, p. ex. **Cylindrique Grand** (Figure 3.2), entraîne presque toujours un **tap** de la phalange basse. Un **tap** de la phalange basse dans certains contextes, p. ex. **Palmaire Grand** ou **Main Libre** (Figure 3.2), est inconfortable. Cette distinction en utilisant les phalanges n’a jamais été étudiée dans un contexte de **préhension**.

En résumé, l’ensemble est composé de :

(**tap**, **press**) × (3 doigts × 2 phalanges) + (**extension**, **swipe** vers l’intérieur, **swipe** vers l’extérieur) × 3 doigts = 21 microgestes.

3.3 Étude empirique de la faisabilité d’un microgeste

Nous présentons une étude expérimentale visant à déterminer la faisabilité et la facilité d’utilisation de l’ensemble des microgestes décrits ci-dessus lorsqu’ils sont exécutés dans les treize contextes définis.

3.3.1 Protocole

Pour chacun des treize contextes, les participants ont exécuté chacun des microgestes de notre ensemble. Pour chaque combinaison de contexte × microgeste, les participants devaient attribuer un score de faisabilité sur une échelle de Likert en 4 points (1 - difficile, 4 - facile). Nous avons utilisé un nombre pair de graduations afin d’éviter les réponses neutres. Après avoir évalué chaque combinaison, les participants ont précisé sur lequel des trois types de surface de Sharma et coll. – à savoir *corps*, *objet* et *air* [103] – ils ont réalisé le microgeste. Compte tenu de notre ensemble de microgestes, seul le microgeste **extension** peut être exécuté sur la surface *air*. Si une combinaison contexte × microgeste était impossible à réaliser, les participants pouvaient l’ignorer. Les essais ignorés ont été enregistrés. L’ordre des **préhensions** a été tiré aléatoirement entre les participants et, pour une **préhension** donnée, l’ordre des microgestes a également été tiré aléatoirement. Les participants étaient libres d’effectuer les microgestes comme ils le souhaitaient, mais ils avaient pour instruction de ne pas modifier leur **préhension**. L’étude a duré moins d’une heure.

Nous avons recruté 20 participants (26, 4ans ± 6, 0), tous utilisent leur main droite pour leurs activités quotidiennes. Dix participants étaient biologiquement de sexe féminin et dix de sexe masculin. Comme le rapport taille de l’objet et taille de la main peut avoir une influence sur la faisabilité des microgestes, nous avons

essayé de couvrir un large éventail de tailles de mains (15,3 cm à 20,3 cm entre la base de la paume et l'extrémité du majeur). La [Figure 3.3](#) présente la distribution de la taille des mains des 20 participants.

3.3.2 Résultats

L'analyse des données suit les recommandations de « communication statistique juste en IHM » (*fair statistical communication in HCI* [32]). Les données ont été agrégées par participant en utilisant la médiane, puis, si nécessaire, agrégées par contexte et/ou microgeste en utilisant la moyenne. Pour la comparaison des scores de Likert, nous indiquons, en tant que taille de l'effet, le delta de Cliffs δ . δ représente la fréquence à laquelle les scores de Likert d'un groupe A sont supérieurs aux scores d'un groupe B. δ est compris entre -1 et 1. Un score autour de 0 signifie qu'il n'y a pas d'effet. Un score proche de 1 signifie un effet important, les scores de Likert du groupe A étant toujours supérieurs à ceux du groupe B. Un score proche de -1 signifie un effet important, les scores de Likert de B étant toujours supérieurs à ceux de A. Nous avons calculé le delta de Cliffs à l'aide de la bibliothèque Python *cliffs-delta*³. Les [Intervalles de Confiance \(IC\)](#) indiqués sont des [IC](#) à 95 % calculés selon la formule $IC = 1,96 * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$, avec σ l'écart type et n la taille de l'échantillon considéré.

La [Figure 3.4](#) présente le nombre de participants qui ont estimé qu'une combinaison contexte \times microgeste est impossible.

La [Figure 3.5](#) présente le score de Likert médian (échelle de 1 - difficile, 4 - facile) pour chaque combinaison contexte \times microgeste. Si un participant a ignoré une combinaison, aucun score de Likert n'a été enregistré. Si 50 % ou plus des participants ont ignoré une combinaison, celle-ci a été jugée impossible. Les scores médians ne sont donc calculés que pour les combinaisons non ignorées et pour les combinaisons exécutées par au moins 50 % des participants.

3.3.2.1 Impact de la taille de la main

Nous avons tracé le nombre d'essais ignorés et le score de Likert médian pour chaque taille de main. Le pourcentage de combinaisons contexte \times microgeste ignorées semble correspondre à une courbe polynomiale de degré 2 (p-valeur = 0,01, $R^2 = 0,41$), présentée à la [Figure 3.6](#). L'[IC](#) à 95 % ne semble pas indiquer d'effet entre les tailles de mains testées. Toutefois, les tendances aux extrémités illustrées par la régression polynomiale d'ordre 2, pourraient indiquer que des tailles en dehors de l'intervalle puissent impacter la faisabilité d'un microgeste. D'après les commentaires de nos participants ayant des mains plus petites, nous nous attendions à un impact de la taille des mains sur les microgestes du pouce pour deux contextes : **Sphérique Grand** et **Palmaire Grand**. Après avoir tracé les données ([Figure 3.7](#)), il ne semble pas y avoir d'impact pour **Palmaire Grand** car lorsque les participants ayant de petites mains ne peuvent pas effectuer les microgestes,

3. <https://pypi.org/project/cliffs-delta/>

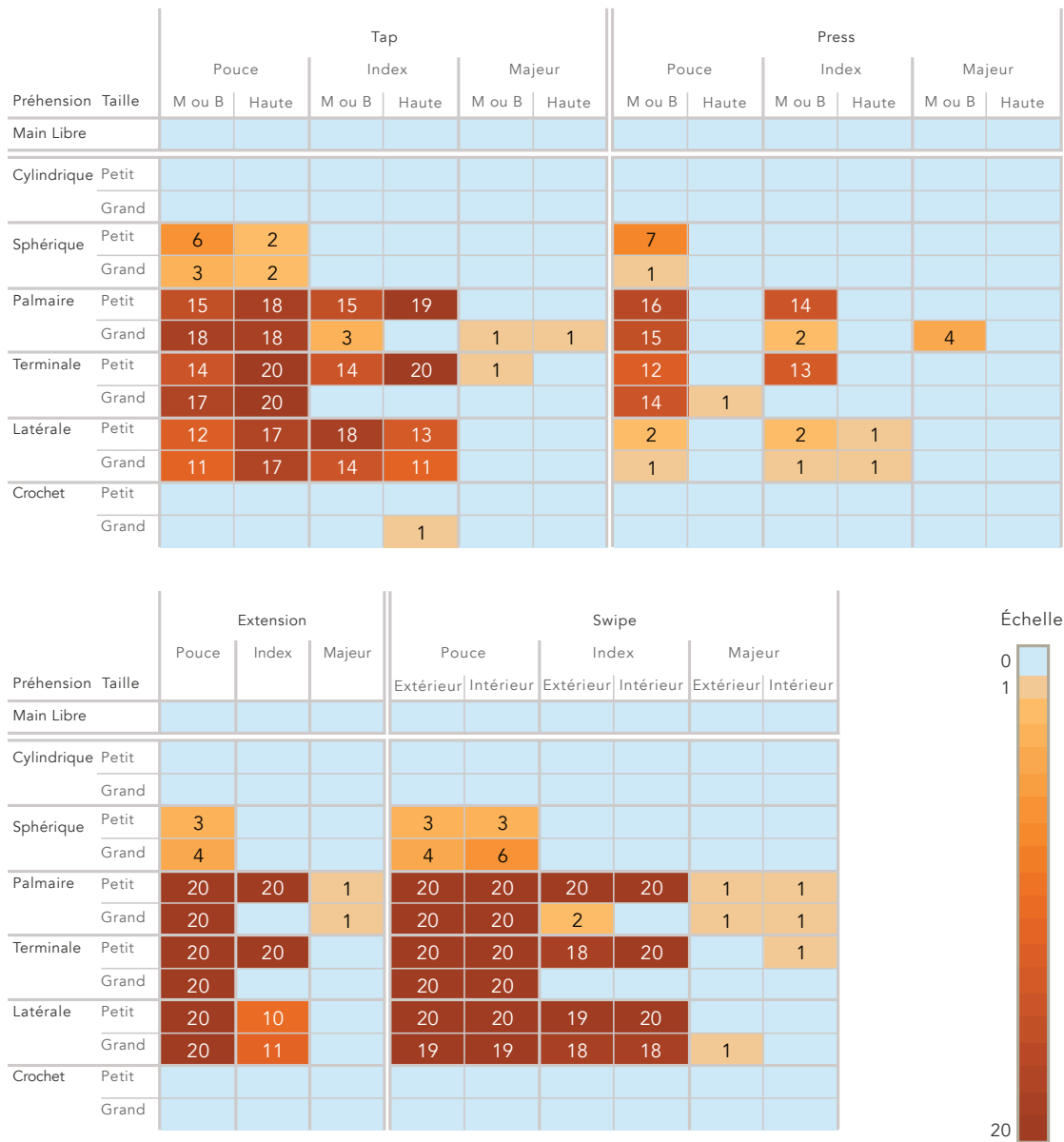


FIGURE 3.4: Nombre de participants ayant ignoré une combinaison contexte × microgeste

Chapitre 3 : Faisabilité des microgestes en contexte main libre et main occupée

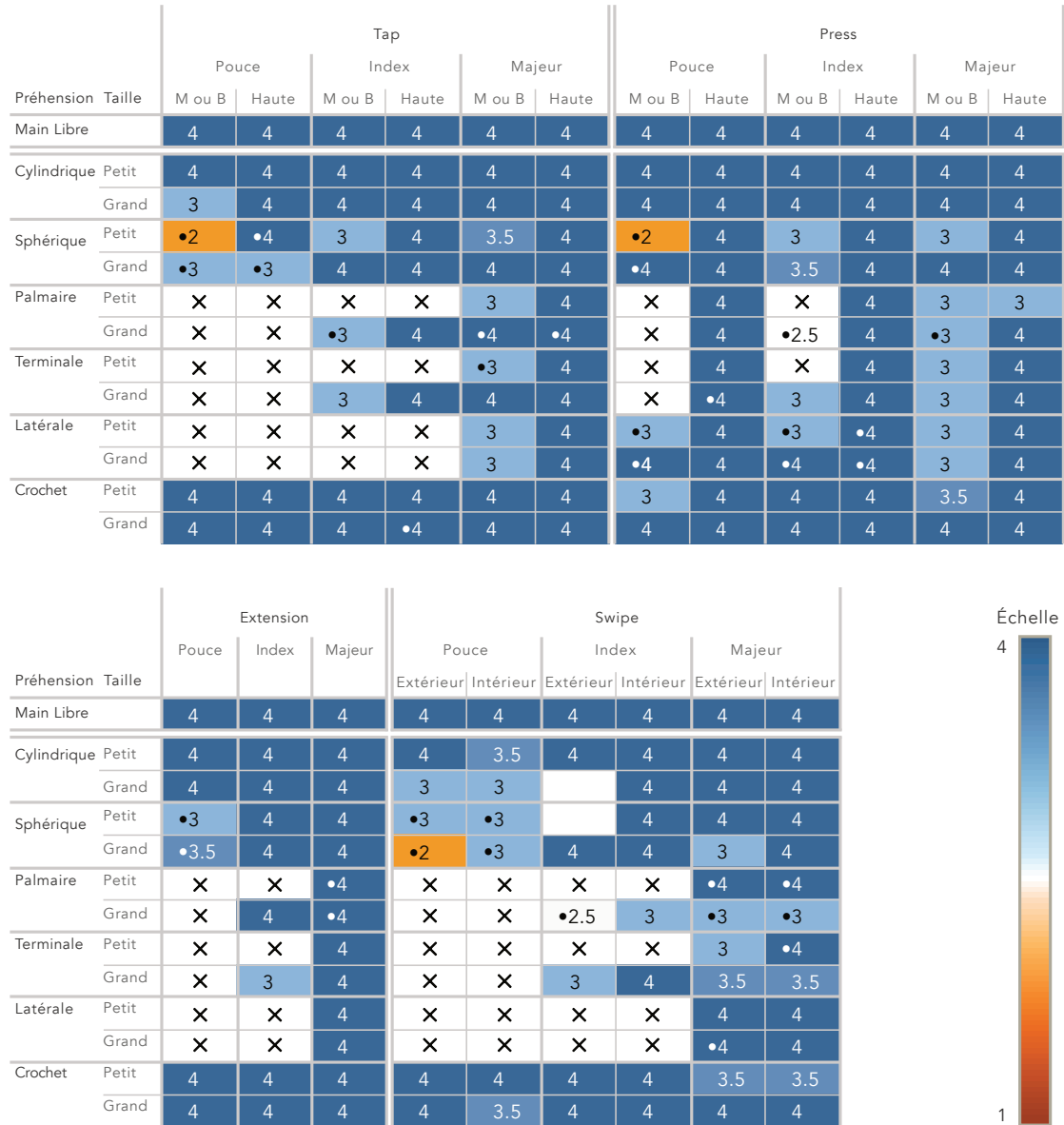


FIGURE 3.5: Score médian de Likert (échelle de 1-difficile à 4-facile) pour chaque combinaison de contexte × microgeste. Les cellules avec un symbole croix (×) correspondent aux combinaisons de contextes × microgestes qui ont été ignorées par 50% ou plus des participants. Les cellules avec un symbole • correspondent aux combinaisons qui ont été ignorées au moins une fois.

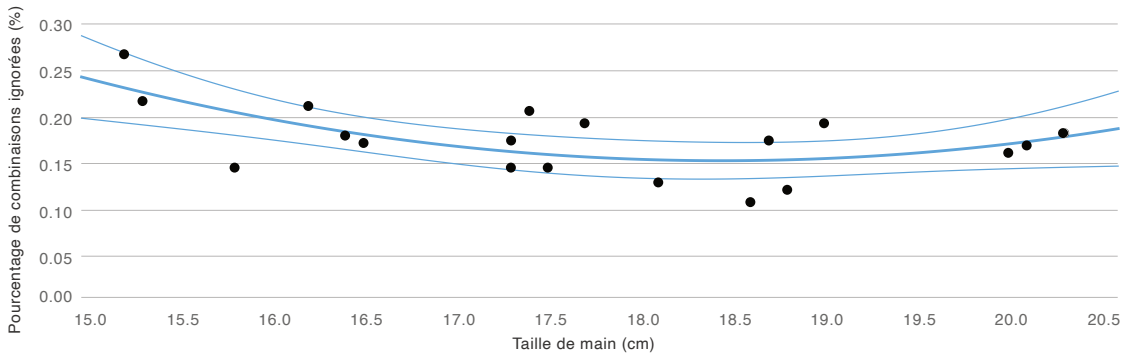


FIGURE 3.6: Nombre moyen de combinaisons contexte × microgeste ignorées par taille de main avec un ajustement polynomial et l’IC à 95 %. Chaque point correspond à un participant ; pour la taille de main 20,3 cm, deux points sont superposés.

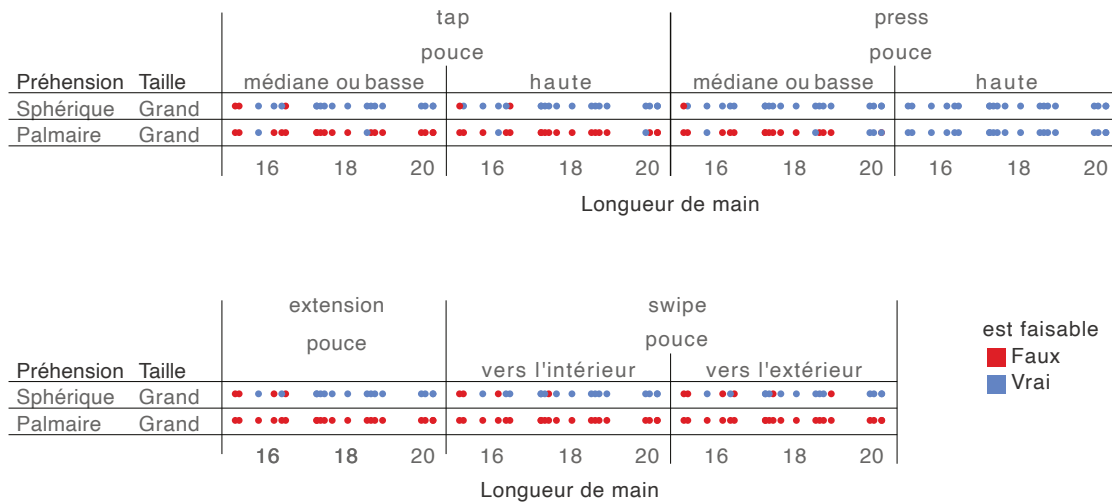


FIGURE 3.7: Distributions des microgestes ignorés (en rouge) et non ignorés en fonction de la taille des mains pour les contextes **Sphérique Grand** et **Palmaire Grand**.

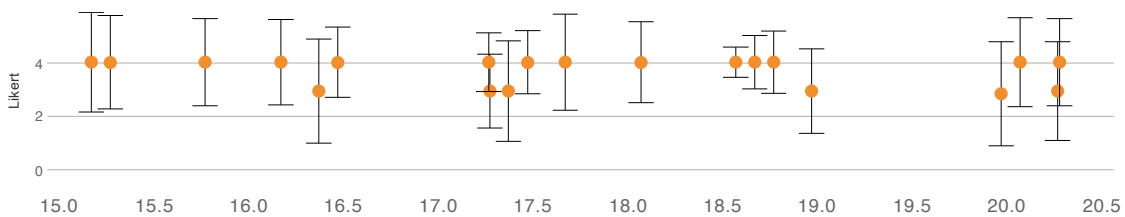


FIGURE 3.8: Moyenne de Likert avec un intervalle de confiance à 95 % par longueur de main. Chaque point correspond à un participant unique.

| Préhension | Taille | Moyenne (IC) | Préhension | Taille | Moyenne \pm IC |
|-------------|--------|---------------|------------|--------|------------------|
| Main Libre | | 4,0 \pm 0 | | | |
| Cylindrique | Petit | 4,0 \pm 0,0 | Sphérique | Petit | 3,5 \pm 0,3 |
| | Grand | 3,9 \pm 0,2 | | Grand | 3,7 \pm 0,2 |
| Palmaire | Petit | 3,8 \pm 0,3 | Terminale | Petit | 3,7 \pm 0,3 |
| | Grand | 3,5 \pm 0,3 | | Grand | 3,7 \pm 0,3 |
| Latérale | Petit | 3,6 \pm 0,3 | Crochet | Petit | 3,9 \pm 0,1 |
| | Grand | 3,8 \pm 0,3 | | Grand | 4,0 \pm 0,0 |

TABLE 3.1: Scores médian moyennes des microgestes par **préhension** avec un **IC** à 95%

les autres participants ne le peuvent pas non plus. En revanche, il semble qu'il y ait une influence pour **Sphérique Grand**. L'objet **Sphérique Grand** est censé être tenu entre les doigts et la paume sans avoir besoin du pouce. Cependant, 4 participants sur 6 (P2, P8, P19, P20), dont la longueur de la main est inférieure à 16,5 cm, ont eu besoin du pouce pour tenir l'objet correctement. Ces participants n'ont pas pu réaliser les microgestes avec le pouce dans ce contexte. Cependant, 2 participants sur 6 (P9, P15), dont la longueur de la main est également inférieure à 16,5 cm, ont pu effectuer les microgestes avec le pouce dans ce contexte. Ainsi, la taille de la main peut avoir un impact sur la faisabilité des microgestes selon que les utilisateurs peuvent tenir l'objet avec ou sans le pouce.

De même, nous n'avons pas remarqué d'impact sur les scores de Likert (**Figure 3.8**), puisque chaque intervalle de confiance recoupe les autres de plus d'un quart de leur longueur.

3.3.2.2 Surface

En règle générale, un doigt déjà en contact avec l'objet effectuera de préférence, voire exclusivement, les microgestes sur l'objet, sinon sur la main. Cela est surprenant pour **Cylindrique Petit** et les deux contextes **Crochet**. Dans ces contextes, le pouce peut bouger librement et atteindre facilement les autres doigts en faisant le tour de l'objet. Nous nous attendions à ce que les participants **tap/press** sur le pouce pour les microgestes avec la phalange haute, car nous pensions que le pouce était plus facile à atteindre que l'objet. Puisque la majorité des microgestes devaient être effectués sur l'objet, car le pouce n'était pas accessible/mobile, nous pensons que les utilisateurs ont effectué tous les microgestes sur l'objet par habitude. Sur la base de ces résultats, pour les études de microgestes pour des objets spécifiques où les actionneurs sont déjà en contact avec l'objet, nous recommandons d'augmenter l'objet plutôt que d'équiper les utilisateurs de dispositifs captation et de reconnaissance comme un gant.

3.3.2.3 Impact de la **préhension** sur les microgestes

Globalement, les **IC** suggèrent que la **préhension** a un effet sur la facilité à effectuer un microgeste (Table 3.1).

Sur la base de la taxonomie GRASP, nous étudions plus précisément l'impact de la **préhension** sur la faisabilité d'un microgeste en considérant 4 catégories : *gravité*, *paume*, *pouce* et *mixte*. Ces catégories sont construites sur le concept de **Doigt Virtuel (DV)**, c.-à-d. des unités d'une ou plusieurs parties de la main qui appliquent des forces dans la même direction [2, 58], pour réaliser les **préhensions**. Une **préhension** est, à l'exception de la catégorie *gravité*, composée d'au moins deux **DV**. Dans la taxonomie GRASP, les auteurs ont créé un tableau décrivant les **DV** pour 47 **préhensions** de la littérature [39]⁴.

Pour les **préhensions** *gravité*, il n'y a pas de **DV** car l'objet repose sur la main. Nous n'avons testé qu'une version où l'objet repose sur quatre doigts : **Crochet Petit** et **Crochet Grand**. Dans ces contextes, tous les microgestes sont réalisables avec facilité ($4,0 \pm 0$, $n = 21$). Toutefois, pour pouvoir effectuer un **press** avec les doigts, le pouce doit se trouver sur l'objet en opposition à l'actionneur.

Pour les **préhensions** *paume*, l'objet est tenu entre la paume (**DV1**) et un ou plusieurs doigts (**DV2**). C'est le cas pour **Cylindrique Petit**, **Cylindrique Grand** et **Sphérique Grand**. Dans ces contextes, tout est réalisable avec facilité ($3,9 \pm 0,2$, $n = 21$).

Pour les **préhensions** *pouce*, l'objet est tenu entre le pouce (**DV1**) et un groupe d'un ou plusieurs doigts (**DV2**). C'est le cas pour **Palmaire Petit**, **Palmaire Grand**, **Terminale Petit** et **Terminale Grand**. Les microgestes du pouce sont impossibles à réaliser à l'exception d'un **press** de la phalange en contact avec l'objet, ici la phalange haute. S'il n'y a qu'un seul doigt dans **DV2**, comme dans les **préhensions** **Petit**, les microgestes avec ce doigt sont impossibles à l'exception d'un **press** de la phalange en contact avec l'objet, ici la phalange haute.. Autrement, tous les microgestes restants peuvent être effectués avec les doigts autres que le pouce. D'après les **Intervalle de Confiance**, il ne semble pas y avoir de différence dans la facilité des microgestes entre les **préhensions** *pouce* ($3,5 \pm 0,3$, $n = 18$) et les **préhensions** *paume* ($3,9 \pm 0,2$, $n = 21$).

Selon la taxonomie GRASP, **Sphérique Petit** est une **préhension** *pouce* où le pouce (**DV1**) s'oppose aux quatre autres doigts (**DV2**). Cependant, les microgestes du pouce ont été possibles avec l'objet **Sphérique Petit**. En effet, les utilisateurs tenaient l'objet avec le pouce en opposition aux quatre autres doigts, mais lorsqu'ils devaient effectuer des microgestes avec le pouce, ils écartaient leur doigt sur l'objet et le tenaient uniquement entre l'index et l'auriculaire. Comme cela correspond encore à la définition de la **préhension** « Sphérique » de la taxonomie de Schlesinger, nous avons laissé les utilisateurs agir de la sorte. Au final, **Sphérique Petit** est une **préhension** avec deux paires de **DV**, pouce/majeur-annulaire et index/auriculaire. Dans le cas où il y a plusieurs paires de **DV**, tous les microgestes sont faisables.

Pour les **préhensions** *mixte*, la **préhension** partage certaines propriétés entre les **préhensions** *pouce* et *paume*. Elle inclut également toute **préhension** qui n'entre pas

4. http://grasp.xief.net/documents/taxonomy_comparison.pdf

dans les trois premières catégories. Nous n'avons testé que la **préhension Latérale** et en raison de l'énorme variabilité entre les **préhensions** de ce groupe, p. ex. une **préhension** pour tenir des baguettes chinoises ou une **préhension** pour tenir une cigarette [39], nous recommandons de ne pas généraliser les résultats de la **préhension Latérale** aux autres **préhensions** du groupe. Néanmoins, avec ces deux **préhensions Latérale**, les microgestes du pouce et de l'index ne sont pas possibles à l'exception de **press**.

3.4 Étude conceptuelle de la faisabilité des microgestes

Déterminer la faisabilité des microgestes dans différents contextes nécessite la mise en place d'une étude, ce qui peut être fastidieux et coûteux en termes de temps et d'effort. Dans cette section, nous conceptualisons avec le concept de **DV** les résultats de notre étude utilisateur pour établir un ensemble de règles constituant une approche prédictive pour déterminer si un microgeste est faisable ou non dans un contexte donné, sans avoir besoin de conduire une étude utilisateur.

3.4.1 Règles de faisabilité des microgestes

Grâce à une analyse des **DV** dans un contexte, nous proposons une approche systématique pour déduire si une combinaison contexte \times microgeste est faisable ou non.

Tout d'abord, par définition d'une **préhension** dans la taxonomie GRASP,

Règle 1 : une **préhension**, autres que les **préhensions gravité**, doivent avoir au moins deux **DV** au cours d'un microgeste.

Deuxièmement, en examinant les microgestes impossibles pour les **préhensions pouce**, il semble que si un doigt est seul dans un **DV**, il ne peut que réaliser un **press** de la phalange en contact avec l'objet. En revanche, si au moins deux doigts se trouvent dans le même **DV**, tous les microgestes sont possibles avec chacun de ces doigts. Nous en déduisons les deux règles suivantes.

Règle 2 Un **DV**, doit, à tout instant, comporter au moins un doigt qui ne se déplace pas sur ou hors d'une surface pendant un microgeste.

Règle 3 Un doigt seul dans un **DV**, ne peut effectuer que des **press** avec les phalanges qui sont déjà en contact avec l'objet.

3.4.2 Règles de faisabilité des microgestes en μ Glyphe

Pour faciliter l'utilisation des règles présentées, nous souhaitons disposer d'une représentation visuelle. Pour ce faire, nous utilisons notre notation pour les microgestes μ Glyphe. En utilisant la notation μ Glyphe et en ajoutant de simples indices numériques, nous pouvons représenter visuellement les **DV**. Chaque indice représente une unité **DV**. Ces indices **DV** ne peuvent être utilisés que pour un doigt en contact avec une surface qui ne bouge pas sur ou hors de l'objet, c.-à-d. un

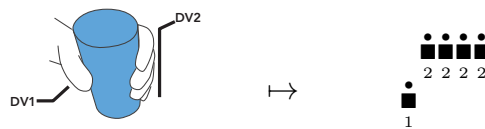
| | Cylindrique | Sphérique | Palmaire | Latéral | Terminal | Crochet |
|-------|-------------|-----------|----------|---------|----------|---------|
| Petit | | | | | | × |
| Grand | | | | | | × |

TABLE 3.2: Représentation visuelle des DV pour les préhensions. L'analyse des DV provient de la taxonomie GRASP [39]. La préhension Crochet n'a pas de DV puisque l'objet n'est pas tenu mais repose sur la main grâce à la gravité [39].

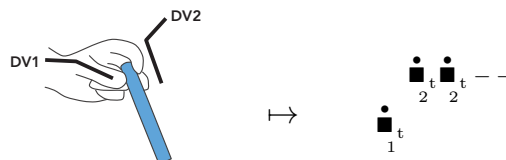
| Tap | Press | Swipe vers l'intérieur | Swipe vers l'extérieur | Extension |
|-----|-------|------------------------|------------------------|-----------|
| | | | | |

TABLE 3.3: Descriptions μ Glyphe des microgestes étudiés, x étant soit le pouce, l'index ou le majeur et y étant soit la phalange haute, soit la phalange mob.

doigt dont le contexte est \bullet . En utilisant μ Glyphe et ces indices DV, nous pouvons représenter une préhension où une personne tient une tasse entre son pouce et ses autres doigts de la manière suivante :



Nous utilisons les glyphes *pas de mouvement* + *contact* (\blacksquare_x) avec un indice numérique x représentant un DV. Pour être plus précis, nous pouvons, avec μ Glyphe, spécifier quelle phalange particulière du doigt est en contact avec un objet. Par exemple, un stylo tenu avec les phalanges hautes (glyphe t) du pouce, de l'index et du majeur peut être représenté par :



En utilisant cette notation μ Glyphe étendue aux DV, les Table 3.2 et Table 3.3 résument tous les contextes et microgestes étudiés. Pour chaque préhension, nous avons utilisé l'analyse des DV proposée dans la taxonomie GRASP [39]⁵.

5. http://grasp.xief.net/documents/taxonomy_comparison.pdf

En utilisant cette notation, les règles mentionnées précédemment peuvent être réécrites comme suit :

Règle 1 : il doit y avoir au moins deux indices DV différents dans la description μ Glyphe de la combinaison contexte \times microgeste pour qu'elle soit réalisable.

Règle 2 : un DV doit avoir un doigt dont le contexte μ Glyphe (c.-à-d. l'exposant du glyphe) est \bullet .

Règle 3 : si un doigt est seul dans son DV, il ne peut effectuer que des microgestes qui peuvent être décrits par $\overset{\bullet}{-}_x$, avec x une phalange déjà en contact avec l'objet. Dans notre cas, un tel doigt ne peut qu'effectuer un **press** ($\overset{\bullet}{\nabla}$; $\overset{\bullet}{\blacktriangle}$).

3.4.3 Application des règles

En utilisant ces règles et en combinant les expressions μ Glyphe d'un contexte et d'un microgeste, nous pouvons déduire si une combinaison est faisable ou non. Par exemple, le microgeste **tap** de la phalange haute du pouce dans le contexte **Palmaire Grand**, est représentée comme suit :

$$\begin{array}{c} \overset{\bullet}{\blacksquare}_t \overset{\bullet}{\blacksquare}_t \text{--} \\ \overset{\bullet}{\blacksquare}_t \\ 1_t \end{array} \text{ (Palmaire Grand)} + \overset{\circ}{\nabla}_t ; \overset{\circ}{\blacktriangle}_t \text{ (Tap)} \mapsto \overset{\circ}{\nabla}_t \overset{\bullet}{\blacksquare}_t \overset{\bullet}{\blacksquare}_t \text{--} ; \overset{\circ}{\blacktriangle}_t \overset{\bullet}{\blacksquare}_t \overset{\bullet}{\blacksquare}_t \text{--}$$

Comme il ne reste qu'un seul DV, l'objet tombera. Cependant, un **tap** de la phalange haute de l'index dans le contexte **Palmaire Grand**, est représentée comme suit :

$$\overset{\circ}{\nabla}_t \overset{\bullet}{\blacksquare}_t \text{--} ; \overset{\circ}{\blacktriangle}_t \overset{\bullet}{\blacksquare}_t \text{--}$$

$$\overset{\bullet}{\blacksquare}_t \quad ; \quad \overset{\bullet}{\blacksquare}_t \\ 1_t \quad \quad 1_t$$

Comme il reste deux DV, nous considérons un **tap** de la phalange haute de l'index comme faisable dans le contexte **Palmaire Grand**.

La [Figure 3.9](#) résume les résultats de cette analyse conceptuelle de la faisabilité de toutes les combinaisons de contexte \times microgeste étudiés.

| Préhension | Taille | Tap | | | | | | Press | | | | | |
|-------------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | | Pouce | | Index | | Majeur | | Pouce | | Index | | Majeur | |
| | | M ou B | Haute | M ou B | Haute | M ou B | Haute | M ou B | Haute | M ou B | Haute | M ou B | Haute |
| Main Libre | | | | | | | | | | | | | |
| Cylindrique | Petit | | | | | | | | | | | | |
| | Grand | | | | | | | | | | | | |
| Sphérique | Petit | ● | ● | | | | | ● | | | | | |
| | Grand | | | | | | | | | | | | |
| Palmaire | Petit | | | | | | | | | | | | |
| | Grand | | | | | | | | | | | | |
| Terminale | Petit | | | | | | | | | | | | |
| | Grand | | | | | | | | | | | | |
| Latérale | Petit | | | | | | | ● | | ● | | | |
| | Grand | | | | | | | ● | | ● | | | |
| Crochet | Petit | | | | | | | | | | | | |
| | Grand | | | | | | | | | | | | |

| Préhension | Taille | Extension | | | Swipe | | | | | | | |
|-------------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|--|--|
| | | Pouce | Index | Majeur | Pouce | | Index | | Majeur | | | |
| | | Extérieur | Intérieur | Extérieur | Intérieur | Extérieur | Intérieur | Extérieur | Intérieur | | | |
| Main Libre | | | | | | | | | | | | |
| Cylindrique | Petit | | | | | | | | | | | |
| | Grand | | | | | | | | | | | |
| Sphérique | Petit | ● | | | ● | ● | | | | | | |
| | Grand | | | | | | | | | | | |
| Palmaire | Petit | | | | | | | | | | | |
| | Grand | | | | | | | | | | | |
| Terminale | Petit | | | | | | | | | | | |
| | Grand | | | | | | | | | | | |
| Latérale | Petit | | | | | | | | | | | |
| | Grand | | | | | | | | | | | |
| Crochet | Petit | | | | | | | | | | | |
| | Grand | | | | | | | | | | | |

FIGURE 3.9: Faisabilité conceptuelle des microgestes pour chaque contexte. Les cases noires représentent les combinaisons contexte × microgeste conceptuellement impossibles. Les symboles verts ●, et bleus ●, représentent les limites du modèles : respectivement analyse incorrecte des DV et changement de DV. Étant donné que le contexte du Crochet ne peut pas être représenté par des DV car l'objet est maintenu dans la main grâce à la gravité, nous en déduisons que tous les microgestes sont réalisables. De même, nous en déduisons que tous les microgestes sont réalisables avec la main libre.

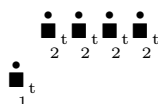
3.4.4 Validation de l'approche

Pour valider cette approche, nous comparons les résultats de cette étude conceptuelle (Figure 3.9), avec les résultats de notre étude empirique (Figure 3.4).

Sur les 273 combinaisons de contexte × microgeste prédites dans l'analyse conceptuelle, 263 sont conformes aux résultats empiriques (96%). Les 11 combinaisons restantes correspondent à des combinaisons identifiées conceptuellement impossibles, qui ont pourtant été réalisées. Ces combinaisons incorrectes ne concernent que trois contextes : Sphérique Petit et les deux contextes Latéral.

3.4.5 Limites des règles

Analyse incorrecte des DV Comme expliqué dans les résultats de l'étude empirique, les utilisateurs ajustent leur **préhension** avec l'objet Sphérique Petit pour réaliser les microgestes. Dans les faits, les utilisateurs ont légèrement déplacé leur index et leur petit doigt sur la sphère pour effectuer des microgestes avec le pouce (voir Figure 3.10A). Cette variante observée modifie l'analyse des DV de



à la variante de la **préhension** avec 4 DV :



où DV1 est opposé à DV2 tandis que DV3 est opposé à DV4. Dans cette variante, le pouce peut quitter l'objet puisque les DV3 et DV4 peuvent tenir l'objet seul. En tenant compte de cette nouvelle analyse des unités de DV pour le contexte Sphérique Petit, une nouvelle analyse conceptuelle prédit correctement la faisabilité ou non de 99 % des combinaisons (269 / 273) (Figure 3.9).

Changement de DV Dans les deux contextes Latérale, deux microgestes étaient effectivement réalisables : **press** de la phalange **mob** du pouce et **press** de la phalange **mob** de l'index. Le **press** de la phalange **mob** du pouce a été effectué en déplaçant la force de la phalange haute vers la phalange **mob** du pouce, de ce fait, déplaçant DV1 de la phalange haute du pouce vers la phalange **mob** du pouce (Figure 3.10B). Le **press** de la phalange **mob** de l'index était effectué en inclinant le pouce sur l'objet pour qu'il passe de la phalange haute de l'index à la phalange **mob** de l'index, déplaçant ainsi le DV2 de la phalange haute de l'index à la phalange **mob** de l'index. Par conséquent, dans les deux cas, les participants ont réussi à modifier pendant un bref instant leur DV sans lâcher l'objet.

Les DV peuvent déplacer l'objet Nos règles considèrent que les DV ne peuvent pas se déplacer sur ou hors de l'objet, ce qui implique que le doigt doit être statique. Cependant, dans les contextes Palmaire Petit et Terminale

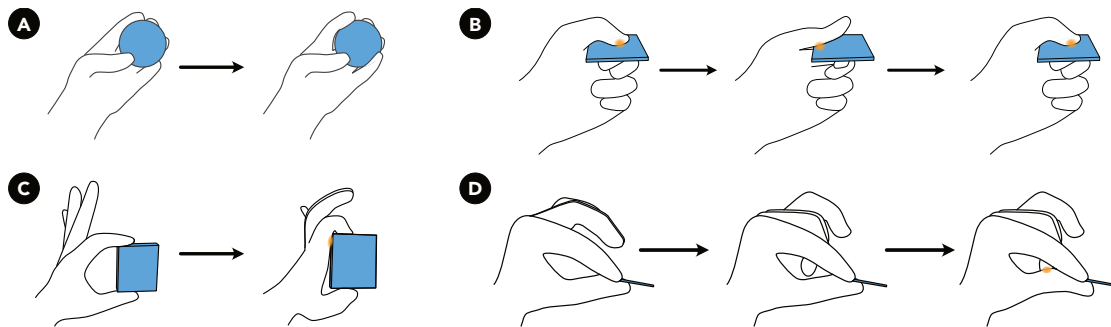


FIGURE 3.10: Illustrations des limites de notre modèle prédictif sur la faisabilité des microgestes. A) participant tenant l'objet **Sphérique Petit** avec son index et son petit doigt sur les côtés de l'objet pour effectuer des microgestes avec le pouce. B) participant déplaçant leur **DV** de la phalange haute du pouce à la phalange **mob** du pouce, ce qui leur permet d'effectuer un **press** sur la phalange **mob** du pouce dans les deux contextes **Latéral**. C) participant déplaçant l'objet pour **tap** sur la phalange **mob** de l'index avec l'objet. D) participant déplaçant le majeur pour **tap** sur celui-ci avec le pouce.

Petit, certains participants ont réussi à effectuer un **tap** de la phalange **mob** de l'**index** en déplaçant l'objet sur la phalange **mob** (Figure 3.10C). Ainsi, les doigts dans un **DV** sont statiques par rapport à l'objet, mais ils peuvent déplacer l'objet pour atteindre d'autres parties de la main. Néanmoins, il s'agit d'une minorité de participants qui ont toujours essayé de trouver un moyen d'effectuer le microgeste.

Les doigts qui ne sont pas l'actionneur peuvent bouger Les règles prennent en compte que le doigt d'un **DV** et l'actionneur. Cependant, dans les contextes **Terminale Petit** et **Palmaire Petit**, pour effectuer des microgestes avec le pouce, les participants ont approché un doigt du pouce, p. ex. le majeur ou l'annulaire, puis ont déplacé le pouce tout en tenant l'objet pour effectuer le microgeste (Figure 3.10D). Comme pour la limitation précédente, cela représente une minorité de participants.

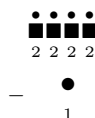
Par conséquent, l'analyse conceptuelle semble raisonnablement pertinente et modélise le comportement moyen observé lors de l'étude empirique, y compris pour les combinaisons contexte \times microgeste mentionnées ci-dessus.

3.5 Discussions

3.5.1 Utiliser une analyse des **DV** plutôt que des **préhensions**

Nous avons étudié les microgestes dans différents contextes de **préhension**. Cependant, nous notons au travers de notre analyse des **DV** que nous sommes parvenus à des résultats similaires entre les **préhensions** ayant la même configuration de **DV**. Par exemple, **Palmaire Petit** et **Terminale Petit**, ou **Palmaire Grand** et **Terminale Grand**, partagent les mêmes microgestes impossibles à réaliser ainsi que des scores de facilité d'exécution similaires. La seule exception est le contexte

Sphérique Grand pour qui les microgestes sont plus difficiles à effectuer (Likert $3,7 \pm 0,2$) que les deux contextes **Cylindrique** (Likert $4,0 \pm 0,0$ pour **Cylindrique Petit** et $3,9 \pm 0,2$ pour **Cylindrique Grand**). Cependant, nous faisons l’hypothèse que cette différence est liée à la taille de l’objet **Sphérique Grand**. En effet, l’objet étant trop grand pour certains participants, ces participants ont adapté leur configuration réelle de **DV** en



en lieu et place de la configuration théorique



Au final, pour une même disposition de **DV**, les résultats sont similaires, alors que pour une même **préhension**, les résultats peuvent varier en fonction de la taille des objets, c.-à-d. **Palmaire Grand** vs **Palmaire Petit**, ou de la taille des mains, c.-à-d. **Sphérique Grand** pour des mains plus petites vs plus grandes. Par conséquent, au lieu d’analyser des microgestes pour chaque **préhension** de la taxonomie de Schlesinger ou de la taxonomie GRASP, une approche d’analyse pourrait consister à étudier différentes dispositions de **DV**. Ceci est d’autant plus important lors de l’étude d’un objet spécifique, puisqu’un même objet peut être tenu avec différentes dispositions de **DV**.

3.5.2 Étudier des objets spécifiques

Un stylo peut être tenu avec la **préhension Terminale Grand** mais cette **préhension** peut facilement être adaptée en **Cylindrique Petit**. Cependant, alors que dans le contexte **Cylindrique Petit** tous les microgestes sont réalisables avec facilité (4 ± 0 , $n = 21$), dans le contexte **Terminale Grand**, 6/21 microgestes sont impossibles et ceux restants sont plus difficiles à réaliser ($3,6 \pm 0,2$, $n = 15$), **Proportion de chevauchement (PDC)** = -0,1. Ainsi, avec un stylo, un utilisateur pourrait être tenté de modifier sa **préhension** afin d’accéder facilement à davantage de commandes. Cependant, la question de savoir quand et pourquoi un utilisateur change de **préhension** pour effectuer des microgestes reste ouverte. Une première réponse peut être trouvée dans le travail de Song et coll. [106] dans lequel les auteurs considèrent les **prévisions** comme une entrée en combinaison avec les microgestes. Dans ce cas, les utilisateurs modifient leur **préhension** d’un stylo pour accéder à différents modes.

3.5.3 Distinguer une phalange dans un contexte de main occupée

Nos études sont les premières à étudier les phalanges dans un contexte de **préhension**. Nos études suggèrent que distinguer les phalanges pour un **tap** et un

[press](#) est faisable en distinguant deux phalanges : la phalange haute et la phalange [mob](#). Ainsi, il est possible d'étudier des propriétés des microgestes en main occupée plus précises, comme cela est fait pour les microgestes en main libre.

Cependant, l'ensemble de microgestes étudié dans ce chapitre n'est pas compatible avec nos 13 contextes, c.-à-d. que chaque microgeste n'est pas faisable avec chaque contexte. Dans le chapitre d'ouverture suivant, nous explorons différentes possibilités pour concevoir un ensemble qui soit cohérent, c.-à-d. que tous les microgestes de cet ensemble sont faisables dans tous les contextes de [préhension](#).

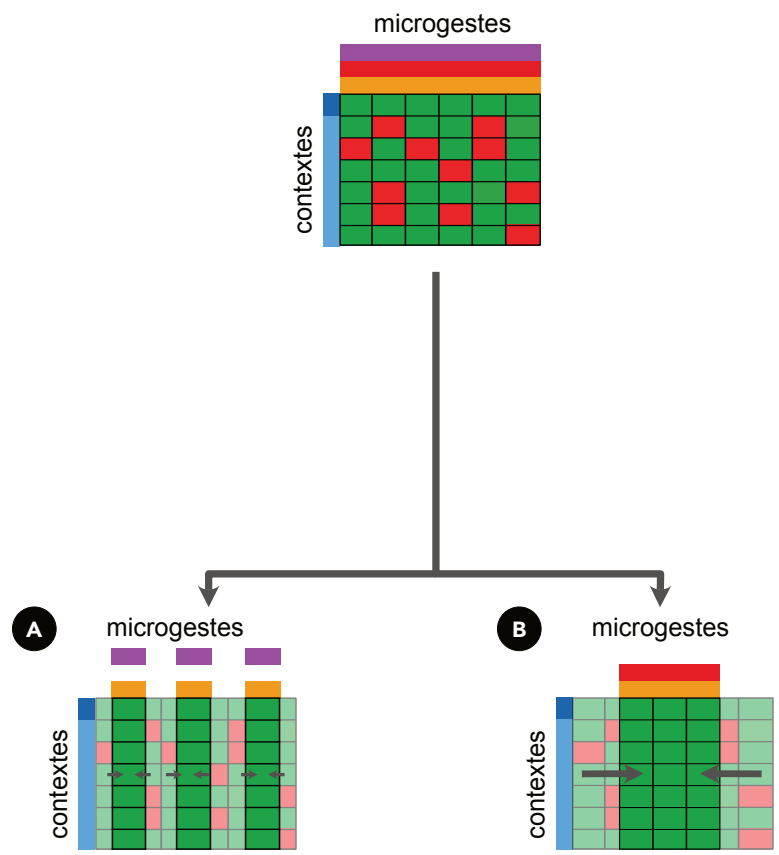


FIGURE 4.1: Conception d'ensembles compatibles avec un grand nombre de contextes à partir des résultats du chapitre précédent. **A)** Conception en se focalisant sur l'action du microgeste. **B)** Conception en se focalisant sur l'actionneur du microgeste.

Chapitre 4

Vers des microgestes faisables en contextes main libre et main occupée

Comme le montre la [Figure 3.4](#), l'ensemble de microgestes étudiés n'est pas compatible avec tous les contextes de [préhension](#) considérés.

Dans ce qui suit, en partant de l'ensemble de microgestes étudiés dans le chapitre précédent, nous explorons les moyens de créer un ensemble compatible avec tous nos contextes tout en visant à maintenir une expressivité forte ([Figure 4.1](#)). Pour faciliter l'exploration, nous considérons seulement 2 des 5 actions étudiées précédemment : le [press](#), car il s'agit du seul microgeste réalisable avec tous les doigts dans chaque [préhension](#), et le [tap](#), car il s'agit du microgeste le plus courant dans la littérature. Ainsi, notre ensemble de départ comporte 12 microgestes : 2 actions ([tap](#), [press](#)) \times 3 actionneurs (pouce, index, majeur) \times 2 zone de l'actionneur (phalange haute, phalange [médiane ou basse \(mob\)](#)).

Comme le montre la littérature [[102](#)], cet ensemble n'est pas compatible en considérant ensemble les actions et les actionneurs. Ainsi, nous explorerons deux approches, inspirées de la littérature [[103](#), [99](#)] : se concentrer sur les actions et se concentrer sur les actionneurs.

Cependant à la différence des études existantes, pour ces deux approches, nous considérons la zone de l'actionneur en distinguant la phalange haute et la phalange [mob](#). Grâce à cette distinction, nous doublons l'expressivité potentielle, c.-à-d. le nombre de microgestes dans l'ensemble à définir de microgestes compatibles avec tous les contextes.

4.1 Ensemble basé sur l'action

Sharma et coll. [[103](#)] ont fixé des actions ([tap](#), [press](#), [swipe](#), extension et dessiner) et n'ont pas fait de distinction entre les actionneurs réalisant ces actions. Ils ont ainsi pu définir un ensemble de microgestes compatibles avec toutes les [prévisions](#) de la taxonomie de Schlesinger. En effet, pour une même [préhension](#), chaque microgeste peut être réalisé par différents actionneurs ou combinaisons d'actionneurs. Par exemple, en tenant une tasse ([Cylindrique Grand](#)), un [tap](#) peut être effectué par

| Préhension | Taille | Tap | | Press | | Échelle |
|-------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | M ou B | Haute | M ou B | Haute | |
| Main Libre | | 4 p i m | 4 p i m | 4 p i m | 4 p i m | |
| Cylindrique | Petit | 4 p i m | 4 p i m | 4 p i m | 4 p i m | |
| | Grand | 4 i m | 4 p i m | 4 p i m | 4 p i m | |
| Sphérique | Petit | 3.5 m | 4 i m | 3 i m | 4 p i m | |
| | Grand | 4 i m | 4 i m | 4 m | 4 p i m | |
| Palmaire | Petit | 3 m | 4 m | 3 m | 4 p i m | |
| | Grand | •4 m | 4 i | •3 m | 4 p i m | |
| Terminale | Petit | •3 m | 4 m | 3 m | 4 p i m | |
| | Grand | 4 m | 4 i m | 3 i m | 4 i m | |
| Latérale | Petit | 3 m | 4 m | 3 m | 4 p m | |
| | Grand | 3 m | 4 m | 3 m | 4 p m | |
| Crochet | Petit | 4 p i m | 4 p i m | 4 i | 4 p i m | |
| | Grand | 4 p i m | 4 p m | 4 p i m | 4 p i m | |

FIGURE 4.2: Score médian de Likert (échelle de 1-difficile à 4-facile) de l'ensemble basé sur l'action. Le(s) meilleur(s) actionneur(s) pour chaque microgeste est (sont) représenté(s) sur le côté de la cellule. p : pouce. i : index. m : majeur. Les cellules avec un symbole • correspondent aux combinaisons contexte × microgeste qui ont été jugées infaisables par au moins un participant de l'étude expérimentale.

le pouce tandis qu'un **press** peut être effectué par l'index, le majeur, l'annulaire et l'auriculaire simultanément. Par conséquent, si nous considérons uniquement les actions **tap** et **press**, l'ensemble résultant comporte 2 microgestes.

Dans notre cas, en considérant les deux zones de l'actionneur, nous obtenons l'ensemble : 2 actions (**tap**, **press**) × 2 zone de l'actionneur (phalange haute, phalange **mob**). Tous les microgestes sont compatibles avec tous les contextes puisqu'il existe toujours au moins un actionneur qui n'est pas seul dans un **Doigt Virtuel (DV)** (Règle 2 & 3 de la sous-section 3.4.1). En partant des résultats de l'étude expérimentale dans le chapitre précédent (Figure 3.5), la Figure 4.2 présente le score de Likert médian pour chaque combinaison contexte × microgeste, en indiquant le(s) meilleur(s) actionneur(s) pour chaque combinaison. Le score médian moyen de Likert de cet ensemble est de $3,8 \pm 0,1$. Ainsi, en considérant les actions et les zones de l'actionneur, nous obtenons un ensemble de 4 microgestes compatibles avec tous les contextes.

4.2 Ensemble basé sur l’actionneur

Saponas et coll. [99] se sont concentrés sur quatre actionneurs (index, majeur, annulaire et auriculaire) et n’ont pas considéré de distinction entre les actions **tap** et **press**. En s’inspirant de leur méthode, si nous ne prenons pas en compte l’action effectuée, mais gardons les distinctions entre les actionneurs et entre les surfaces, nous obtenons l’ensemble : 3 actionneurs (pouce, index, majeur) \times 2 zone de l’actionneur (phalange haute, phalange **mob**).

Dans cet ensemble, la phalange **mob** n’est pas compatible avec les contextes **Palmaire** et **Terminale** où un actionneur seul dans un **DV** n’a que la phalange haute en contact avec l’objet (Règle 3 de la sous-section 3.4.1). En partant des résultats de l’étude expérimentale dans le chapitre précédent (Figure 3.5), la Figure 4.3 présente le score de Likert médian pour chaque combinaison contexte \times microgeste, en indiquant le(s) meilleur(s) action(s) pour chaque combinaison. Le score médian moyen de Likert de l’ensemble est de $3,8 \pm 0,1$. Ainsi, en considérant les actionneurs et les zones de l’actionneur, nous obtenons un ensemble de 6 microgestes dont 3 sont compatibles avec l’ensemble des contextes (phalange haute du pouce, de l’index et du majeur), 2 sont compatibles avec 11 / 13 contextes (phalange **mob** de l’index et du majeur) et 1 est compatible avec 9 / 13 contextes (phalange **mob** du pouce).

En intégrant l’idée de combinaison d’actionneurs introduite dans la méthode précédente par Sharma et coll. [103], et qui est ancrée dans la littérature microgeste main libre [18], nous pouvons augmenter l’expressivité de notre ensemble basé sur l’actionneur. Nous proposons donc d’ajouter un microgeste effectué simultanément par l’ensemble des actionneurs : un **tap** (ou **press**) simultanément des phalanges hautes de l’index et du majeur. Nous obtenons donc un ensemble final de 7 microgestes dont 4 compatibles avec tous contextes, 2 sont compatibles avec 11 / 13 contextes et 1 est compatible avec 9 / 13 contextes.

Avant de pouvoir utiliser ces ensembles et d’étudier les propriétés des microgestes les composant, nous devons avant toute chose identifier un système de captation et de reconnaissance capable de détecter l’action (c.-à-d. contact, pression, flexion et extension des doigts), ainsi que l’actionneur et la surface qui sont associés à un microgeste. Dans la prochaine partie de ce manuscrit, nous présentons un état de l’art de ces systèmes, ainsi que les systèmes que nous avons conçus et construits.

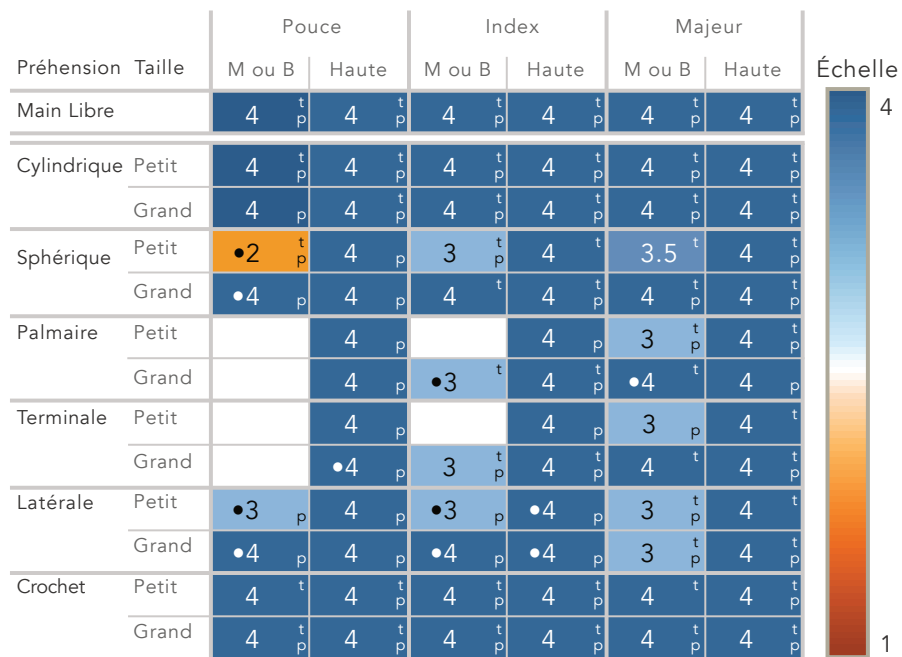


FIGURE 4.3: Score médian de Likert (échelle de 1-difficile à 4-facile) de l'ensemble basé sur l'actionneur. La meilleure action est représentée sur le côté de la cellule. Les données sont tirées de la Figure 3.5. t : tap. p : press. Les cellules avec un symbole ● correspondent aux combinaisons contexte × microgeste qui ont été jugées infaisable par au moins un participant de l'étude expérimentale.

Deuxième partie

Conception et Évaluation des Systèmes de Captation et de Reconnaissance

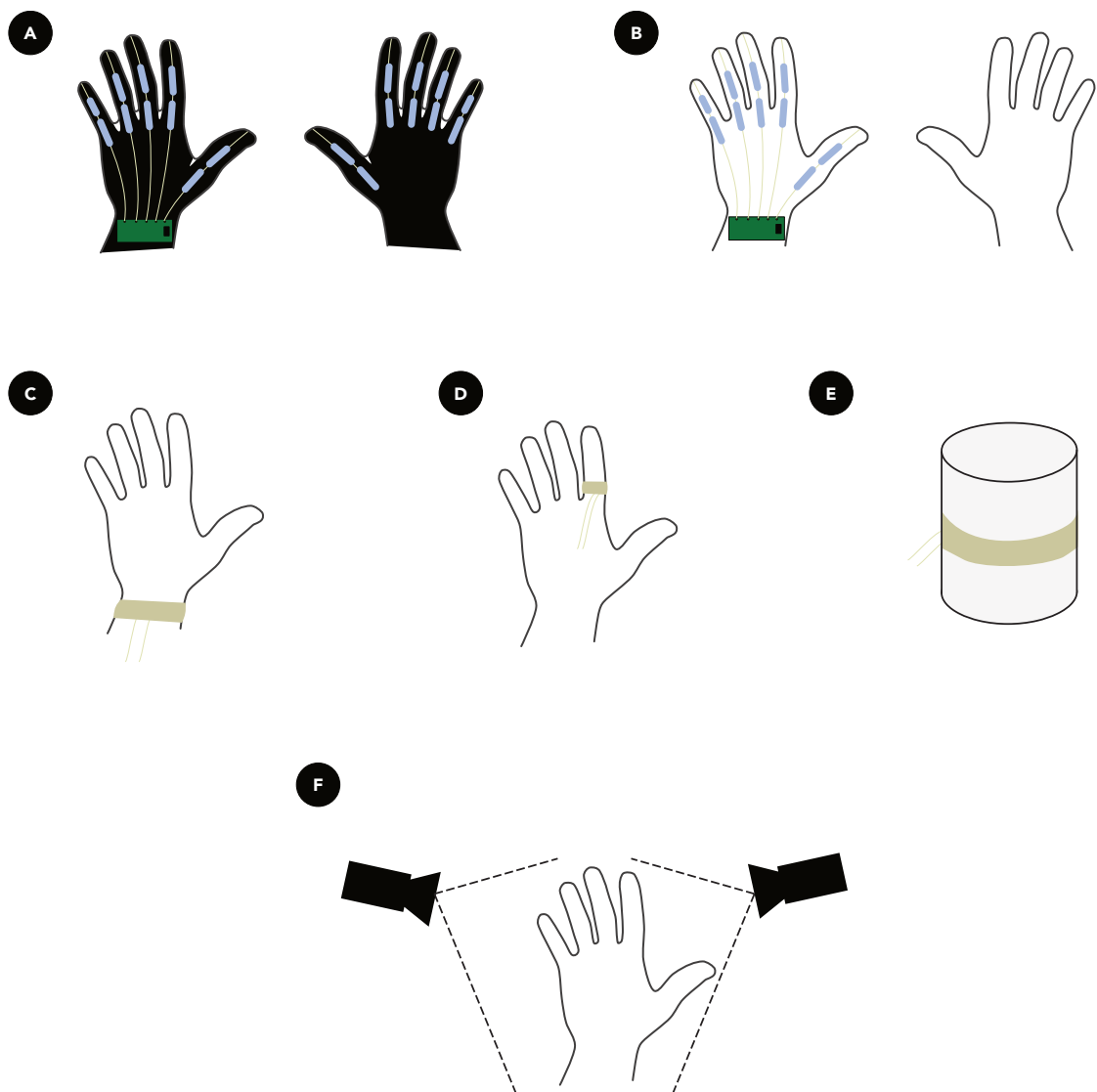


FIGURE 5.1: Différentes formes de systèmes de captation pour les microgestes. **A)** Gant. **B)** Exo-squelette. **C)** Bracelet. **D)** Bague. **E)** Objet augmenté. **F)** Caméra externe.

Chapitre 5

Systemes existants de captation et reconnaissance

Après l'exploration des possibles, nous pouvons désormais nous pencher sur la conception de systèmes de captation et de reconnaissance de microgestes. Lors de la conception de tels systèmes, trois choix doivent être faits : 1) le type de capteur utilisé, 2) l'endroit et la manière de positionner les capteurs, 3) le type de reconnaisseur utilisé.

5.1 Types de capteurs

Nous décrivons les principaux types de capteurs utilisés pour capter des microgestes. Pour chaque capteur, nous fournissons une description de son fonctionnement et nous citons des articles qui l'utilise dans leurs études des microgestes. Nous identifions deux catégories de capteurs : ceux qui détectent un symbole μ Glyphe et ceux qui détectent une expression μ Glyphe, c.-à-d. un assemblage et/ou séquence de symboles.

5.1.1 Capteurs de symboles μ Glyphe

Ces capteurs permettent de détecter les symboles de la notation μ Glyphe. La majorité de ces capteurs sont de trois types : les potentiomètres, les condensateurs variables et les capteurs piézoélectriques. Ils transforment une force exercée sur le capteur (pression, flexion, etc.) respectivement en une variation de résistance électrique, en une variation de capacité et en une charge de courant électrique. De manière générale, le potentiomètre est le type de capteur le plus courant et le plus simple à utiliser.

Dans la suite, nous donnons les symboles de la notation μ Glyphe pouvant être reconnu par le capteur. Ces symboles sont décrits dans la [section 2.2](#) et sont résumés dans la fiche de lecture (page 169).

Capteur de flexion Ce type de capteur peut détecter la courbure d'une

articulation. Il existe sous trois formes : potentiomètre flexible [117]¹, condensateur variable [30] ou une combinaison fibre optique/LED/photorésistance, équivalent à un potentiomètre flexible [40]². Il permet de reconnaître les glyphes de flexion et d'extension (▼, ▲), si le capteur est situé à l'arrière du doigt, et les glyphes d'abduction et d'adduction (◀, ▶), si le capteur est situé entre deux doigts. En outre, il peut être utilisé pour déduire les glyphes décrivant l'amplitude des doigts, p. ex. Op (ouvert), Ha (entrouvert) et Cl (fermé) (sous-section 2.2.3).

Un exemple d'article de la littérature microgeste utilisant ces capteurs est [117].

Capteur extensible Ce type de capteur peut détecter la courbure d'une articulation. Lorsqu'il est placé à l'arrière d'un doigt le capteur s'étire au fur et à mesure que le doigt se ferme. Il existe sous trois formes : potentiomètre extensible^{3 4}, condensateur variable extensible⁵ ou un capteur piézoélectrique [26]. Comme le capteur de flexion, il permet de reconnaître les symboles de flexion et d'extension (▼, ▲), si le capteur est situé à l'arrière du doigt, et les glyphes d'abduction et d'adduction (◀, ▶), si le capteur se trouve entre deux doigts. De même, il permet de déduire les glyphes décrivant l'amplitude du doigt, p. ex. Op (ouvert), Ha (entrouvert) et Cl (fermé) (sous-section 2.2.3).

À notre connaissance, ce type de capteur n'a pas été utilisé dans la littérature microgeste. Il existe cependant un gant commercial permettant de suivre les mouvements de la main⁶.

Capteur de pression Ce type de capteur peut détecter la pression exercée sur une surface. Il existe sous deux formes : potentiomètre⁷ et condensateur variable⁸. Il permet de reconnaître la pression exercée sur une surface, donc les symboles μ Glyphe Lo (faible), Md (moyen) et Hi (élevé) (sous-section 2.2.3). Il permettent aussi de déduire les changements de contextes de *en l'air* à *en contact* (◐◑) et de *en contact* à *en l'air* (◑◐) (sous-section 2.2.1).

Des exemples d'articles de la littérature microgeste utilisant ces capteurs sont [117, 119].

Capteur de contact Ce type de capteur peut détecter un contact avec une surface sans information de pression. Il existe sous deux formes : condensateur variable [37] et interrupteur [36]. Ce type de capteur permet de déduire les changements de contexte de *en l'air* à *en contact* (◐◑) et de *en contact* à *en l'air* (◑◐) (sous-section 2.2.1).

Des exemples d'articles de la littérature microgeste utilisant ces capteurs sont [36, 37, 105].

Capteur de glissement Ce type de capteur peut détecter un glissement sur une surface avec ou sans information de pression. La version de ce capteur sans

1. <https://www.adafruit.com/product/182>

2. <https://www.instructables.com/Optical-Flex-Sensor/>

3. <https://www.adafruit.com/product/519>

4. <https://www.adafruit.com/product/5464>

5. <https://www.materialsampleshop.com/products/stretch-sensor>

6. <https://stretchsense.com/solution/gloves/>

7. <https://www.adafruit.com/product/166>

8. <https://www.singletact.com>

information de pression existe sous deux formes : potentiomètre linéaire⁹ ou une suite de capteurs de contact ou de pression. Pour ce dernier, la précision du capteur dépend du nombre de capteurs de contact utilisés. La version de capteur avec information de pression se retrouve sous deux formes : potentiomètre linéaire [119] ou, potentiellement, une suite de capteurs de pression [117].

Ce type de capteur permet de déduire les changements de contexte de *en l'air* à *en contact* (○●), de *en contact* à *en l'air* (●○) et d'une position *en contact* à une autre (●●) (sous-section 2.2.1). Pour le contexte ●●, suivant le capteur, il est aussi possible de capter la direction du mouvement, à savoir les symboles de mouvements : ▼, ▲, ◀ et ▶ (sous-section 2.2.1).

Des exemples d'articles de la littérature microgeste utilisant ces capteurs sont [36, 119, 117].

5.1.2 Capteurs d'expressions μ Glyphe

Ces capteurs permettent de capter une expression μ Glyphe sans avoir à capter individuellement chaque glyphe qui la compose.

Caméra Nous incluons dans cette catégorie tous les types de caméra (RVB, RVB-D, IR, etc.). L'utilisation de caméra(s) soulève des problèmes liés à l'occultation d'une partie de la main qui serait utile pour reconnaître un microgeste. Par exemple, le pouce peut masquer une partie de l'index selon la position de la caméra par rapport à la main. Ainsi certaines informations sur le microgeste peuvent ne pas être captées. En outre, avec une caméra RVB simple ou avec information de profondeur (RVB-D), il est souvent difficile de détecter correctement le contact entre deux doigts [105].

Des exemples d'articles de la littérature microgeste utilisant ces capteurs sont [105, 79, 102].

Radar Nous incluons dans cette catégorie tous les capteurs qui émettent une onde, qu'elle soit électromagnétique¹⁰ ou acoustique [59], et qui utilisent la réflexion de cette onde par la main et les doigts pour déterminer les microgestes. L'utilisation de radar(s) soulève des problèmes, similaires à une caméra, d'occultation de parties de la main.

Des exemples d'articles de la littérature microgeste utilisant ces capteurs sont [78, 59].

Centrale à inertie Les centrales à inertie¹¹ fournissent des informations sur la position relative des parties de la main les unes par rapport aux autres, ainsi que sur leurs orientations. Elles sont généralement composées de six à neuf capteurs : trois accéléromètres, trois gyromètres et 3 magnétomètres. Les centrales à inertie sont parfois combinées à des aimants qui, en perturbant le champ magnétique des centrales, permettent de capter des microgestes utilisant la pression ou le survol [29].

Des exemples d'articles de la littérature microgeste utilisant ces capteurs sont [104, 29].

9. <https://www.adafruit.com/product/178>

10. <https://atap.google.com/soli/technology/>

11. <https://www.adafruit.com/product/2472>

Acoustique Nous incluons dans cette catégorie tous les types de capteurs qui captent une onde produite par le corps. Si le capteur est fixé sur une surface, il ne peut détecter que les microgestes avec un contact entrant/sortant ou se déplaçant sur cette surface, sans reconnaître l'actionneur [60]. Si le capteur est fixé à la main, il peut, en théorie, détecter tous les microgestes qui ne sont pas effectués exclusivement en l'air [28].

Des exemples d'articles de la littérature microgeste utilisant ces capteurs sont [28, 60].

Bio-impédance Ce type de capteur mesure les changements d'impédance à la surface de la main provoqués par les mouvements de la main [116]. Ce capteur envoie un signal électrique dans la main et lit le signal réfléchi par celle-ci. Lorsqu'un microgeste est effectué, il va perturber le trajet du signal dans la main et pourra ainsi être reconnu.

Un exemple d'article de la littérature microgeste utilisant ces capteurs est [116].

Électromyographie Ce type de capteur capte l'activité musculaire et neuromusculaire lorsqu'un microgeste est effectué.

Des exemples d'articles de la littérature microgeste utilisant ces capteurs sont [98, 99].

5.2 Formes des dispositifs de captation

Nous présentons ici différentes manières de positionner et de fixer les capteurs décrits ci-dessus. Pour les présenter, nous considérons, trois approches, initialement présentées par W. Mackay [82] pour classer les formes de **Réalité Augmentée (RA)**, que nous appliquons ici pour classer les formes de dispositifs de captation de microgestes : 1) Augmentation de l'utilisateur 2) Augmentation de l'objet physique 3) Augmentation de l'environnement autour de l'utilisateur et de l'objet physique.

5.2.1 Augmentation de l'utilisateur

Gants Ils permettent de facilement placer les capteurs sur des zones d'intérêt, telles qu'une phalange ou une articulation spécifique (Figure 5.1A). Les gants, en revanche, réduisent la perception tactile de l'utilisateur en couvrant la surface de la main. Cependant, il est possible de trouver un compromis entre la surface couverte, en utilisant des mitaines, et la quantité de capteurs qui peuvent être attachés aux gants. Dans le commerce, il existe de nombreux gants de données (*dataglove*). L'objectif de ces gants est de reconstituer un modèle de la main à l'aide de capteurs intégrés au gant.

La marque 5DT¹², avec le Data Glove 14 Ultra, utilise des capteurs de flexion. Ces capteurs de flexion sont placés, pour chaque doigt, sur l'articulation entre le doigt et la paume, et sur l'articulation entre la phalange basse et la phalange

12. <https://5dt.com/5dt-data-glove-ultra/>

médiane du doigt, afin de détecter la flexion et l’extension du doigt. Des capteurs supplémentaires sont placés entre chaque doigt pour détecter l’abduction et l’adduction du doigt.

La marque StretchSense¹³ utilise des capteurs extensibles. Ces capteurs sont placés sur le dessus de chaque articulation de la main.

Enfin, plusieurs gants utilisent aujourd’hui des centrales à inertie, p. ex. Perception Neuron¹⁴, ou la détection de perturbation de champ magnétique, p. ex. Manus¹⁵.

En recherche, du fait de leur simplicité de réalisation, les gants, pour la plupart des prototypes ad-hoc, sont souvent utilisés pour des études portant sur l’interaction par microgestes [117, 119, 102, 36]. En revanche, lorsque les études sont dédiées aux systèmes de reconnaissance, nous trouvons d’autres types de dispositifs comme ceux présentés ci-dessous.

Exo-squelettes Ils permettent de positionner les capteurs sur le dos de la main, limitant ainsi l’impact du dispositif sur la perception tactile de l’utilisateur, (Figure 5.1B). Un nombre limité de capteurs peut être utilisé avec ce type d’appareil. Par exemple, les capteurs de contact, pression et glissement ne peuvent pas être placés sur le dos de la main. Dans la littérature, ce type de dispositif a été utilisé avec les centrales à inertie [104, 29].

Bracelets Ils permettent d’avoir un dispositif léger et peu intrusif (Figure 5.1C). Ils semblent être la forme envisagée par les GAMAM (ex GAFAM) pour la captation des microgestes en Réalité Mixte (RM) [35]. Dans la littérature, ils ont été utilisés avec des capteurs de bio-acoustique [28], d’électromyographie [99], de radar [59] ainsi que des caméras [118]. Dans le commerce, AssistiveTouch¹⁶ de l’AppleWatch utilise les capteurs de la montre, accéléromètre, gyroscope et capteur optique de fréquence cardiaque, pour détecter un ensemble réduit de microgestes.

Anneaux Ils permettent d’avoir un dispositif léger et peu intrusif (Figure 5.1D). Dans la littérature, ils ont été utilisés avec des capteurs capacitifs [13], des capteurs de bio-impédance [116] ou pour fixer une caméra sur un doigt [19].

5.2.2 Augmentation de l’objet physique

Dans le cas des microgestes en contexte de *préhension*, il est possible d’augmenter l’objet plutôt que l’utilisateur, (Figure 5.1E). Par exemple, Song et coll. [106] ont recouvert la surface d’un stylo avec des capteurs capacitifs pour capter des microgestes effectués en contexte de *préhension* d’un stylo. Toutefois, ce type d’augmentation est peu utilisé pour deux raisons. Premièrement, les microgestes sont majoritairement étudiés en contexte main libre. Deuxièmement, en contexte main occupée, les études se font sur une grande variété d’objets [102, 104].

13. <https://stretchsense.com/solution/gloves/>

14. <https://neuronmocap.com/products/perception-neuron-studio-gloves>

15. <https://www.manus-meta.com/products/quantum-metagloves>

16. <https://support.apple.com/fr-fr/HT212760>

5.2.3 Augmentation de l'environnement

Les caméras et les radars peuvent être fixés partout sur le corps, p. ex. l'épaule [105] ou le torse [80], ce qui correspond à augmenter l'utilisateur (sous-section 5.2.1), ou dans la pièce autour de l'utilisateur [78, 102] correspondant à augmenter l'environnement et non l'utilisateur (Figure 5.1F). Toutefois, ce type d'augmentation est peu utilisé car les microgestes sont souvent étudiés avec des dispositifs portatifs ce qui implique des changements d'environnements réguliers [13].

5.3 Systèmes de reconnaissance

Pour la partie logicielle, il existe deux approches principales. En utilisant des capteurs de symboles de la notation μ Glyphe placés à des endroits stratégiques de la main, il est possible d'empiriquement associer des valeurs d'un capteur à des symboles μ Glyphes. Par exemple, pour un capteur de pression, placé sur la base de l'index, avec une plage de valeur [0, 1024], nous pouvons détecter un tap ($\overset{\circ}{-}_b$ et $\overset{\circ}{-}_b$) si la valeur passe au-dessus puis en-dessous de 500. Wambecke et coll. utilisent cette approche avec des capteurs de pression et de flexion [117] tandis que Faisandaz et coll. utilisent cette approche avec des capteurs de contact capacitifs [36].

La seconde approche consiste à utiliser des algorithmes d'apprentissage automatique. Cette approche peut être utilisée avec des capteurs de symboles μ Glyphe. Par exemple, Nailz utilise des capteurs de contact capacitifs sur les ongles de l'utilisateur [75]. Ces capteurs permettent de construire l'image du contact entre le pouce et l'ongle. Ensuite, un simple arbre de décision est utilisé pour classer ces images. Cette approche est celle utilisée avec les capteurs d'expressions μ Glyphe dû à la grande quantité d'informations collectée. Ainsi, Soliman et coll. utilisent un réseau de neurones convolutifs pour de la détection avec une caméra RGB-D [105]. Ce type de réseau de neurones fonctionne de façon similaire à notre façon de traiter l'information perçue par nos yeux. Pour simplifier, il y a une alternance entre une phase de traitement de portions de l'image et une phase de mise en commun des informations obtenues de ces portions. Saponas et coll. utilisent, dans un premier temps, un traitement du signal pour extraire des caractéristiques du signal fourni par des capteurs d'électromyographies, p. ex. l'amplitude [98, 99]. Ces caractéristiques permettent de placer chaque signal perçu lors d'un microgeste dans un espace à n dimensions où n est le nombre de caractéristiques. Enfin, les points dans cet espace sont rassemblés en groupes, correspondant chacun à un microgeste, à l'aide d'une machine à vecteurs de support qui calcule les frontières, c.-à-d. les vecteurs, de ces groupes. SoloFinger utilise, dans un premier temps, TsFresh [22] pour extraire des caractéristiques du signal reçu d'un système de caméra infrarouge (*motion capture*), suivi d'une forêt d'arbres décisionnels pour classer les signaux et reconnaître les microgestes.

Les algorithmes précédents reconnaissent les microgestes en utilisant uniquement les données du système de captation. Toutefois, il est possible dans certains contextes d'utiliser des informations supplémentaires. Ainsi, TipText utilise un capteur de

contact capacitif sur le bout de l'index pour réaliser un clavier qwerty sur cette phalange [123]. Le manque de précision, dû à la largeur du pouce comparé à la taille des touches, fait que l'utilisateur appuie sur plusieurs touches de ce clavier à la fois. De ce fait, TipText utilise un décodeur statistique pour associer la suite de touches saisies aux mots du dictionnaire pour corriger les potentielles erreurs, un peu comme l'auto-correcteur du clavier de nos smartphones.

Nous avons maintenant présenté les systèmes de captation et reconnaissance de microgestes selon trois facettes : les types de capteurs, les formes des dispositifs de captation et les types de systèmes de reconnaissance. La [Table 5.1](#) présente une vue d'ensemble des systèmes de captation et de reconnaissance utilisés dans la littérature microgeste suivant ces trois facettes. Dans la suite, nous présentons les systèmes que nous avons conçus et réalisés.

| | | Boldu et al. [13] | Chan et al. [19] | Deyle et al. [28] | Dobinson et al. [29] | Faisandaz et al. [36] | Faisandaz et al. [37] | Irvantchi et al. [59] | Irvantchi et al. [60] | Lee et al. [75] | Lien et al. [78] | Liu et al. [79] | Saponas et al. [98, 99] | Sharma et al. [102] | Sharma et al. [104] | Soliman et al. [105] | Song et al. [106] | Waghmare et al. [116] | Wambecke et al. [117] | Way et al. [118] | Whitmire et al. [119] | Xu et al. [123] |
|---------------------------|--|-------------------|------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|------------------|-----------------|-------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|-----------------|
| Capteurs | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Symboles | Capteur de flexion | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Capteur de pression | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Capteur de contact | x | | | | x | x | | | x | | | | | | x | x | | x | | | x |
| | Capteur de glissement | x | | | | x | | | | x | | | | | | | x | | x | | | |
| Expression | Caméra | | x | | | | | | | | | x | | x | | x | | | | | x | |
| | Radar | | | | | | | x | | | x | | | | | | | | | | x | |
| | Centrale à inertie | | | | x | | | | | x | | | | | x | | | | | | | |
| | Acoustique | | | x | | | | | x | | | | | | | | | | | | | |
| | Bio-impédance | | | | | | | | | | | | | | | | | | x | | | |
| | Électromyographie | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | |
| Formes des dispositifs | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Utilisateur | Gants | | | | | x | x | | | | | | | | | | | | | x | | x |
| | Exo-squelettes | | | | x | | | | | x | | | | | | x | | | | | | |
| | Bracelets | | | x | | | | x | | | | | | | | | | | | | | |
| | Anneaux | x | x | | | | | | | | | | | x | | | | | x | | | |
| Objet physique | | | | | | | | | | | | | | | | | x | | | | | |
| Environnement | | | | | | | | x | | x | | x | | x | | x | | | | | | |
| Reconnaissance | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ad-hoc | | | | | | x | x | | | | | | | | | | | | | x | | x |
| Apprentissage automatique | Arbre de décision | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | |
| | Forêt d'arbres décisionnels | | x | | | | | x | x | | x | | | x | x | | | | | | | |
| | k-NN | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | |
| | Modèle de Markov caché | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Naive bayes | | | | | | | | | | | x | | | | | x | | | | | |
| | Réseau neuronal convolutif | | | | | | | | | | | | | | | x | | x | | | | |
| | Réseau neuronal récurrent bidirectionnel avec cellules de mémoire à long terme | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Statistical Decoder | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | x |
| SVM | x | | | | | | | | | | x | x | | | | | | | | x | | |

TABLE 5.1: Vue d'ensemble des systèmes de captation et de reconnaissance utilisés dans la littérature microgeste suivant les trois facettes : types de capteurs, formes des dispositifs de captation et types de systèmes de reconnaissance.

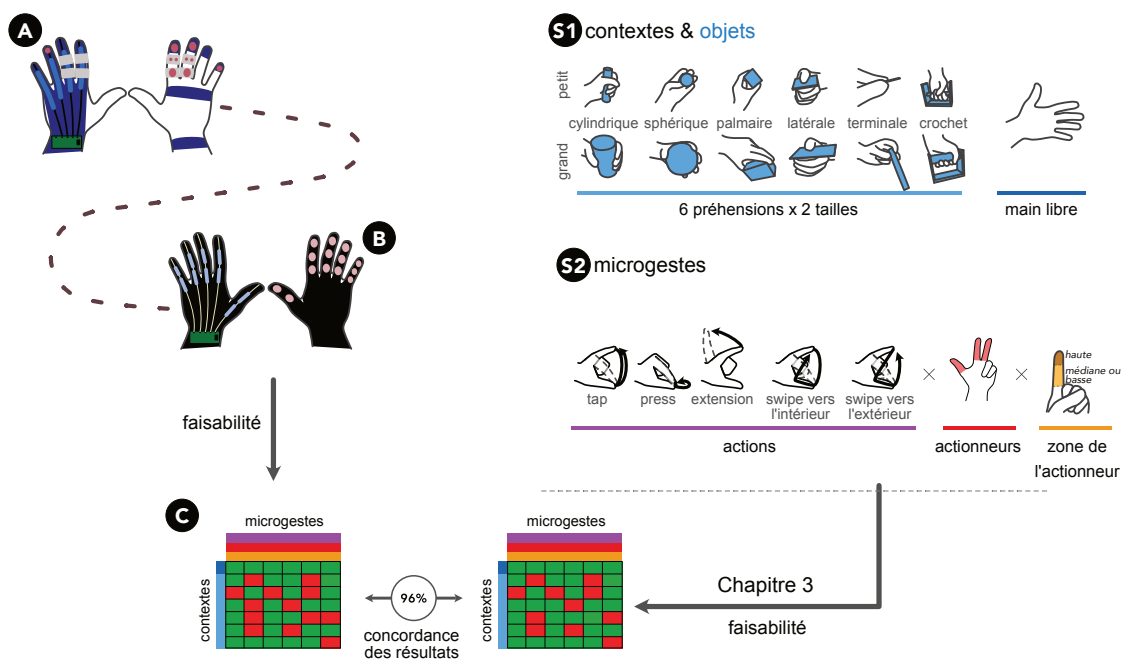


FIGURE 6.1: Évolution et évaluation des systèmes de captation. A) Exo-squelette avec capteurs industriels. B) Gant avec capteurs DIY. C) Étude de l'impact du gant sur la faisabilité des microgestes et comparaison avec l'étude menée dans le chapitre 3.

Chapitre 6

Captation : ingénierie et évaluation de gants

Pour mener les travaux de recherche décrits dans ce manuscrit, deux gants ont été fabriqués pour capter les microgestes. Ce chapitre décrit les deux gants ainsi qu'une étude sur l'impact du gant sur la faisabilité des microgestes([Figure 6.1](#)).

6.1 Fabrication de gants

Deux gants ont été réalisés pour capter les microgestes.

6.1.1 Gant *Off-The-Shelf* (OTS)

Ce gant a été utilisé pour l'application des microgestes à l'interaction en [Réalité Augmentée \(RA\)](#) présentée dans le [chapitre 10](#). Les microgestes à reconnaître avec ce gant sont : **tap** du pouce vers la phalange médiane et la phalange haute de l'index, l'ongle de l'annulaire ainsi que l'état d'extension de l'index et du majeur.

En μ Glyphe : $x, y \in \{(i, m)|(i, t)|(r, n)\}, \overset{\circ}{\bullet}_t(x \bullet_y); \overset{\circ}{\bullet}_t$ et $x \in \{i|m\}, \overset{\circ}{\bullet}_x \blacksquare$.

Cl | Ha | Op

Description matérielle Pour la partie capteur, ce gant contient 14 capteurs, de type potentiomètre, dont 4 capteurs de flexion et 10 capteurs de pression, et est inspiré du gant de M[eye]cro [117]. La [Figure 6.2](#) présente la disposition de ces capteurs. Les capteurs de flexion captent les deux articulations de l'index et du majeur : l'articulation entre le doigt et la paume, et l'articulation entre les phalanges du doigt. Chaque capteur mesure 55,37 mm de long. Les capteurs de pression sont placés à l'endroit où nous voulons détecter un **tap** du pouce. Les capteurs de pression étant circulaires et peu flexibles, nous avons dû trouver un compromis entre couvrir entièrement la phalange et entraver la fermeture du doigt. Nous avons donc utilisé des capteurs de 17 mm de diamètre sur les phalanges hautes et basses, ainsi que sur les ongles. Sur les phalanges médianes, nous utilisons deux capteurs de 7,62 mm de diamètre pour épouser la forme de cette phalange : un rectangle étroit. Chaque capteur est connecté à une entrée analogique sur une

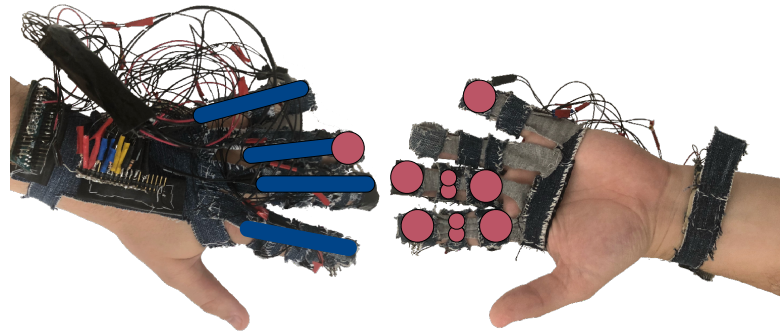


FIGURE 6.2: Gant **OTS** permettant de capter les microgestes pouce-doigt et flexion. Les disques rouges représentent les capteurs de pression. Les lignes bleues représentent les capteurs de flexion.

carte Arduino Micro¹. Pour lire la valeur du capteur, nous utilisons une résistance de $10k\Omega$ entre la masse et le capteur pour former un pont diviseur de tension.

Pour la partie support, nous avons décidé de fabriquer une solution hybride entre un gant et un exosquelette en tissu. Avec un gant classique, une personne ayant une petite main ne peut pas insérer ses doigts jusqu'au bout du gant à cause de la couture entre deux doigts. Cela entraîne un non-alignement entre les capteurs et les phalanges/articulations. Une grande main est trop serrée dans le gant, ce qui accentue les problèmes liés à la faible flexibilité des capteurs choisis, limitant ainsi le mouvement des doigts. En conséquence, nous avons deux possibilités. La première est de fabriquer 3/4 versions du gant pour différentes tailles de main. La seconde est de fabriquer une forme de gant permettant d'aligner les capteurs en face des doigts. Ainsi, nous avons choisi la deuxième possibilité en concevant une solution hybride entre gant et exosquelette qui présente les propriétés suivantes : 1) le gant s'enfile par les phalanges hautes des doigts. Cela garantit que la phalange haute de chaque doigt fait face au capteur correspondant. 2) Les capteurs de pression des phalanges basses et médianes sont montés sur des anneaux amovibles. Cela permet de positionner les capteurs devant chaque phalange, quelle que soit la longueur du doigt. 3) L'exosquelette est fixé au dos de la main par deux sangles. Cela permet de plaquer les capteurs de flexion sur le dos de la main, peu importe la taille de celle-ci, pour capter la flexion/extension de l'articulation entre la paume et le doigt.

Pour la partie algorithmique, nous avons utilisé un algorithme avec seuils pour détecter les différents niveaux de flexion Cl, Ha et Op ainsi que les contextes $\bullet\bullet$ et $\bullet\circ$.

Limite Après avoir utilisé ce gant pour l'application en **RA** (chapitre 10), nous avons remarqué deux limites. D'une part, les deux sangles avaient tendance à se défaire au cours de l'étude, ce qui pouvait entraîner des erreurs dans la reconnaissance de la flexion du doigt. D'autre part, le tissu choisi - le denim - et l'utilisation de capteurs industriels offraient une trop grande résistance physique aux mouvements des doigts, et ne couvraient pas parfaitement les phalanges. Nous

1. <https://store.arduino.cc/products/arduino-micro>



FIGURE 6.3: Vue éclatée d'un capteur et de la position des capteurs sur notre gant [DIY](#). Les capteurs situés sur le devant de la main sont utilisés pour détecter la pression de la phalange. Les capteurs situés sur le dos de la main servent à détecter la flexion des doigts. Pour chaque capteur, deux électrodes en tissu conducteur sont cousues sur un tissu en coton. Une cosse électrique est cousue sur le tissu conducteur pour souder les fils de l'Arduino. Le ruban de cuivre augmente la conductivité entre le tissu conducteur et l'anneau de connexion. Entre les électrodes, il y a 3 couches de la marque Velostat™. Une électrode est connectée à la broche 5V de l'Arduino, l'autre à un diviseur de tension. Le diviseur de tension est ensuite connecté à une entrée analogique de l'Arduino (par exemple la broche A0).

avons ainsi choisi de fabriquer nos propres capteurs.

6.1.2 Gant *Do-It-Yourself* (DIY)

Ce gant a été conçu pour reconnaître les microgestes suivants : [tap](#) et [press](#) des phalanges hautes, médianes et basses des cinq doigts sur une surface, ainsi que [swipe](#) vers l'intérieur/extérieur et [extension](#) des 5 doigts. En μ Glyphe :

- $x \in \{t | i | m | r | p\}, y \in \{t | m | b\}, x = t \rightarrow y \neq m, \overset{\circ}{\nabla}_x \overset{\circ}{\blacktriangledown}_y; \overset{\circ}{\blacktriangledown}_x \overset{\circ}{\blacktriangledown}_y;$
- $x \in \{t | i | m | r | p\}, y \in \{t | m | b\}, x = t \rightarrow y \neq m, \overset{\circ}{\nabla}_x \overset{\circ}{\blacktriangledown}_y; \overset{\circ}{\blacktriangledown}_x \overset{\circ}{\blacktriangledown}_y;$
 $\text{Lo} \rightarrow \text{Hi} \quad \text{Hi} \rightarrow \text{Lo}$
- $x \in \{t | i | m | r | p\}, \overset{\circ}{\nabla}_x \overset{\circ}{\blacktriangledown}_y; \left(\overset{\circ}{\nabla}_x \overset{\circ}{\blacktriangledown}_y | \overset{\circ}{\blacktriangledown}_x \overset{\circ}{\blacktriangledown}_y \right); \overset{\circ}{\nabla}_x \overset{\circ}{\blacktriangledown}_y;$
- $x \in \{t | i | m | r | p\}, \overset{\circ}{\blacktriangledown}_x \overset{\circ}{\blacktriangledown}_y.$

Description matériel La base du dispositif est un gant disponible dans le commerce sur lequel nous avons découpé une ouverture entre les doigts pour permettre aux utilisateurs d'insérer leurs doigts jusqu'au bout du gant. Nous avons ensuite recouvert le gant de capteurs de pression [DIY](#) pour reconnaître les microgestes : un par phalange sur le devant de la main et un par articulation du doigt sur le dos de la main ([Figure 6.3](#)). Les capteurs sont fabriqués à partir de

Velostat™, un matériau dont la résistance électrique change lorsqu'il est pressé. Trois couches de Velostat sont placées entre deux électrodes en tissu conducteur, inspirées par les *Stickytape Sensors* d'*Instructables*². Chaque capteur ne nécessite que des techniques de couture de base et coûte moins d'un euro. Comme les capteurs sont en tissu et en Velostat™, un matériau souple, ils n'offrent que peu ou pas de résistance physique lorsque la main est fermée. La [Figure 6.3](#) montre une vue éclatée des capteurs et leur position sur le gant. Chaque capteur est alimenté par une tension de 5V. Sa plage théorique de valeurs capturées par les broches de connection de la carte Arduino est de [0, 1024]. En pratique, la plage varie d'un capteur à l'autre, avec une plage moyenne de [300, 990]. Comme pour les capteurs industriels, la limite inférieure de cette plage dépend en partie de la façon dont le capteur est cousu sur le gant. Plus le capteur est cousu serré, plus la pression exercée sur le capteur est importante, et donc plus la limite inférieure est élevée.

Nous avons fabriqué cette version du gant pour diminuer l'impact des capteurs sur la faisabilité et la facilité d'exécution des microgestes. Cependant, le gant étant néanmoins encombrant en raison du nombre et de l'épaisseur des capteurs, nous avons voulu vérifier son impact sur la faisabilité et la facilité d'exécution des microgestes en conduisant une étude expérimentale décrite dans la section suivante.

6.2 Impact du gant

Dans cette étude, nous voulons tester l'impact de notre gant [DIY](#) sur la faisabilité des microgestes dans différents contextes de [préhension](#). Pour ce faire, nous allons nous comparer à l'étude sur la faisabilité des microgestes réalisée précédemment ([section 3.3](#)) qui a été conduite sans gant. Les contextes étudiés et les microgestes sont identiques.

6.2.1 Protocole

Nous avons testé les treize contextes présentés dans l'étude du [chapitre 3](#), à savoir la main libre, et deux tailles pour chaque [préhension](#) de la taxonomie de Schlesinger[100] : Cylindrique, Sphérique, Palmaire, Terminale, Latérale et Crochet (voir fiche lecture). Pour chaque contexte, nous avons testé tous les microgestes de la première étude, à savoir [tap](#), [press](#), [extension](#) et [swipe](#) intérieur/extérieur. Pour chaque combinaison contexte × microgeste, les participants ont dû effectuer le microgeste trois fois afin d'enregistrer suffisamment de données du gant pour aider au développement d'un reconnaiseur de microgeste avec ce gant, présenté dans le chapitre suivant. Ensuite, les participants ont attribué un score de faisabilité sur une échelle de Likert en 4 points (1 - difficile, 4 - facile). Si une combinaison de contexte × microgeste était impossible à réaliser, les participants pouvaient l'ignorer. L'ordre des [préhensions](#) a été tiré aléatoirement entre les participants et, pour une [préhension](#) donnée, l'ordre des microgestes a également été tiré aléatoirement. Les

2. <https://www.instructables.com/Stickytape-Sensors/>

participants étaient libres d'exécuter les microgestes comme ils le souhaitaient, mais avaient pour instruction de ne pas modifier leur **préhension**. L'étude durait entre 1 h et 1 h 30.

Nous avons recruté 10 participants ($25,3 \text{ans} \pm 5,12$), tous utilisant leur main droite pour les interactions quotidiennes. Quatre participants étaient biologiquement de sexe féminin et six étaient de sexe masculin.

6.2.2 Résultats

La **Figure 6.4** présente le nombre de fois où une combinaison contexte \times microgeste a été ignorée, c.-à-d. qu'au moins une répétition a été jugée impossible par le participant.

La **Figure 6.5** présente le score de Likert médian (échelle de 1-difficile à 4-facile) pour chaque combinaison contexte \times microgeste. Si un participant a ignoré une combinaison, aucun score de Likert n'a été enregistré. Si 50 % ou plus des participants ont ignoré une combinaison, celle-ci est jugée impossible. Ces combinaisons sont représentées par une croix (\times) dans la **Figure 6.5**. Les scores médians ne sont donc calculés que pour les combinaisons non ignorées ou ignorées par moins de 50 % des participants.

Par rapport à l'absence de gant, nous constatons des différences dans la faisabilité des microgestes. Compte tenu de l'encombrement du gant, certains microgestes devenaient faisables. Ainsi, les **press** du pouce étaient possibles pour les **préhensions** **Palmaire** et **Terminale Grand** car l'épaisseur des capteurs permettait d'effectuer le **press** de la **phalange médiane ou basse (mob)** du pouce sur l'objet, comme montré dans la **Figure 6.6A**. De plus, pour **Terminale Petit**, il était possible d'effectuer le **tap** et le **press** avec la **phalange mob** du pouce, car l'épaisseur du gant permettait d'atteindre plus facilement les capteurs situés sur les autres doigts avec le pouce, comme montré dans la **Figure 6.6B**. De même, pour **Latéral Grand**, le **tap mob** du pouce était réalisable, car il était plus facile d'atteindre l'objet.

Au final, le score de Likert moyen sans le gant est de $(3,7 \pm 0,1, n = 104)$ et avec le gant de $(3,3 \pm 0,1, n = 102)$. L'analyse de l'intervalle de confiance suggère un effet du gant sur la facilité des microgestes. Cependant, le δ de Cliffs suggère que cet effet est petit ($\delta = 0,2$). Ainsi, même si l'épaisseur du gant permet de faire de nouveaux microgestes, il rend plus difficile de faire les microgestes faisables.

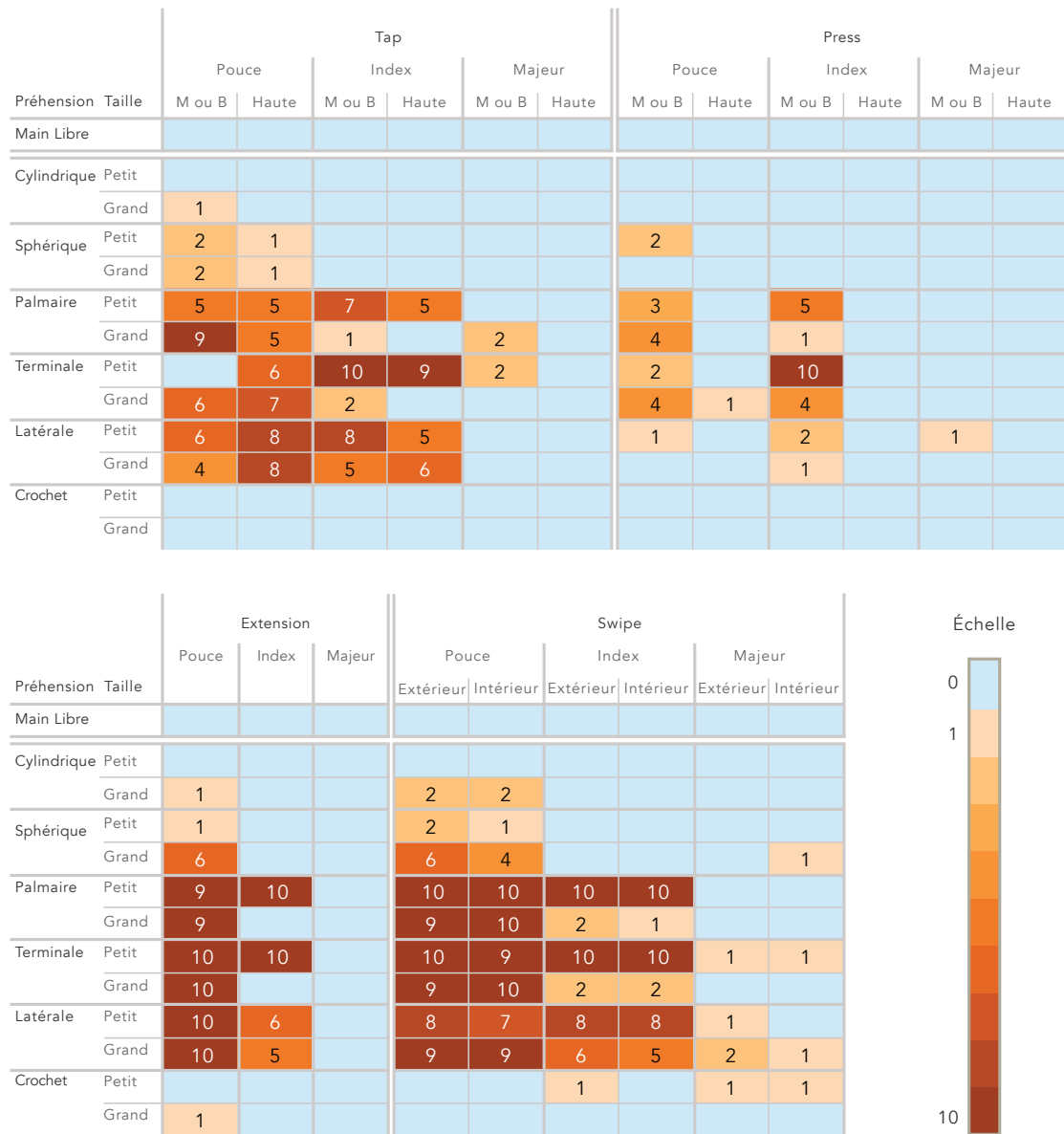


FIGURE 6.4: Pour chaque combinaison contexte × microgeste : nombre de participants qui l'ont ignorée.

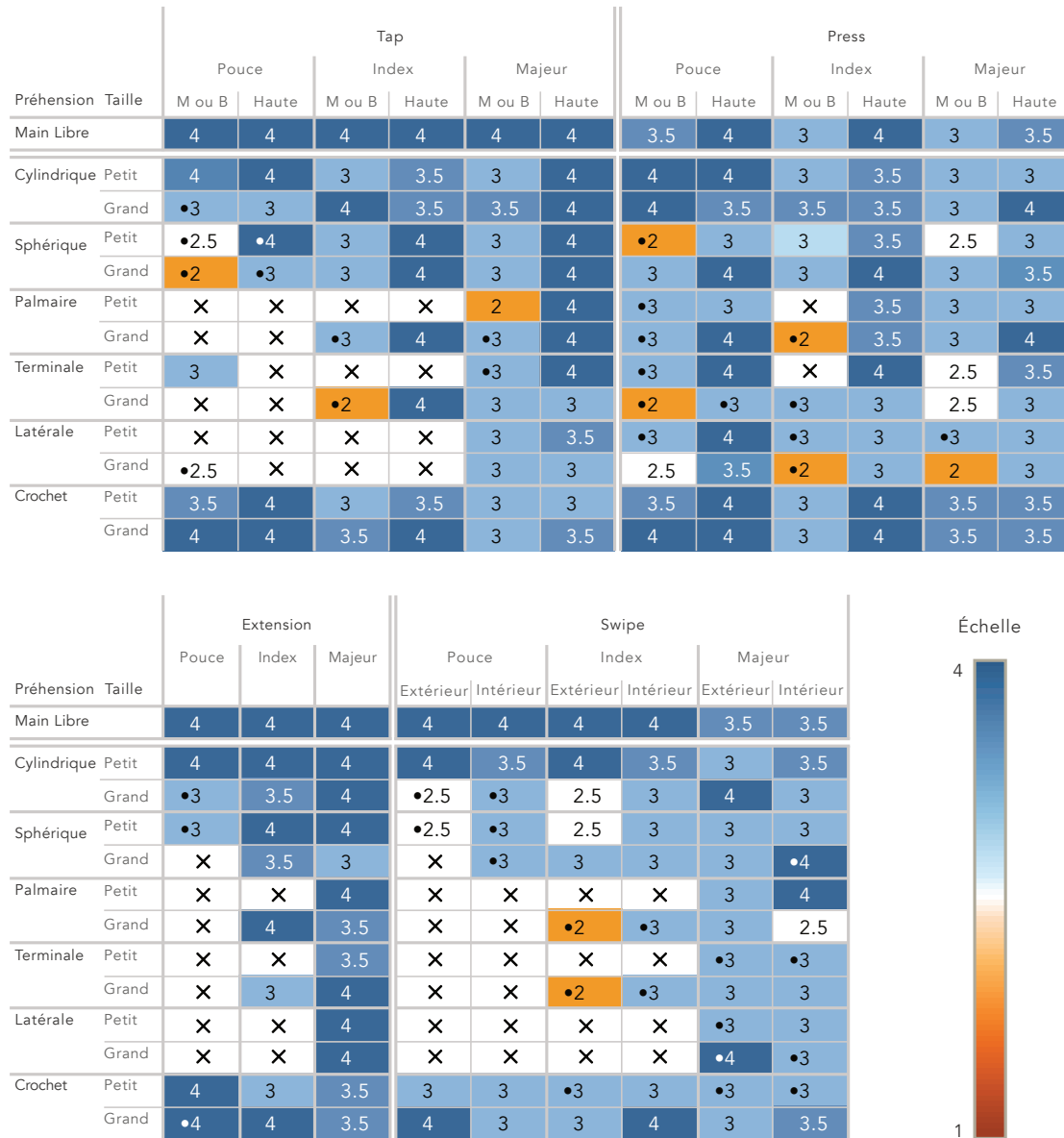


FIGURE 6.5: Pour chaque combinaison de contexte × microgeste : score de Likert médian (échelle de 1-difficile à 4-facile). Les cellules comportant une croix (×) correspondent aux combinaisons contexte × microgeste qui ont été ignorées par 50 % des participants ou plus. Les cellules avec un symbole ● correspondent aux combinaisons qui ont été ignorées au moins une fois.

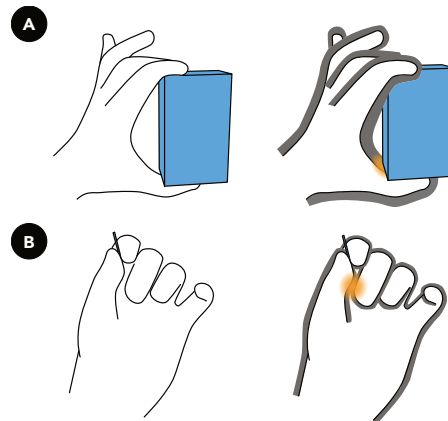


FIGURE 6.6: Microgestes devenus faisables grâce à l'épaisseur du gant. A gauche, réalisation du microgeste sans gant. A droite, réalisation du microgeste avec le gant dont l'épaisseur supplémentaire est représentée en gris. **A)** L'épaisseur du gant permet d'atteindre l'objet avec la phalange basse du pouce. **B)** L'épaisseur du gant permet d'atteindre le majeur avec la phalange basse du pouce.

6.3 Conclusion

L'utilisation de capteurs en tissu est donc concluante et permet de valider son utilisation pour nos futures études. Contrairement à ce que nous avons envisagé, nous avons reçu peu de commentaires sur l'inconfort causé par nos capteurs en tissu en comparaison de leur version industrielle prête à l'emploi³. Toutefois, il faut noter que cette version du gant, conçue pour couvrir un large panel de microgestes, a été qualifiée d'encombrante par nos participants, en raison du grand nombre de capteurs utilisés et de leur épaisseur. Bien que cet encombrement ait eu un impact faible sur la faisabilité et la facilité d'exécution des microgestes, il convient de garder ce point en tête lors de la conception de futurs gants pour réduire le nombre de capteurs (et donc l'encombrement) au strict nécessaire.

3. Round Force-Sensitive Resistor : <https://www.adafruit.com/product/166>

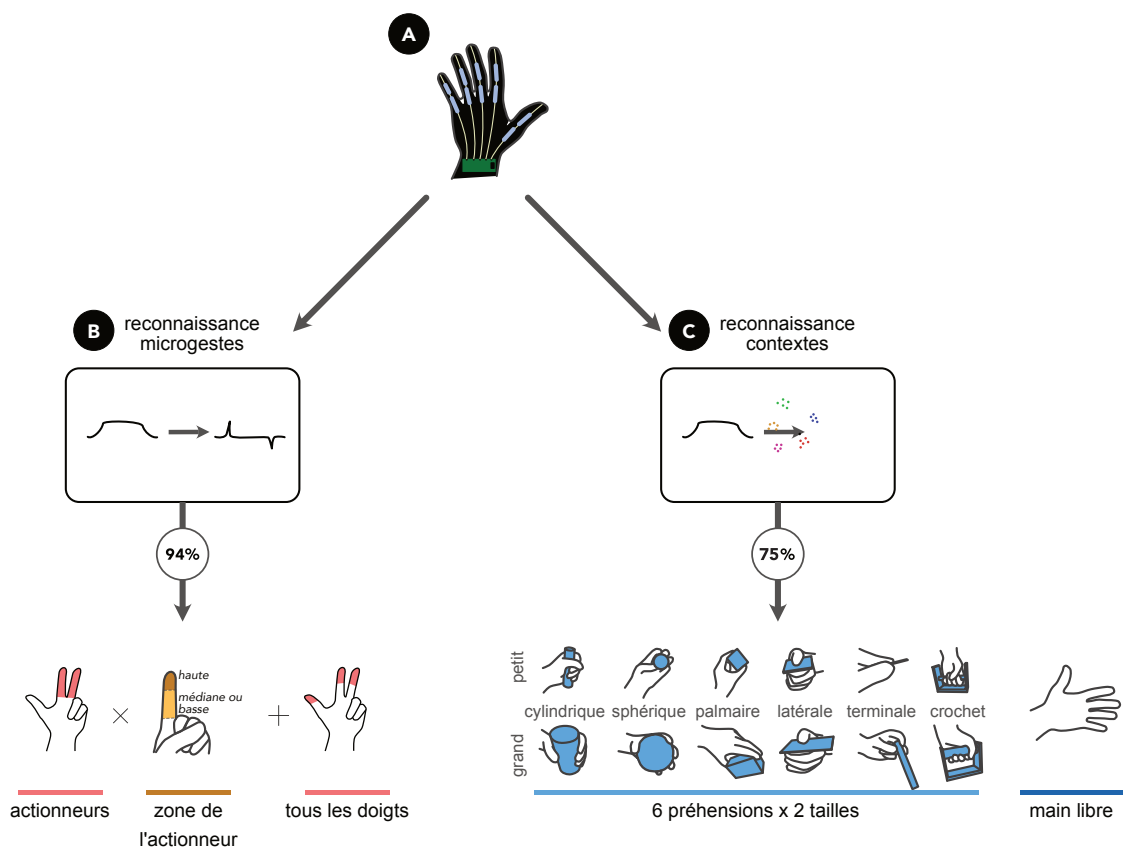


FIGURE 7.1: Système de reconnaissance des microgestes et du contexte. A) Gant DIY ([chapitre 6](#)) utilisé pour le système de reconnaissance. B) Système de reconnaissance pour les microgestes de l'ensemble basé sur l'actionneur ([chapitre 3](#)). C) Système de reconnaissance pour les contextes.

Chapitre 7

Reconnaissance : ingénierie et évaluation de reconnaissseurs de microgestes et de préhensions

Dans ce chapitre, nous présentons et évaluons un système de reconnaissance de microgestes basé sur notre système de captation, le gant *Do-It-Yourself (DIY)*, présenté dans le chapitre précédent. Nous considérons l'ensemble de microgestes basé sur l'actionneur, compatibles avec un grand nombre de contextes main occupée et main libre, défini dans la [section 4.1](#). Les microgestes de cet ensemble et les contextes de [préhension](#) étudiés peuvent être décrits avec la notation μ Glyphe. Ainsi si les microgestes sont reconnus, les contextes peuvent éventuellement l'être aussi avec le même système de captation. Aussi dans ce chapitre nous évaluons en plus de la reconnaissance des microgestes, la reconnaissance des contextes. Ceci permet d'anticiper de futurs travaux combinant la reconnaissance de contextes et de microgestes pour un vocabulaire d'entrée encore plus expressif.

7.1 Reconnaissance d'un ensemble de microgestes basé sur l'actionneur

Dans cette section, nous présentons et évaluons un reconnaisseur, créé à partir des données collectées lors de l'étude de l'impact du gant *DIY* sur la faisabilité des microgestes du chapitre précédent ([section 6.2](#)).

7.1.1 Ensemble à reconnaître

Nous voulons reconnaître l'ensemble basé sur l'actionneur (voir fiche de lecture ou [chapitre 4](#)). Dans cet ensemble, l'action du microgeste est un [tap](#) ou un [press](#). La distinction d'un microgeste par rapport à l'autre se fait uniquement sur l'actionneur et la zone de l'actionneur utilisée. Ainsi, nous considérons les actionneurs pouce, index et majeur ainsi que les phalanges hautes et [médiane ou basse \(mob\)](#). De plus, nous considérons aussi l'actionneur pouce, index et majeur

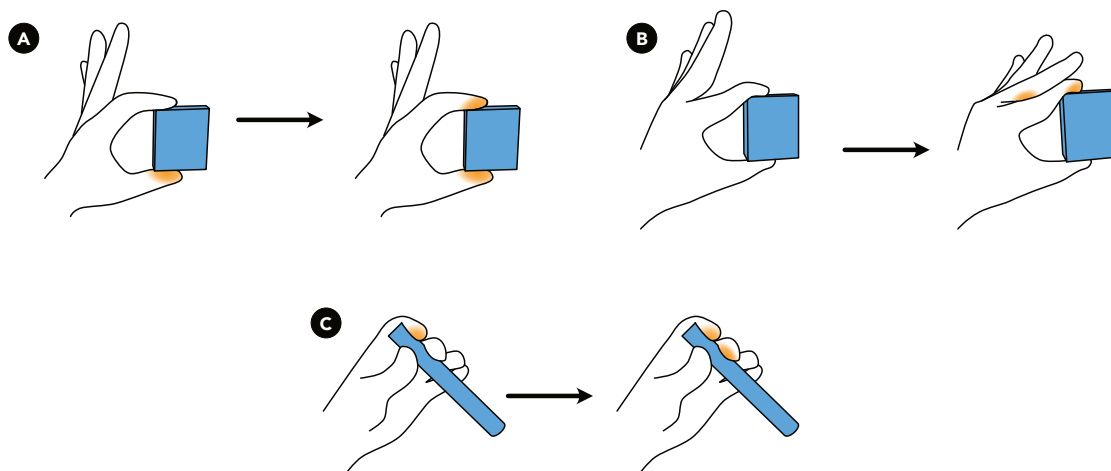


FIGURE 7.2: Problèmes d'ambiguïté pour la détection des microgestes. A) Lorsque le pouce effectue un **press** sur l'objet, les doigts opposés effectuent aussi un **press**. B) Lorsque le majeur **tap** ou **press** sur le dos de l'index ceci implique un **press** de l'index sur l'objet. C) Lorsqu'un doigt effectue un **press** en tenant l'objet, d'autres doigts sont amenés à effectuer un **press**.

combiné pour la phalange haute. En μ Glyphe, l'ensemble à reconnaître est :

$$(x, y) \in \{t|i|m\} \times \{t|mob\} \cup \{(t||i||m, t)\}, \left(\begin{array}{c} \circ \\ \blacktriangledown \\ x \end{array} ; \begin{array}{c} \circ \\ \blacktriangle \\ x \end{array} \right) \Big| \left(\begin{array}{c} \bullet \\ \blacktriangledown \\ x \end{array} ; \begin{array}{c} \bullet \\ \blacktriangle \\ x \end{array} \right) \Big| \begin{array}{c} \text{Lo} \rightarrow \text{Hi} \\ \text{Hi} \rightarrow \text{Lo} \end{array}$$

Avant de créer le système de reconnaissance pour cet ensemble, nous avons examiné les données brutes des capteurs recueillies lors de l'étude sur l'impact du gant sur la faisabilité des microgestes. Nous avons identifié trois problèmes d'ambiguïté où nous ne pouvons pas déterminer quel doigt a exécuté un microgeste.

Tout d'abord, le pouce ne peut pas être utilisé dans le même ensemble que les autres doigts. Dans les contextes où le pouce est opposé aux autres doigts, c.-à-d. que le pouce est seul dans un **Doigt Virtuel (DV)** et que tout ou une partie des autres doigts sont regroupés dans un deuxième **DV**, un **press** du pouce sur l'objet entraînera une augmentation de la pression sur les autres doigts (**Figure 7.2A**). Ce problème est similaire à celui du **tap** en main libre où il est impossible de différencier l'actionneur du receveur lors d'un **tap** du pouce avec un doigt, puisque les deux doigts impliqués dans l'action jouent des rôles symétriques. Nous avons donc décidé de ne pas considérer le pouce comme un actionneur possible.

Deuxièmement, les microgestes **tap** du majeur **mob** et **press** du majeur **mob** dans les contextes **Terminal Petit**, **Palmaire Petit**, et les deux contextes **Latérales** ne peuvent pas être détectés correctement. En effet, pour effectuer ces microgestes, les utilisateurs ont effectué le **tap/press** du majeur sur le dos de l'index. Ceci impose à l'index d'exercer une pression supplémentaire sur l'objet à cause du majeur qui effectue un **tap** ou **press** dessus (**Figure 7.2B**). Ainsi, les données du gant montrent deux microgestes dans ce cas : un **tap** ou un **press** du majeur et un **press** de l'index. Cependant, comme l'index est en contact avec

l’objet, Par conséquent, nous avons supprimé les microgestes `tap` du majeur `mob` et `press` du majeur `mob` pour ces quatre contextes.

Enfin, pour les objets tenus par le bout des doigts, le `press` d’un doigt sur l’objet entraîne une augmentation de la pression des autres doigts pour faire contrepoids (Figure 7.2C). Ainsi, pour éviter toute ambiguïté, nous guiderons nos utilisateurs pour qu’ils effectuent un `tap` plutôt qu’un `press` dans ces cas-là.

Notre ensemble final est composé d’un `tap` ou `press` effectué par une des phalanges suivantes : phalange `mob` de l’index, phalange haute de l’index, phalange `mob` du majeur, phalange haute du majeur ou phalange haute de tous les doigts.

7.1.2 Reconnaisseur de microgestes

Le gant `DIY` transmet les valeurs brutes de chaque capteur à un système de reconnaissance composé de deux couches logicielles.

La première couche détecte un microgeste pour chaque capteur, sans déterminer s’il s’agit d’un `tap` ou d’un `press`. Le premier graphique de la Figure 7.3 montre les profils de courbes à détecter pour un `tap` et un `press`. Les deux courbes ont des formes similaires, mais celle du `press` est décalée vers le haut. Comme nous n’avons pas besoin de savoir si l’utilisateur effectue un `tap` ou un `press`, nous basons notre outil de reconnaissance sur la dérivée de ces courbes, ce qui élimine tout décalage vertical.

La dérivée des deux courbes est représentée sur le deuxième graphique de la Figure 7.3. La dérivée présente deux pics, chacun correspondant à la montée et à la descente de la courbe. Nous utilisons deux seuils pour détecter la hauteur des pics. Ces seuils sont les mêmes pour chaque utilisateur, mais différent d’un capteur à l’autre. Ils ont été fixés empiriquement à l’aide des données enregistrées lors de l’étude sur l’impact du gant (section 6.2). De plus, nous avons ajouté une contrainte de durée : les deux pics doivent se produire dans un intervalle de temps de 1 s. Enfin, nous reconnaissons le doigt et la phalange en fonction du capteur qui a détecté un microgeste.

La deuxième couche identifie les microgestes détectés dans une fenêtre temporelle spécifique et décide quels microgestes sont reconnus. Lorsqu’un microgeste est détecté, une fenêtre temporelle de 200 ms commence. Pendant cette fenêtre temporelle :

- si un seul microgeste est détecté, le système le reconnaît ;
- si un microgeste sur au moins trois doigts différents est reconnu, un microgeste `phalange haute de tous les doigts` est reconnu ;
- si un microgeste de la phalange `mob` et un microgeste de la phalange haute du même doigt sont détectés, le système ne reconnaît que le microgeste de la phalange haute.

En ce qui concerne la dernière heuristique, sur les objets de grande taille, un microgeste de la phalange haute entraîne souvent un microgeste de la phalange `mob` en raison de la mécanique de la main. Cependant, en gardant le doigt droit,

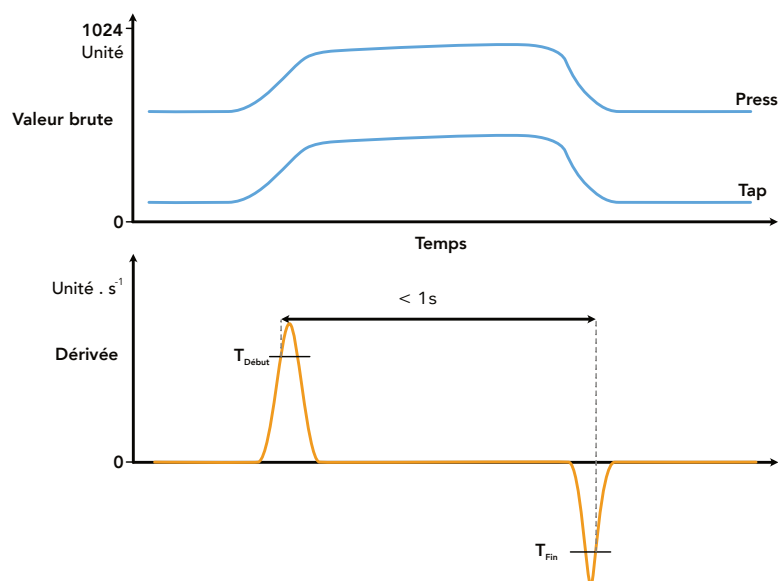


FIGURE 7.3: Détecter un **tap** ou un **press**. En haut, les deux courbes représentent les valeurs brutes lors d'un **tap** ou d'un **press**. En bas, la courbe représente la dérivée des valeurs brutes. Un **tap** ou un **press** est détecté quand la dérivée passe au-dessus du seuil $T_{\text{Début}}$ et ensuite en dessous du seuil T_{Fin} , en moins d'1 s.

il est possible d'effectuer un microgeste de la phalange **mob** sans déclencher un microgeste de la phalange haute. Ainsi, lorsqu'un microgeste de la phalange **mob** et un microgeste de la phalange haute sont détectés, il est plus probable que le microgeste de la phalange haute soit le microgeste souhaité.

Après avoir effectué un microgeste, la main revient à sa position initiale. Cela peut déclencher un faux positif. Ainsi, lorsqu'un microgeste est reconnu, il y a un délai d'une seconde pendant lequel les microgestes ne peuvent plus être reconnus.

7.2 Taux de reconnaissance des microgestes

Dans cette section, nous listons les explications fournies aux participants sur quand et où il est préférable d'effectuer un **tap** ou un **press**. Nous présentons ensuite les résultats sur le taux de reconnaissance de l'ensemble basé sur l'actionneur avec notre gant **DIY** et notre outil de reconnaissance.

7.2.1 Protocole expérimental

Nous avons testé les mêmes 13 contextes que ceux utilisés dans nos études précédentes (sous-section 3.2.1). Pour chaque contexte, les participants devaient effectuer un microgeste avec chaque partie possible de la main définie dans notre ensemble. Nous avons exclu 6 combinaisons de contexte \times microgeste : 2 parce que **tap** et **press** sont impossibles, présentées dans la Figure 4.3, et 4 pour des raisons d'ambiguïté de reconnaissance, comme expliqué dans la section précédente. Avant

l'étude, nous avons guidé les participants sur la manière de réaliser un microgeste à l'aide des explications suivantes :

- préférez utiliser un **tap** plutôt qu'un **press** ;
- lorsque vous effectuez un **press** avec l'index ou le majeur, soyez conscient de ce que vous faites avec l'autre doigt et de l'endroit où vous le faites ;
- gardez votre doigt droit quand vous effectuez un microgeste avec la phalange **mob**. Cela évitera les microgestes avec la phalange haute ;
- avec de petits objets, faites le tour de l'objet pour effectuer un microgeste sur le pouce ;
- pour les contextes **Latérale**, utilisez le pouce pour effectuer un **press** à travers l'objet sur la partie de l'index souhaitée.

Nous avons autorisé de petites variations de la **préhension**, tant que ces variations ne changeaient pas la définition de la **préhension** selon la taxonomie de Schlesinger. Au cours de l'étude, pour chaque combinaison contexte × microgeste, les participants ont eu une courte phase d'*entraînement*. Au cours de cette phase, les participants ont été guidés sur le lieu et le type de microgeste à effectuer (une phase qui a généralement duré moins d'une minute). Après avoir effectué deux fois le microgeste correctement, c.-à-d. après qu'il ait été reconnu deux fois par le système, les participants ont entamé la phase d'*expérimentation*. Au cours de cette phase, les participants devaient exécuter un microgeste correctement à trois reprises. S'ils ne parvenaient pas à effectuer un microgeste correctement, l'essai était considéré comme une erreur et les participants devaient le répéter immédiatement. Pour commencer un essai, les participants appuyaient sur la touche « S » du clavier. Pour chaque répétition, les utilisateurs disposaient de 3 secondes pour effectuer un microgeste. Un retour visuel (fond d'écran devenant vert ou rouge) indiquait si le microgeste reconnu était correct ou non. Après trois répétitions correctes, les participants ont noté la faisabilité du microgeste sur une échelle de Likert en 4 points (1-difficile, 4-facile). Nous avons utilisé un nombre pair de graduations pour éviter les réponses neutres. L'ordre des contextes a été tiré aléatoirement entre les participants et, pour un contexte donné, l'ordre des microgestes a également été tiré aléatoirement. La collecte des données a duré environ 45 minutes.

Nous avons recruté 10 participants (26,1 ans ± 2,92) qui effectuent leurs tâches d'interaction quotidiennes avec leur main droite. Quatre participants étaient biologiquement de sexe féminin et six de sexe masculin. Avant l'étude, nous nous sommes assurés que le gant convenait aux participants. Les utilisateurs ayant de petites mains ont été écartés parce que le gant glissait sur leur main, provoquant un décalage entre les capteurs situés sur les phalanges. Les utilisateurs ayant de grandes mains ont également été écartés si le gant limitait leurs mouvements en raison d'une résistance physique trop importante. 10 (participants) × 65-6 (combinaisons contexte × parties de la main) × 3 (répétitions) = 1770 points de données sans erreur ont été collectés. Nous avons aussi recueilli 252 points de données erronés.

7.2.2 Résultats

L'analyse de données suit les recommandations de « communication statistique juste en IHM » (fair statistical communication in HCI) [32]. Les taux de reconnaissance ont été agrégés par utilisateur en utilisant la moyenne, puis, si nécessaire, ils sont agrégés par contexte et/ou microgeste en utilisant la moyenne. Les scores de Likert sont agrégés avec la médiane pour une combinaison contexte \times microgeste donné.

Les **Intervalles de Confiance (IC)** indiqués sont des **IC** à 95 % calculés selon la formule $IC = 1,96 * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$, avec σ l'écart type et n la taille de l'échantillon considéré. Nous indiquons également la **Proportion de chevauchement (PDC)** [25] lorsque nous comparons deux **IC**, c.-à-d. la quantité de chevauchement divisée par la taille moyenne des moustaches des **IC** qui se chevauchent. En utilisant la recommandation 24 de Dragicevic [32], si $PDC < 0,25$, un raisonnement similaire à celui d'une p-valeur inférieure à 0,05 peut être utilisé.

Étant donné que notre protocole expérimental exigeait qu'un microgeste donné soit effectué dans une fenêtre de temps de 3 secondes, certains essais se sont terminés sans qu'aucun microgeste n'ait été reconnu. Comme nous ne pouvons pas différencier les essais dans lesquels les participants n'étaient pas prêts et ceux dans lesquels les participants ont tenté un microgeste mais aucun microgeste n'a été détecté, nous avons retiré ces essais (29 essais sur 1770 essais) pour la suite de l'analyse. Cependant, avant de le faire, nous avons d'abord validé le fait que ces essais jouent un rôle marginal dans les résultats. En incluant ces essais, le taux global de reconnaissance des microgestes est de 93,3 %, avec un **IC** de $\pm 1,3$ points, calculé pour 59 microgestes. Si l'on exclut ces essais, le taux global de reconnaissance des microgestes est de 94,3 %, avec un **IC** de $\pm 1,4$ points, calculé pour 59 microgestes. La **PDC** entre les deux **IC** est de 1,3. Il n'y a donc pas de différence apparente entre la prise en compte ou non de ces essais. Dans ce qui suit, les taux de reconnaissance moyens (ou la moyenne des scores de Likert médians), leur **IC** respectif et le nombre de points de donnée utilisés pour calculer la moyenne seront formatés comme suit : (94,3% \pm 1,4, $n = 59$).

La **Figure 7.4** présente les taux de reconnaissance moyens pour toutes les combinaisons contexte \times microgeste.

La **Figure 7.5** présente la médiane des scores de Likert (échelle de 1-difficile à 4-facile) pour toutes les combinaisons de contexte \times microgeste. Au total, le score de Likert médian moyen dans les 13 contextes est de (3,2 \pm 0,2, $n = 59$).

L'ensemble basé sur l'actionneur, voir fiche lecture (**section 11**), présente un taux de reconnaissance élevé, (94,3 % \pm 1,4, $n = 59$), le pire contexte en main occupée étant **Latéral Petit** (90 % \pm 1,4, $n = 4$), les meilleurs contextes en main occupée étant **Sphérique Grand** (97% \pm 4,0, $n = 5$) et **Crochet Petit** (97 % \pm 2,9, $n = 5$), qui ont un taux de reconnaissance similaire à celui de la **Main Libre** (99 % \pm 2,0, $n = 5$), les deux **PDC** étant inférieurs à -1,4. Ainsi, notre gant **DIY** peu coûteux est une solution viable pour les études des utilisateurs et nous permet d'effectuer des microgestes sur différents types de surfaces, c.-à-d. la surface de la main ou la surface de l'objet tenu. Cependant, le gant peut être

| Préhension | Taille | Tap ou press | | | | | Total |
|-------------|--------|--------------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | | Index | | Majeur | | Tous | |
| | | M ou B | Haute | M ou B | Haute | M ou B | |
| Main libre | | 100 | 100 | 100 | 98 | 95 | 99 |
| Cylindrique | Petit | 98 | 87 | 89 | 100 | 93 | 93 |
| | Grand | 91 | 98 | 95 | 98 | 92 | 95 |
| Sphérique | Petit | 95 | 93 | 95 | 100 | 94 | 95 |
| | Grand | 100 | 100 | 100 | 98 | 90 | 97 |
| Palmaire | Petit | × | 95 | × | 90 | 90 | 92 |
| | Grand | 95 | 98 | 94 | 98 | 85 | 94 |
| Terminale | Petit | × | 98 | × | 81 | 100 | 93 |
| | Grand | 98 | 100 | 85 | 95 | 83 | 92 |
| Latérale | Petit | 98 | 82 | × | 87 | 93 | 90 |
| | Grand | 100 | 93 | × | 89 | 100 | 95 |
| Crochet | Petit | 100 | 98 | 100 | 96 | 92 | 97 |
| | Grand | 100 | 89 | 89 | 96 | 88 | 92 |
| Total | | 98 | 94 | 94 | 94 | 92 | 94 |




FIGURE 7.4: Taux de reconnaissance moyen pour chaque microgeste dans un contexte spécifique. Les croix (×) représentent une combinaison impossible.

| Préhension | Taille | Tap ou press | | | | | Total |
|-------------|--------|--------------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | | Index | | Majeur | | Tous | |
| | | M ou B | Haute | M ou B | Haute | M ou B | |
| Main libre | | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Cylindrique | Petit | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 3.6 |
| | Grand | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3.2 |
| Sphérique | Petit | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3.4 |
| | Grand | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 | 3.4 |
| Palmaire | Petit | × | 4 | × | 3 | 2.5 | 3.2 |
| | Grand | 2.5 | 4 | 2 | 4 | 2.5 | 3 |
| Terminale | Petit | × | 4 | × | 2 | 3 | 3.0 |
| | Grand | 2 | 3 | 2.5 | 3 | 3 | 2.7 |
| Latérale | Petit | 3 | 3 | × | 3 | 3 | 3.0 |
| | Grand | 3 | 3 | × | 3 | 3 | 3.0 |
| Crochet | Petit | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3.4 |
| | Grand | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3.4 |
| Total | | 3.0 | 3.6 | 2.9 | 3.4 | 3.3 | 3.2 |

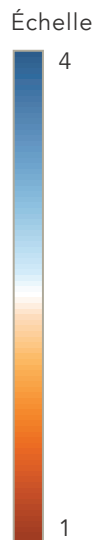


FIGURE 7.5: Médiane des scores de Likert pour chaque microgeste dans un contexte spécifique. Les croix (×) représentent une combinaison impossible.

simplifié. Nous avons 24 capteurs pour détecter la pression sur chaque phalange et la flexion de deux articulations par doigt. Pour détecter l'ensemble de microgestes basé sur l'actionneur, il pourrait être suffisant de placer les capteurs sur chaque phalange de l'index et du majeur et un capteur sur l'extrémité des autres doigts. Néanmoins, cet ensemble est hautement reconnaissable avec un gant de données et un reconnaisseur simple.

Pour aller plus loin, nous avons souhaité voir si la [préhension](#) peut être reconnue avec le même gant. Ceci permettrait d'utiliser les microgestes et la [préhension](#) comme éléments du vocabulaire d'entrée comme déjà étudié dans la littérature [106, 92]. Par exemple, Song et al.[106] utilise la [préhension](#) pour changer de mode et ainsi modifier les commandes associées aux microgestes.

7.3 Taux de reconnaissance de la [préhension](#)

Dans cette section, nous présentons d'abord une collecte de données pour concevoir un reconnaisseur permettant de détecter nos différents contextes de [préhension](#) ainsi que la main libre. Ensuite, nous présentons une évaluation de ce reconnaisseur. La collecte de données est inspirée de celle de Heumer et coll. [54] qui ont testé différents algorithmes d'apprentissage automatique pour la reconnaissance des [préhensions](#) de Schlesinger avec un gant de données.

7.3.1 Protocole

Nous avons réutilisé les 13 contextes des études précédentes ainsi que le gant [DIY](#). En outre, nous avons imposé la manière dont les saisies ont été effectuées de façon à respecter l'analyse des [DV](#) décrite dans la [section 3.4](#). Pour chaque objet, la collecte de données est divisée en deux parties. Dans un premier temps, les participants devaient saisir l'objet 8 fois avec la main à partir d'une position contrôlée, c.-à-d. la main reposant à plat sur la surface de la table. Dans un second temps, les participants devaient saisir l'objet 8 fois à partir de n'importe quelle position de départ. Pendant que le participant tient l'objet, l'expérimentateur appuie sur une touche d'un clavier pour enregistrer les données du gant. Les données collectées représentent les valeurs de chaque capteur du gant à un instant t . L'utilisation d'un déclencheur manuel a permis d'enregistrer une main immobile. De plus, pour chaque participant, nous avons enregistré 16 positions différentes en main libre. Les participants étaient libres de choisir ces différentes positions main libre. L'ordre d'enregistrement des [préhensions](#) et des positions de la main libre est aléatoire entre les participants. La collecte des données a duré en moyenne 40 minutes.

Nous avons recruté 10 participants (34, 1ans \pm 13, 19), tous droitiers. 5 était biologiquement de sexe féminin et 5 de sexe masculin

10 (participants) \times 13 (objets + main libre) \times 16 (enregistrements) = 2080 points de données ont été collectés.

7.3.2 Modèle de classification

Afin de reconnaître les différents contextes, nous cherchons à entraîner des modèles de classification pour les 12 [prévisions](#). Nous présenterons par la suite la reconnaissance de la main libre.

Nous avons testé trois modèles de classification du projet `mljs`¹ pour l'apprentissage automatique en javascript : KNN², SVM³ et naive-bayes⁴. Les paramètres de chaque modèle ont été laissés à leurs valeurs par défaut pour une utilisation « prête à l'emploi », comme dans l'étude de Heumer et coll. [54].

Chaque modèle a été testé dans trois conditions : `[participant]` modèle entraîné et testé avec les données d'un seul participant, c.-à-d. un classifieur par participant, `[mixte]` modèle entraîné et testé avec les données de tous les participants, `[séparé]` modèle entraîné avec les données d'un sous-ensemble aléatoire de participants (70%) et testé avec les données restantes (30%).

Nous considérons donc deux facteurs : `Modèle` et `Condition`.

7.3.3 Taux de reconnaissance des douze [prévisions](#)

Nous utilisons la méthode standard de validation croisée partielle. Pour chaque combinaison `Modèle` et `Condition`, nous sélectionnons au hasard 70% des données pour l'entraînement des modèles et calculons le taux de reconnaissance sur les 30% de données restantes. Les résultats présentés sont les moyennes de ces 3000 répétitions.

La [Figure 7.6](#) présente les taux de reconnaissance et les `IC` à 95% (`IC`) pour les différentes conditions. Les taux de reconnaissance sont les suivants :

| Modèle | <code>participant</code> | <code>mixte</code> | <code>séparé</code> |
|-------------|--------------------------|--------------------|---------------------|
| KNN | 80,4% ±0,6 | 88,7% ±0,1 | 51,6% ±0,6 |
| SVM | 17,1 % ±0,7 | 17,1% ±0,1 | 17,1% ±0,1 |
| Naive-Bayes | 45,8% ±2,8 | 22,1% ±0,2 | 20,1% ±0,4 |

Dans l'ensemble, le modèle KNN arrive toujours en tête (en gras dans le tableau précédent) quelles que soient les conditions, le meilleur taux de reconnaissance étant obtenu avec la condition `[mixte]`. Nous avons donc décidé d'utiliser le classifieur KNN pour la reconnaissance des 12 [prévisions](#) et y intégrons la reconnaissance d'une position de main libre, c.-à-d. d'une main qui n'est pas dans une [préhension](#).

7.3.4 Détection du contexte main libre

Une main dans une [préhension](#) spécifique varie très peu, surtout si nous considérons différentes tailles d'objets comme dans notre ensemble ou dans GRASP [54]. Cependant, pour une pose main libre, de nombreuses poses statiques différentes

1. <https://github.com/mljs>
 2. <https://www.npmjs.com/package/ml-knn>
 3. <https://www.npmjs.com/package/ml-svm>
 4. <https://www.npmjs.com/package/ml-naivebayes>

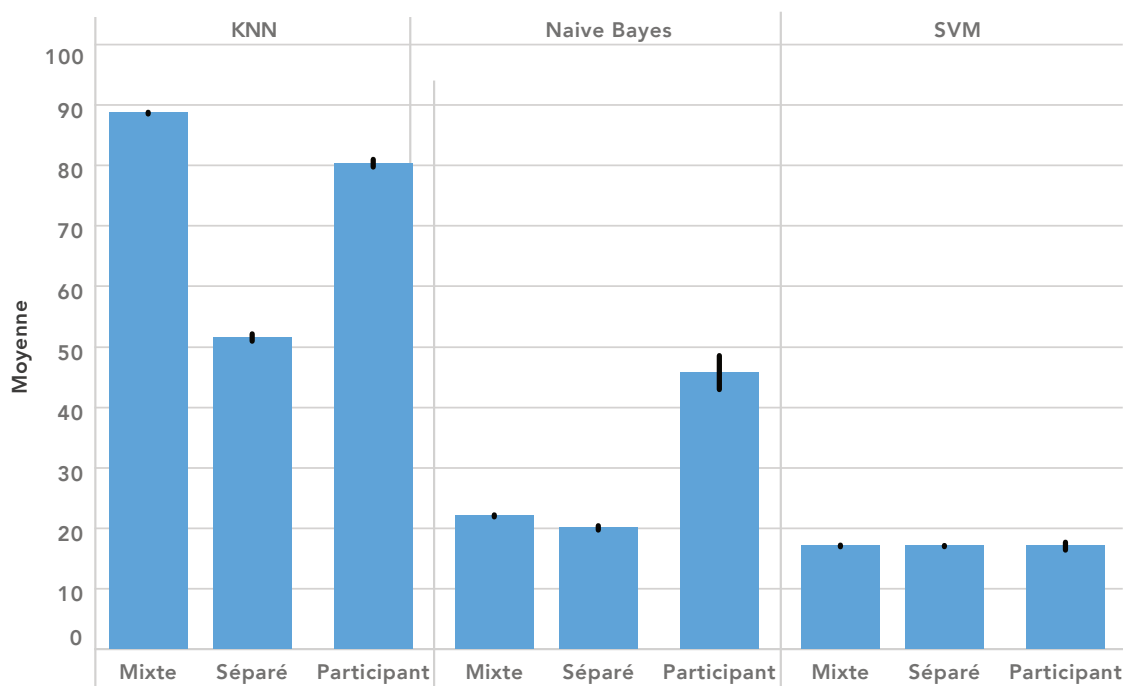


FIGURE 7.6: Reconnaissance moyenne des [préhensions](#), sur 3000 cycles d'entraînement et de test avec KNN, Naive Bayes et SVM, dans les trois conditions. Les [IC](#) pour les conditions [mixte] et [séparé] sont calculés sur 3000 cycles. Les [IC](#) pour la condition [participant] sont calculés sur le taux de reconnaissance moyen après les 3000 cycles par participant.

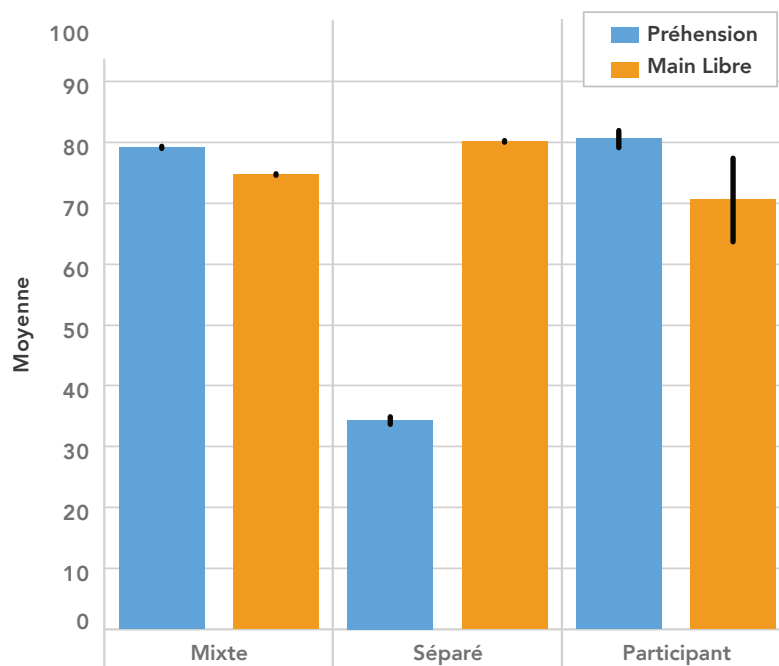


FIGURE 7.7: Reconnaissance moyenne des [prévisions](#) et de main libre, sur 3000 cycles d'entraînement et de test avec notre KNN modifié dans les trois conditions. Les **IC** pour les conditions [**mixte**] et [**séparé**] sont calculés sur 3000 cycles. Les **IC** pour la condition [**participant**] sont calculés sur le taux de reconnaissance moyen après les 3000 cycles par participant.

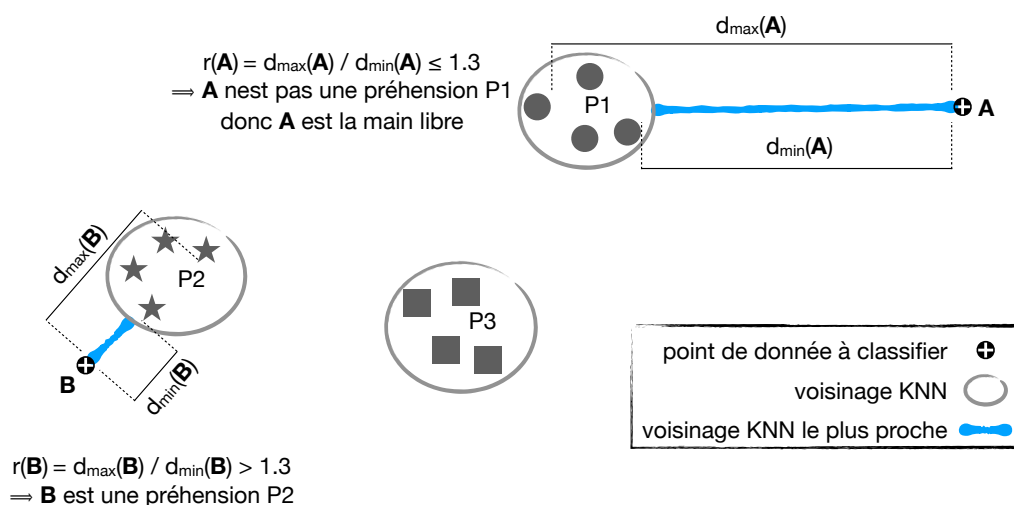


FIGURE 7.8: Reconnaissance d'une pose en main libre à l'aide du voisinage le plus proche (*K-nearest neighborhood*). Pour un point de données A , le classifieur KNN lui attribue une **préhension** potentielle P correspondant au voisinage V . Pour savoir si le point A est assez loin du voisinage V pour être classé comme la main libre, nous utilisons une métrique sans unité. Cette métrique est le rapport de la distance de A au point le plus éloigné dans V sur la distance de A au point le plus proche dans V . Si la métrique est inférieure ou égale à 1.3, alors A est reconnu comme la main libre. Autrement, A est reconnu comme la **préhension** P .

de la main peuvent être considérées comme main libre. Nous avons donc choisi de définir la main libre comme une absence de **préhension**, c.-à-d. que si le modèle ne peut pas décider d'une **préhension** spécifique, il le marquera comme la main libre.

Pour détecter si un point de données est une pose main libre, nous utilisons d'abord le modèle KNN pour déterminer le voisinage de la **préhension** le plus proche. Une fois la détection effectuée, nous calculons les distances la plus courte et la plus longue d_{\min} et d_{\max} entre le point de données et les points du voisinage déterminé. Nous calculons ensuite le rapport $r = d_{\max}/d_{\min}$ et le comparons à un seuil empirique de 1,3 pour décider : si r est inférieur au seuil, la pose actuelle est classée comme une pose main libre, sinon elle est classée comme appartenant au voisinage déterminé. Ce rapport est sans unité et ne dépend pas des valeurs brutes. La **Figure 7.8** résume la méthode. Notons que nous avons choisi cette méthode pour sa généralisation possible aux approches SVN et naive-bayes.

7.3.5 Taux de reconnaissance des douze **préhensions** et de la main libre

En suivant la méthode présentée ci-dessus, nous avons calculé pour les trois conditions, **participant**, **mixte** et **séparé**, le taux de reconnaissance de la main libre, et nous avons recalculé le taux de reconnaissance des **préhensions**. Les taux de reconnaissance pour le modèle KNN sont les suivants :

| | participant | mixte | séparé |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| préhension | 80,4% \pm 1,4 | 79,2% \pm 0,2 | 34,3% \pm 0,6 |
| main libre | 70,5% \pm 6,9 | 75,7% \pm 0,1 | 80,2% \pm 0,1 |

La **Figure 7.7** présente les résultats pour les différentes conditions. Si nous considérons les deux moyennes (pour les **préhensions** et la main libre), le meilleur taux de reconnaissance est obtenu avec la condition **mixte**.

7.4 Conclusion

Nous avons présenté deux systèmes de reconnaissance, un pour les microgestes et un pour les contextes, basés sur notre gant **DIY**. Les microgestes sont correctement reconnus 94% du temps. En revanche, les contextes sont reconnus, sans considérer la main libre, 88,7% du temps dans les meilleures conditions. Ce score est bien inférieur à celui de Heumer et coll. [54], 98,85% du temps dans les meilleures conditions. Ceci peut s'expliquer de deux façons. Premièrement, le type d'algorithme à apprentissage automatique est différent. Deuxièmement, la qualité des données de notre gant **DIY** est plus faible, en particulier pour nos capteurs de flexion, que ceux d'un gant industriel, comme celui utilisé par Heumer et coll. [54]. Toutefois, nous souhaitons avoir des informations de pression et de flexion. Or, aucun dispositif dans le commerce ou dans les travaux de la littérature en microgestes ne fournissait ces deux informations en même temps. Ainsi, il était impératif de construire notre propre système de captation. Au final, le gant et le système de reconnaissance sont utilisables pour la reconnaissance des microgestes mais doivent être améliorés pour permettre une détection satisfaisante des contextes et ainsi permettre d'étudier des scénarios avec les contextes et les microgestes en vocabulaire d'entrée.

Pour faciliter le développement d'un meilleur système de captation et de reconnaissance des microgestes et du contexte, nous proposons dans le chapitre qui suit un système modulaire basé sur μ Glyphe.

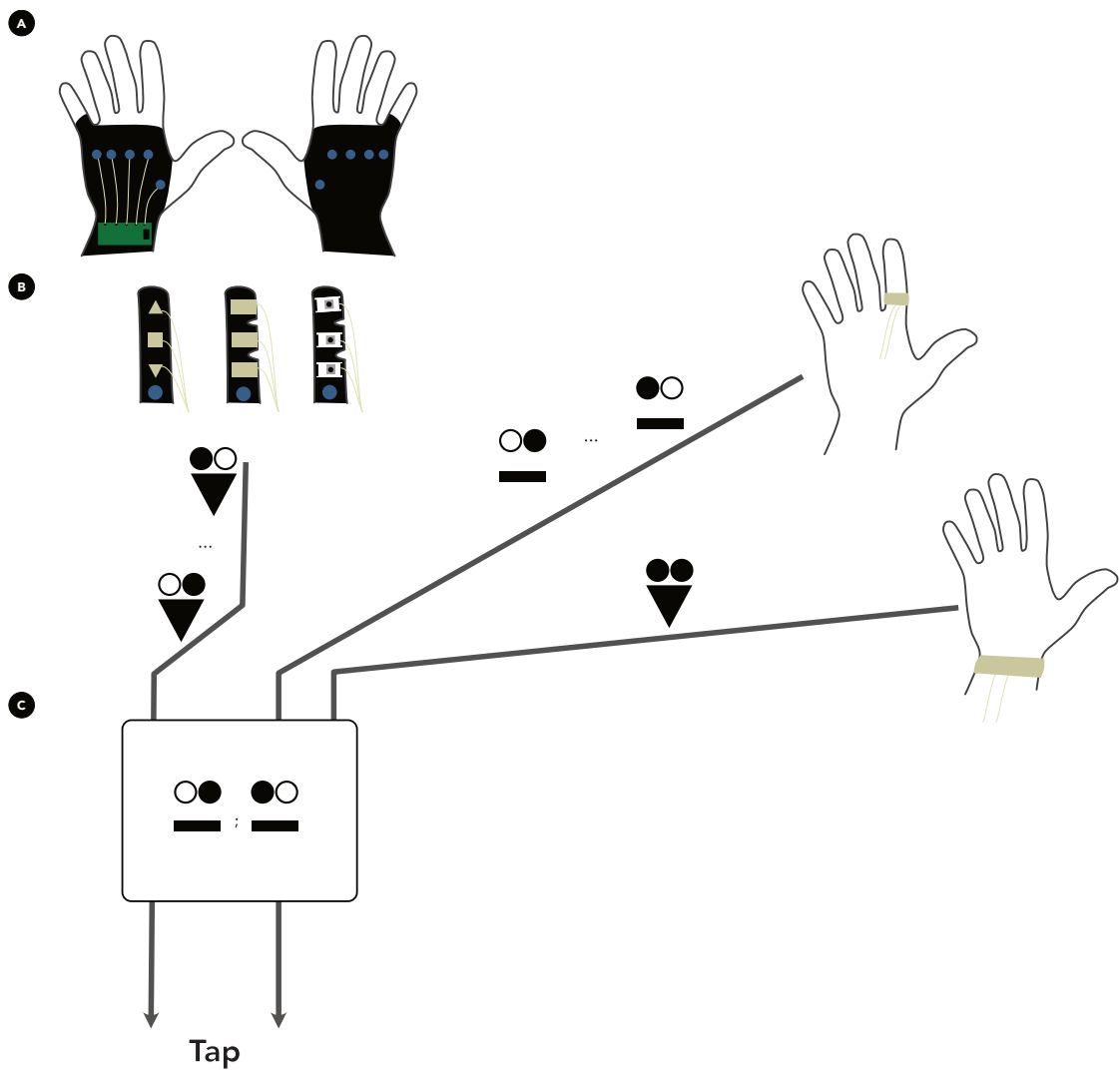


FIGURE 8.1: Système de captation et de reconnaissance modulaire de microgestes. A) Mitaine sur laquelle plusieurs manchons peuvent être attachés. B) Manchons avec différents types de capteurs. C) Serveur de microgestes basé sur μ Glyphe pour unifier les différents systèmes de captation et reconnaissance.

Chapitre 8

Vers un système de captation et reconnaissance modulaire basé sur μ Glyphe

Au cours des expérimentations avec des systèmes de captation et reconnaissance de microgestes, nous avons constaté que chaque système a ses avantages et ses inconvénients. D'un côté, un système avec des capteurs de symboles μ Glyphe et un algorithme de reconnaissance simple est facile à mettre en place. Cependant, cette approche nécessite souvent l'utilisation d'un gant qui limite la perception tactile de l'utilisation et l'utilisation des microgestes dans un contexte du quotidien. D'un autre côté, un système avec des capteurs d'expression μ Glyphe et un algorithme d'apprentissage automatique nécessite la collecte d'une grande quantité de données pour reconnaître les microgestes, un système qui est donc plus exigeant à mettre en place. Cependant, cette approche permet l'utilisation d'exosquelette, bague ou bracelet qui sont moins encombrants qu'un gant. De plus, les types de capteurs ont des impacts différents sur le retour haptique et le confort. Ce chapitre est une proposition de réponse aux problèmes d'ingénierie rencontrés pendant ces travaux. Nous proposons un gant modulaire, permettant de changer facilement les types de capteurs et reconnaisseurs en fonction du contexte, et un serveur de microgestes basé sur μ Glyphe, pour unifier les différents systèmes de captation et de reconnaissance ([Figure 8.1](#)).

8.1 Gant modulaire

Le gant modulaire proposé se compose d'une mitaine à laquelle peuvent être connectés différents manchons. La mitaine contient la carte embarquée du gant, qui lit les valeurs des capteurs contenus dans les manchons, les traite et communique avec un autre dispositif, p. ex. un ordinateur. Chaque manchon peut être équipé de différents capteurs ce qui permet de tester facilement différents capteurs et différentes combinaisons de capteurs en fonction des microgestes à reconnaître.



FIGURE 8.2: À gauche, Patron de la mitaine pour le gant en kit. Les rectangles de couleur représentent les bandes de velcro™(crochet, boucle). Les zigzags verts montrent la couture à effectuer pour coudre la mitaine. Les ronds bleus représentent les boutons pressions. À droite, photo de la mitaine du gant en kit.

8.1.1 Assemblage

La Figure 8.2 montre la mitaine. La mitaine s'enfile par l'auriculaire. Ensuite, à l'aide de deux bandes Velcro™, l'utilisateur peut fermer la mitaine au niveau du pouce, en adaptant la largeur de la mitaine à sa morphologie. Pour maintenir le gant en place sans entraver le mouvement des doigts, les manchons et la mitaine sont fabriquées en Lycra™. Ce tissu est extensible et fin, ce qui permet au gant de s'ajuster à la main et de limiter la sensation d'encombrement comme celle ressentie avec notre gant *Do-It-Yourself* (DIY). De plus, contrairement au coton, ce tissu ne s'effiloche pas, si bien qu'il n'est pas nécessaire de prévoir des revers sur les bords. Par conséquent, les bords sont plus fins qu'avec le coton (une seule couche de tissu sans revers contre deux à trois couches avec un revers) ce qui contribue aussi à limiter la sensation d'encombrement.

Le patron de la mitaine est montré à la Figure 8.2. Le patron peut être utilisé avec une Cricut¹ pour faciliter la découpe de la mitaine. Une fois coupée, la mitaine est facilement assemblée en cousant le long du petit doigt, comme le montre la Figure 8.2, ainsi qu'en cousant les bandes de velcro aux endroits marqués. Enfin, il faut positionner les boutons pressions sur le dos et la paume de la main. Le Lycra étant extensible et fin, il faut renforcer le gant à l'endroit des boutons pressions à l'aide d'un tissu coton double épaisseur. Ces boutons permettent d'attacher les manchons comme présenté à la Figure 8.3.

1. <https://cricut.com/fr-fr/>

8.1.2 Manchons

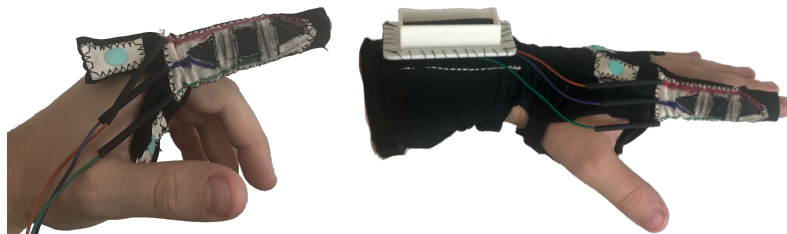


FIGURE 8.3: À gauche, photo du manchon co-fabriqué avec Gauthier Faisandaz. À droite, photo du manchon attaché à la mitaine.

Un premier manchon a été co-fabriqué avec Gauthier Faisandaz pour son étude sur l'interaction tactile augmentée par des microgestes pour les personnes avec une déficience visuelle [36]. Ce manchon dispose de trois capteurs de contact capacitifs (condensateur variable, [sous-section 5.1.1](#)) positionnés sur chaque phalange du doigt. Ce manchon est utilisé sur l'index. Pour aider les utilisateurs, une forme géométrique en plastique est collée sur la face inférieure de chaque capteur, de manière à ce qu'il puisse être facilement identifié lorsque le pouce passe sur l'index. Le bout de l'index n'est pas recouvert par le tissu pour permettre d'interagir avec une tablette tactile et de ne pas affecter la sensation de toucher et contact de ce doigt. La [Figure 8.3](#) montre ce manchon.

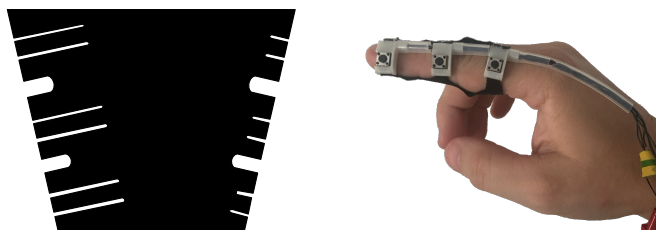


FIGURE 8.4: À gauche, patron de découpe du manchon. À droite, photo du manchon avec boutons-poussoirs. Manchon co-fabriqué avec Michael Ortega.

Un deuxième manchon a été co-fabriqué avec Michael Ortega dans le cadre d'une étude sur les microgestes dans un contexte sportif, comme la course à pied ou le cyclisme. Ce manchon, porté sur l'index, dispose de trois boutons-poussoirs, un par phalange du doigt. Ces boutons permettent un retour haptique quand le pouce glisse sur l'index et quand le pouce appuie sur un des boutons positionnés sur les phalanges. Les boutons-poussoirs sont positionnés sur un support imprimé en 3D. Le support est ensuite cousu sur le manchon. Pour ce faire, nous avons conçu un manchon sur lequel trois languettes permettent de glisser ces supports. Les languettes sont ensuite refermées sur le dessus du doigt pour maintenir le support en place à l'aide d'une couture. Le patron de ce manchon et le manchon final sont présentés à la [Figure 8.4](#).

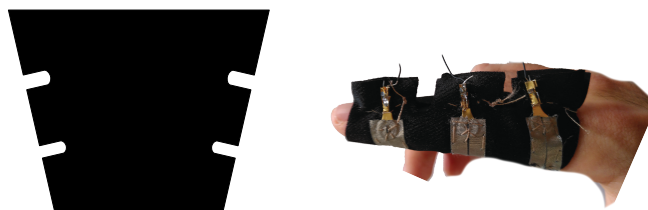


FIGURE 8.5: À gauche, patron de découpe du manchon. À droite, photo du manchon avec des capteurs capacitifs.

Un troisième manchon a été fabriqué avec trois capteurs de contact capacitifs (condensateur variable, [sous-section 5.1.1](#)), également un par phalange. Les capteurs capacitifs sont constitués de morceaux de scotch en tissu conducteur². Pour éviter que les capteurs ne se décollent lors d'un glissement du doigt dessus, une couture en point avant est réalisée sur le contour du capteur. Le modèle de ce manchon et le manchon final sont présentés à la [Figure 8.5](#).

Pour ces deux derniers manchons, ils sont conçus de sorte que la couture se trouve sur le dessus du doigt afin d'éviter toute gêne lorsque l'index frotte contre le majeur pour se déplier. Cependant, nous avons délibérément laissé un espace sans couture au-dessus de chaque articulation pour éviter toute gêne lors de la fermeture du doigt.

Ces manchons et leurs dérivés seront utilisés dans le projet ANR MIC³ (2022-2026) dédié à l'interaction reposant sur les microgestes pour différents types d'application.

8.2 Serveur μ Poly

Il existe un grand nombre de capteurs et de systèmes de détection différents dans la littérature. Chacun de ces systèmes utilise ses propres événements. Pour cette raison, il est difficile pour un utilisateur de changer facilement de périphérique d'entrée pour son application. Le gant modulaire présenté ci-dessus est une solution matérielle pour accommoder la grande variété de capteurs, chaque manchon pouvant contenir des capteurs de types variés. Il est de plus facile de changer un manchon avec un branchement aisé et rapide pour considérer d'autres types de capteurs. Cette solution matérielle ne résout pas l'entièreté du problème lié à l'hétérogénéité des capteurs et systèmes de reconnaissance. Comme exposé dans les deux chapitres précédents ([chapitre 6](#) et [chapitre 7](#)), il existe un grand nombre de capteurs et de systèmes de reconnaissance différents. Chacun de ces systèmes utilise une structure événementielle ad-hoc. Pour cette raison, il est difficile de changer de dispositifs de captation et de reconnaissance pour une application donnée.

2. <https://www.adafruit.com/product/3960>

3. <https://mic.imag.fr>

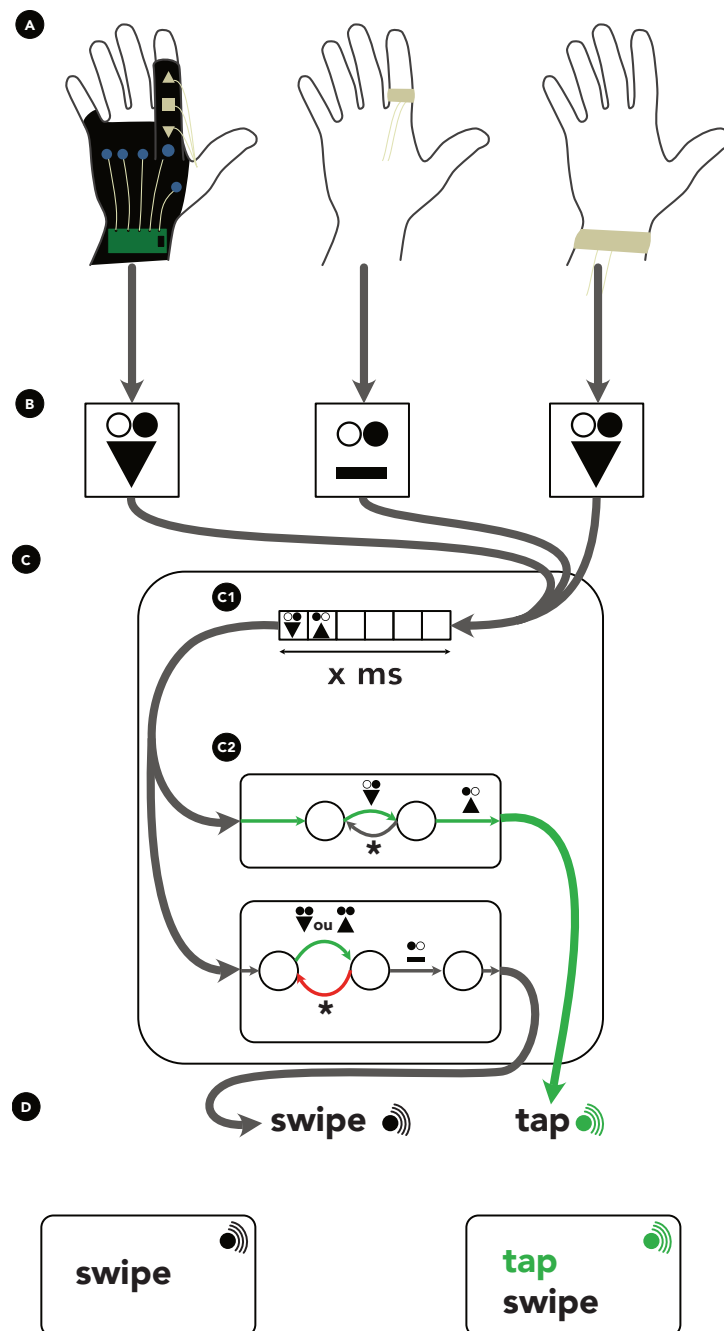


FIGURE 8.6: Vue d'ensemble du serveur μ Poly. A) Ensemble varié de capteurs et de reconnaisseurs dédiés à la captation et reconnaissance de microgestes. B) Chaque système de captation/reconnaissance envoie des événements représentant un microgeste élémentaire sous sa forme μ Glyphe. C) Serveur μ Poly. C1) Liste tampon permettant de garder en mémoire les événements microgestes élémentaires des x dernières millisecondes. C2) Ensemble des microgestes sous forme μ Glyphe à reconnaître, chacun étant représenté par une machine à état. D) Envoi du microgeste reconnu aux applications écoutant ce microgeste.

Face à cette hétérogénéité au niveau logiciel, nous proposons d'utiliser μ Glyphe comme langage intermédiaire pivot entre d'une part les dispositifs de captation et reconnaissance, et d'autre part les applications clientes. Pour ce faire, nous avons mis en place le serveur μ Poly (prononcé « micro » poly), un serveur de microgestes qui repose sur une structure événementielle d'échange reposant sur μ Glyphe.

8.2.1 Architecture logicielle

La [Figure 8.6](#) présente une vue d'ensemble du fonctionnement du serveur. La première étape pour unifier les dispositifs de captation et les systèmes de reconnaissance d'entrée est d'avoir un langage commun ou pivot. Pour ce faire, nous utilisons μ Glyphe. Ainsi, chaque système de captation et reconnaissance fournit des événements représentant la description μ Glyphe d'un microgeste élémentaire (voir feuille de lecture ou [Figure 2.5](#)), comme le montre la [Figure 8.6B](#). Nous fixons ainsi le niveau d'abstraction des entrées au serveur μ Poly à des microgestes élémentaires, c.-à-d. des microgestes décrits sans opérateur de composition et donc correspondant à un mouvement élémentaire unique.

Ces événements sont transmis au serveur μ Poly et sont placés dans une liste tampon d'événements ([Figure 8.6C1](#)). Cette liste tampon contient les événements reçus par le serveur au cours des x dernières millisecondes. Ensuite, à l'aide de cette liste, le serveur vise à composer les microgestes élémentaires pour obtenir les microgestes définis par le concepteur ou l'utilisateur d'une application interactive ([Figure 8.6C2](#)). Nous pouvons faire le parallèle avec les moteurs de fusion pour l'interaction multimodale dont l'objet est de fusionner des unités élémentaires pour obtenir des événements attendus par une application interactive [91]. Les microgestes définis par le concepteur ou l'utilisateur final définissent les actions possibles pour interagir avec une application et seront donc associés à un traitant d'événement dans l'application. Ces microgestes sont représentés par leur description μ Glyphe. Ainsi, reconnaître un microgeste consiste à parcourir une machine à état, représentant la description μ Glyphe à reconnaître, avec les événements présents dans la liste tampon. Le serveur maintient une machine à état par description μ Glyphe à reconnaître.

Lorsque le parcours de la machine à état échoue, c.-à-d. qu'un microgeste n'est pas reconnu, la machine à état revient à son état initial. Si le parcours réussit, le microgeste est alors reconnu. Dans ce cas, le serveur envoie l'événement du microgeste reconnu aux applications qui se sont inscrites pour écouter ce microgeste.

8.2.2 Réalisation logicielle

Une preuve de concept du serveur a été réalisé en nodeJS⁴. Les systèmes de captation et reconnaissance communiquent avec le serveur via le port sériel. Ils envoient une chaîne de caractères représentant un objet JSON qui décrit une

4. <https://nodejs.org>

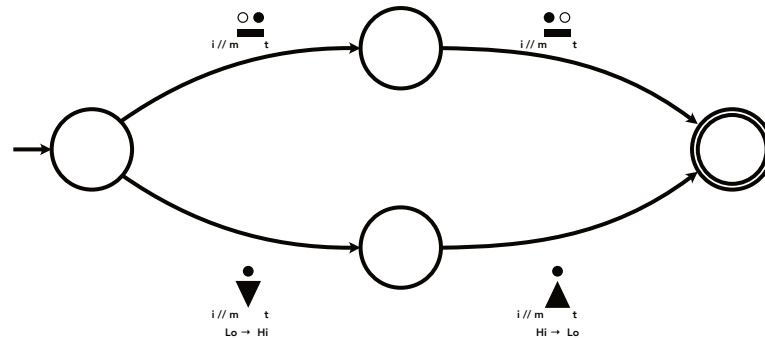


FIGURE 8.7: Exemple de machine à état maintenue par μ Poly. Cette machine à état représente le microgeste multi-doigts de l'ensemble basé sur l'actionneur : $\left(i//m \overset{\circ\circ}{\nabla} t ; i//m \overset{\circ\circ}{\blacktriangle} t \right) | \left(i//m \overset{\bullet}{\nabla} t ; i//m \overset{\bullet}{\blacktriangle} t \right)_{\substack{lo \rightarrow hi \\ hi \rightarrow lo}}$.

description μ Glyphe d'un microgeste élémentaire. La Figure 8.8 présente un exemple d'objet JSON.

Pour faciliter la spécification des microgestes à reconnaître, avec leur nom associé, ainsi que la taille de la liste tampon, nous avons créé une interface graphique écrite en Vue.JS⁵ (Figure 8.9). L'interface graphique pour spécifier les microgestes à reconnaître réutilise l'éditeur graphique de μ Glyphe présenté dans le μ Dex (section 2.7).

Enfin, les microgestes reconnus sont transmis aux applications via [websockets](#). Les structures JSON représentant une description μ Glyphe d'un microgeste non élémentaire peuvent devenir très complexes. Ainsi, les microgestes reconnus sont transmis sous un format simplifié inspiré de la structure des événements souris en javascript. La Figure 8.10 présente un exemple d'événement envoyé par le serveur.

```

1 {
2   "type": "glyph",
3   "action": "Flexion",
4   "context": ["Air", "Contact"],
5   "actuator": [["t"]],
6   "phalanx": [[{"side": "f", "segment": "m"}]],
7   "contact": {
8     "type": "contact",
9     "actuator": [["i"]],
10    "phalanx": [[{"side": "f", "segment": "t"}]],
11  }
12 }
13 }
```

FIGURE 8.8: Exemple de fichier JSON représentant une description μ Glyphe. Ici, le microgeste élémentaire représenté est ${}_t \overset{\bullet}{\nabla}_m (i \bullet_t)$

5. <https://vuejs.org>

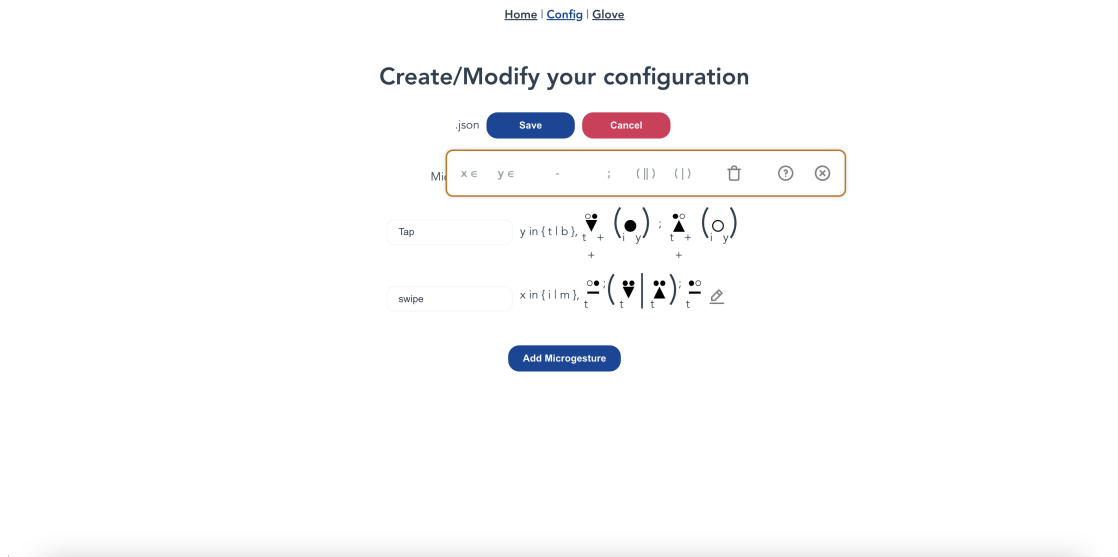


FIGURE 8.9: Capture d'écran de l'interface utilisateur pour spécifier les microgestes à reconnaître ainsi que leur durée pour le serveur μ Glyphe

```

1 {
2   type: 'microgesture',
3   content: {
4     providerType: 'glove',
5     providerId: 42,
6     timestamp: 10000000,
7     name: x,
8     actuator: '',
9     phalanx: '',
10    contact: {
11      actuator: '',
12      phalanx: ''
13    }
14  }
15 }

```

FIGURE 8.10: Évènement émis par le serveur μ Poly lorsque le microgeste x est reconnu.

Le gant modulaire et le serveur μ Poly sont toujours en cours d'amélioration et d'évaluation dans le cadre du projet ANR MIC⁶. Aussi dans le chapitre suivant dédié à un cas d'usage des microgestes, nous n'avons pas utilisé la solution matérielle et logicielle présentée dans ce chapitre. Le chapitre suivant est dédié à la sélection 3D en [Réalité Augmentée \(RA\)](#) et l'interaction repose sur des microgestes qui sont captés par le gant *Off-The-Shelf* (OTS) décrit dans la [sous-section 6.1.1](#).

6. <https://mic.imag.fr>

Troisième partie

Microgestes pour la sélection 3D en Réalité Augmentée (RA)

Pointer et sélectionner une cible est une tâche omniprésente dans les interfaces graphiques 2D et 3D. Faciliter le pointage est donc un sujet de recherche important et actif dans le domaine de l'Interaction Humain-Machine (IHM). Les chercheurs ont proposé de nombreuses techniques pour rendre le pointage plus rapide et plus précis. Cependant, après plus de vingt ans de recherche sur les techniques de sélection 3D pour la [Réalité Mixte \(RM\)](#), les casques commerciaux pour la [Réalité Augmentée \(RA\)](#), p. ex. l'HoloLens 2, ou pour la [Réalité Virtuelle \(RV\)](#), p. ex. l'Oculus ou le HTC Vive, utilisent toujours un pointeur virtuel (*raycasting*) dirigé par le bras ou des contrôleurs qui ne sont pas adaptés aux objets distants et/ou petits, ni aux environnements denses avec des objets partiellement ou totalement occultés. De plus, l'utilisation du bras pour pointer les cibles entraîne une fatigue et un inconfort, un effet connu sous le nom de « bras du gorille » [55].

En [RM](#), certains microgestes sont déjà utilisés par des pointeurs virtuels. Dans l'HoloLens 2, après avoir pointé avec l'avant-bras, un **air tap** [*tap*] est utilisé pour confirmer la sélection. De même, dans Gaze+Pinch[95], après avoir regardé un objet, un geste de **pincement** est utilisé pour confirmer la sélection. Toutefois, ces deux techniques ne tirent pas pleinement partie de l'expressivité de la modalité microgeste. L'utilisation d'un ensemble plus conséquent de microgestes pourrait permettre de faciliter la sélection d'objets distants et/ou petits, ce que ne permettent pas ces deux techniques. De plus, les microgestes permettent d'interagir avec le bras le long du corps, évitant le « bras du gorille » et réduisant ainsi l'impact au niveau de la fatigue physique.

L'utilisation de plusieurs **taps** du pouce sur les doigts a déjà été combinée avec le regard pour la sélection en 2D de cibles éparses affichées sur un écran de poste de pilotage et a induit moins de fatigue que l'utilisation de contrôleurs physiques dans le poste de pilotage [117]. Dans cette partie, nous allons explorer si cette combinaison peut être utilisée pour la sélection 3D en [RM](#).

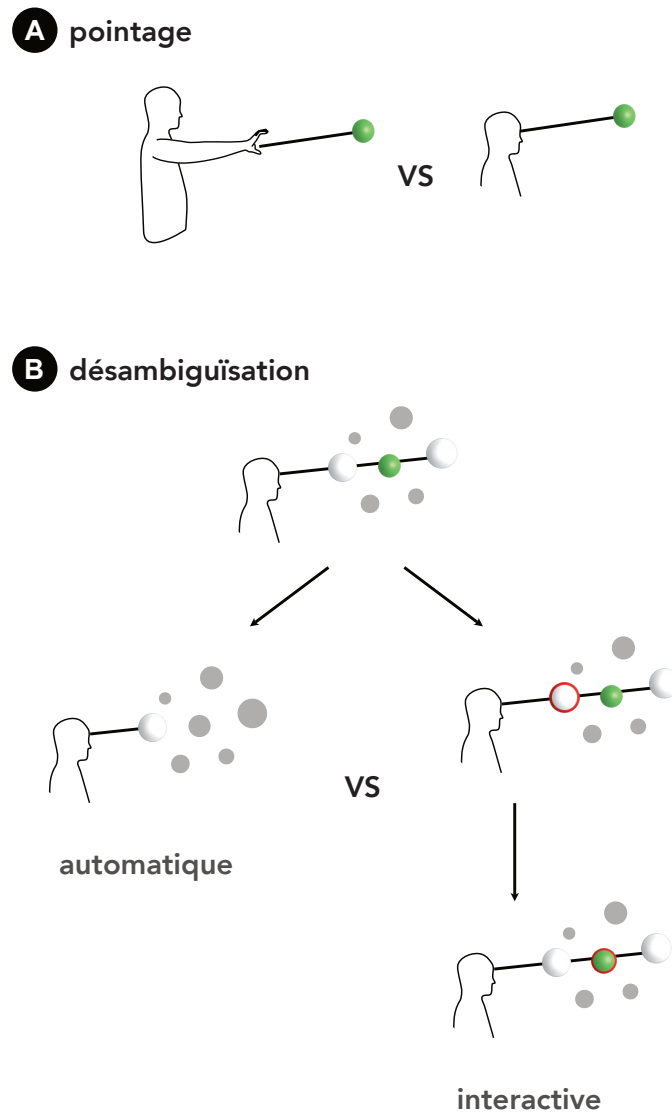


FIGURE 9.1: Techniques de sélection 3D. **A)** Exploration des modalités de pointage. **B)** Exploration des mécanismes de désambiguïisation.

Chapitre 9

Techniques de selection 3D existantes

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur les techniques de sélection 3D. Nous présentons d’abord différentes modalités de pointage, puis les mécanismes de désambiguïsation qui constituent deux composantes d’une technique de sélection 3D (Figure 9.1). Nous explorons ensuite comment concevoir une technique de sélection 3D en deux étapes utilisant la modalité microgeste.

9.1 Sélection 3D

Cette section est structurée selon la division d’une tâche de sélection en deux phases comme étudiée par Delamare et coll. [27] : une phase de pointage (c.-à-d. comment pointer des cibles) et une phase de désambiguïsation (c.-à-d. comment identifier une cible parmi plusieurs pointées). Les tables Table 9.1 et Table 9.2 présente une vue d’ensemble des techniques de sélection 3D présentées dans ce chapitre.

9.1.1 Modalités de pointage

Pour pointer une cible, il faut un outil de pointage que le système peut reconnaître. Il en existe différents types, des outils physiques jusqu’à des parties du corps de l’utilisateur. Les casques *Réalité Virtuelle (RV)* commerciaux, tels que l’Oculus¹ ou le HTC Vive², utilisent un contrôleur pour sélectionner des objets 3D et interagir avec eux. Les contrôleurs sont des dispositifs tenus par les utilisateurs. Les contrôleurs intègrent des boutons, des pavés tactiles et/ou des joysticks. Il existe d’autres types de contrôleurs, notamment les stylos [115]. Myopoint [51] utilise l’avant-bras, équipé d’un bracelet Myo pour mesurer l’électromyographie et l’orientation 3D (à l’aide de centrale à inertie), pour pointer sur un grand écran distant. L’HoloLens 2³ et le Magic Leap 2⁴, deux des casques *Réalité Mixte (RM)*

1. <https://www.oculus.com/>
2. <https://www.vive.com/fr/>
3. <https://www.microsoft.com/en-us/hololens/>
4. <https://www.magicleap.com/magic-leap-2>

les plus récents, détectent la direction de l'avant-bras de l'utilisateur, à l'aide de caméras sur le casque, pour pointer des objets et un microgeste de la main pour valider la sélection. Ces techniques de sélection nécessitent une interaction en l'air qui peut entraîner une fatigue et un inconfort du bras, un effet secondaire appelé *bras du gorille* [55]. Toutefois, cette fatigue peut ne pas apparaître lors de courtes interactions avec uniquement l'avant-bras et non le bras complet levé [130]. Néanmoins, aucune technique reposant uniquement sur l'interaction en l'air ne permet une interaction prolongée avec une faible fatigue physique. C'est pourquoi des études ont exploré d'autres moyens tels que la tête ou les yeux comme outils de pointage.

La direction de la tête [24, 86] et des yeux [61] sont étudiées depuis longtemps pour l'interaction en 3D. Des études [62, 12] les comparant ont montré que pointer de la tête est plus stable, mais plus lent que pointer avec les yeux. Ces deux études [62, 12] ont cependant des résultats opposés sur la préférence des utilisateurs. Au contraire, Qian et coll. [96] ont trouvé que les yeux sont plus lents que la tête en RV. Néanmoins, dans la plupart de ces études [96, 62], les auteurs discutent de l'impact potentiel de la faible précision du dispositif de suivi oculaire sur les performances du pointage. Outre les limitations matérielles et logicielles de suivi, les limitations de l'œil humain, telles que l'acuité visuelle, les mouvements involontaires de l'œil, la dérive ou les saccades [124], réduisent la précision du pointage pour la sélection des objets. Ces problèmes semblent être exacerbés pour les personnes atteintes d'amblyopie⁵ [23]. Puisque la sélection d'une cible exige que nous la regardions d'abord [126], les yeux sont, en théorie, l'outil de pointage le plus rapide. En outre, lors de la saisie de textes en RV [50], l'utilisation des yeux était moins exigeante physiquement que l'utilisation de la tête comme outil de pointage. De ce fait, nous utilisons la direction des yeux comme base de notre technique de pointage afin de minimiser la fatigue tout en offrant la vitesse théorique la plus élevée.

Le pointage avec les yeux, comme avec la tête, souffre du problème du toucher de Midas [61], c.-à-d. que lorsque l'utilisateur bouge la tête ou les yeux, le système reconnaît une entrée d'interaction permanente, même si ce n'est pas l'intention première de l'utilisateur. Par conséquent, lorsque nous utilisons la direction des yeux, deux actions sont nécessaires : l'une pour activer le mode de sélection et l'autre pour valider la sélection. Dans la littérature, lorsque la direction des yeux est la seule modalité utilisée, la validation d'une sélection par les yeux sont communément effectuées en utilisant le temps d'attente (*dwelt*) [61]. Cependant, le temps d'attente optimal dépend des tâches et est différent pour chaque utilisateur [57]. En outre, dans une étude utilisant la norme ISO 9241 - partie 9 [31] sur un ordinateur de bureau [128], l'utilisation d'un temps d'attente était plus lent que l'appui sur la barre d'espace d'un clavier. L'interaction par poursuite, qui repose aussi uniquement sur les yeux, met en corrélation les mouvements des yeux avec les mouvements de proxy autour des cibles [34, 65]. Pour valider la sélection d'une cible, les yeux suivent simplement le proxy associé. Néanmoins, les études [34, 65] n'ont testé que jusqu'à

5. L'**amblyopie** est un trouble de la vue dans lequel le cerveau favorise un œil entraînant une diminution de l'acuité visuelle d'un œil qui semble normal à d'autres égards.

8 cibles visibles. De plus, lors des tests avec 8 cibles, les taux d'erreur variaient entre 20 % et 35 % [34]. Ces techniques d'interaction ne sont donc pas adaptées aux environnements denses. L'HoloLens 1, un casque de **Réalité Augmentée (RA)**, est livré avec un dispositif à bouton externe (clicker⁶) pour valider la sélection d'une cible pointée par la tête. La technique nécessite donc un dispositif supplémentaire. Gaze+Pinch [95] utilise un microgeste de la main pour valider la sélection : un **pincement** (▼). Néanmoins, un seul microgeste élémentaire ne peut pas être utilisé pour les deux actions d'activation du mode et de validation de la sélection. En utilisant nos connaissances sur les microgestes, notre but est de valoriser les bonnes propriétés du regard et de se détacher de ses points faibles.

Comme nous l'avons vu plus haut, le regard souffre de problèmes de précision. Pour tenir compte des limites de l'œil humain et de la faible précision de l'appareil de suivi oculaire, nous faisons le choix de contrôler non pas un rayon, qui exige de la précision pour sélectionner un objet, mais un cône, comme utilisé dans des travaux précédents [41, 77, 63] sur le regard. Les objets qui intersectent le cône dirigé le long du regard deviennent donc des cibles potentielles, ce qui nécessite un mécanisme de désambiguïsation pour sélectionner l'une d'entre elles.

9.1.2 Mécanisme de désambiguïsation

Avec une sélection par cône, plusieurs objets peuvent être intersectés. Ainsi, un mécanisme de désambiguïsation est donc nécessaire pour ne sélectionner qu'un seul objet parmi l'ensemble intersecté. Au-delà de la sélection par cône, un mécanisme de désambiguïsation est aussi nécessaire pour les techniques utilisant un autre type de volume ou un rayon pour la sélection 3D. Delamare [27] distingue trois mécanismes : l'absence de désambiguïsation, la désambiguïsation automatique et la désambiguïsation interactive.

Lorsqu'il n'y a pas de mécanisme de désambiguïsation, la sélection s'appuie nécessairement sur un rayon et le premier objet coupé par le rayon est sélectionné. Il s'agit de pointeurs virtuels standards, comme le pistolet laser [77]. Bien que suffisant dans la plupart des cas, il est difficile de sélectionner des objets petits et/ou éloignés, surtout s'ils sont partiellement occultés par d'autres objets.

Les techniques de désambiguïsation automatique sélectionnent un objet sur la base d'une heuristique [49, 101]. Une des heuristiques les plus utilisées repose sur le mécanisme de la bulle, c.-à-d. que la cible la plus proche du rayon est sélectionnée [81]. Ce mécanisme peut aussi être utilisé avec un cône en utilisant une métrique qui produit des surfaces d'isodistances ellipsoïdales [77]. D'autres heuristiques existent comme avec le *Smart Ray* [46] où l'objet en contact avec le rayon depuis le plus longtemps est sélectionné. Étant donné la nature automatique de ces techniques, les utilisateurs perdront en partie le contrôle explicite de l'interaction, ce qui pourrait induire une certaine frustration.

Les techniques de désambiguïsation interactive permettent aux utilisateurs de modifier, d'affiner ou de parcourir une liste d'objets présélectionnés par une sélection

6. <https://learn.microsoft.com/fr-fr/hololens/hololens1-clicker>

avec un volume ou un rayon. La phase de désambiguïsation peut se dérouler soit pendant le mouvement de pointage, soit après, dans une phase distincte. Par exemple, la désambiguïsation en même temps que le pointage a été choisie pour les techniques *Depth Ray* [46] et *RayCursor* [7] : les utilisateurs déplacent un curseur le long du rayon tout en pointant. Pour le *RayCursor* [7], un mécanisme de bulle est aussi utilisé en choisissant la cible la plus proche du curseur. Au contraire, SQUAD [68] utilise une phase de désambiguïsation distincte : après avoir présélectionné un ensemble initial d'objets à l'aide d'un cône, les utilisateurs affinent cet ensemble de manière récursive jusqu'à ce qu'il ne reste plus qu'un seul objet.

Notre objectif est de tirer parti du regard pour sa rapidité et sa faible demande physique. Pour désambiguïser les objets à l'intérieur du cône dirigé par le regard, nous écartons la désambiguïsation en parallèle du pointage en raison de l'instabilité du regard. Par conséquent, nous envisageons une phase de désambiguïsation séparée, utilisant les microgestes pour naviguer dans la liste des objets intersectés par le cône.

9.2 Concevoir une phase de désambiguïsation distincte

Dans le but de concevoir une technique en deux étapes, nous explorons différentes solutions pour une phase de désambiguïsation séparée.

Delamare et coll. ont présenté un espace de conception pour les mécanismes de désambiguïsation dans le cas de la sélection de cibles physiques [27]. L'espace de conception regroupe un ensemble d'options de conception réparties en deux groupes : le groupe *interaction* et le groupe *système de désambiguïsation*.

Le groupe *interaction* comprend les caractéristiques de conception liées à l'espace d'affichage et de contrôle.

Espace d'affichage. Les objets présélectionnés peuvent être affichés soit 1) au sein de la scène, ce qui permet de conserver le contexte spatial et d'éviter les changements de mise au point visuelle, comme dans la technique *lock ray* [46], soit 2) dans un espace distinct de la scène, comme dans SQUAD [68], ce qui permet, par exemple, d'approcher les cibles pour faciliter la sélection par le regard [88].

Espace de contrôle. Les objets présélectionnés peuvent être sélectionnés soit en interagissant directement dans la scène, soit dans l'espace distinct. Avec les microgestes, nous cherchons à autoriser à la fois la désambiguïsation dans la scène et dans un espace distinct pour plus de flexibilité.

Le groupe *système de désambiguïsation* comprend les connaissances utilisées pour la désambiguïsation. Les objets présélectionnés peuvent être désambiguïsés à l'aide de connaissances sur leur apparence (p. ex., leur forme, leur couleur ou leur taille), leurs fonctionnalités (p. ex., les commandes associées), leur position

relative les uns par rapport aux autres ou d'autres propriétés (p. ex., l'état actuel ou l'identifiant). Les techniques basées sur un espace d'affichage et de contrôle distinct, telles que SQUAD [68], impliquent des connaissances sur les objets présélectionnés qui permettent de les différencier. Les connaissances sur les objets présélectionnés affichés dans l'espace distinct dépendent du contexte d'utilisation. Dans la suite, nous nous concentrons sur les performances des modalités indépendamment du contexte d'utilisation. Par conséquent, l'étude ne prend pas en compte les connaissances sur les objets présélectionnés affichés dans l'espace distinct. Pour ce faire, nous utilisons une scène 3D abstraite contenant des objets sphériques abstraits et une cible clairement identifiée, comme cela a été fait dans d'autres études [7, 81, 49].

Enfin, comme indiqué dans [68], en termes de performances, l'utilisation d'une phase de désambiguïisation distincte implique un compromis entre la phase de sélection et la phase de désambiguïisation. En effet, plus la phase de sélection est rapide et imprécise, plus le nombre d'objets présélectionnés est important et donc plus la phase de désambiguïisation est longue. Plusieurs modalités peuvent être utilisées pour la phase de désambiguïisation, comme la voix [87, 114] ou le toucher sur un appareil portable [108]. Réutiliser les microgestes pour une phase de désambiguïisation pourrait permettre une transition directe entre la phase de sélection et la phase de désambiguïisation ainsi qu'un parcours rapide.

Le chapitre suivant présente les techniques de sélection 3D conçues ainsi qu'une étude expérimentale de ces techniques. Les techniques conçues incluent une phase de pointage combinant le regard et les microgestes ainsi qu'une phase de désambiguïisation distincte

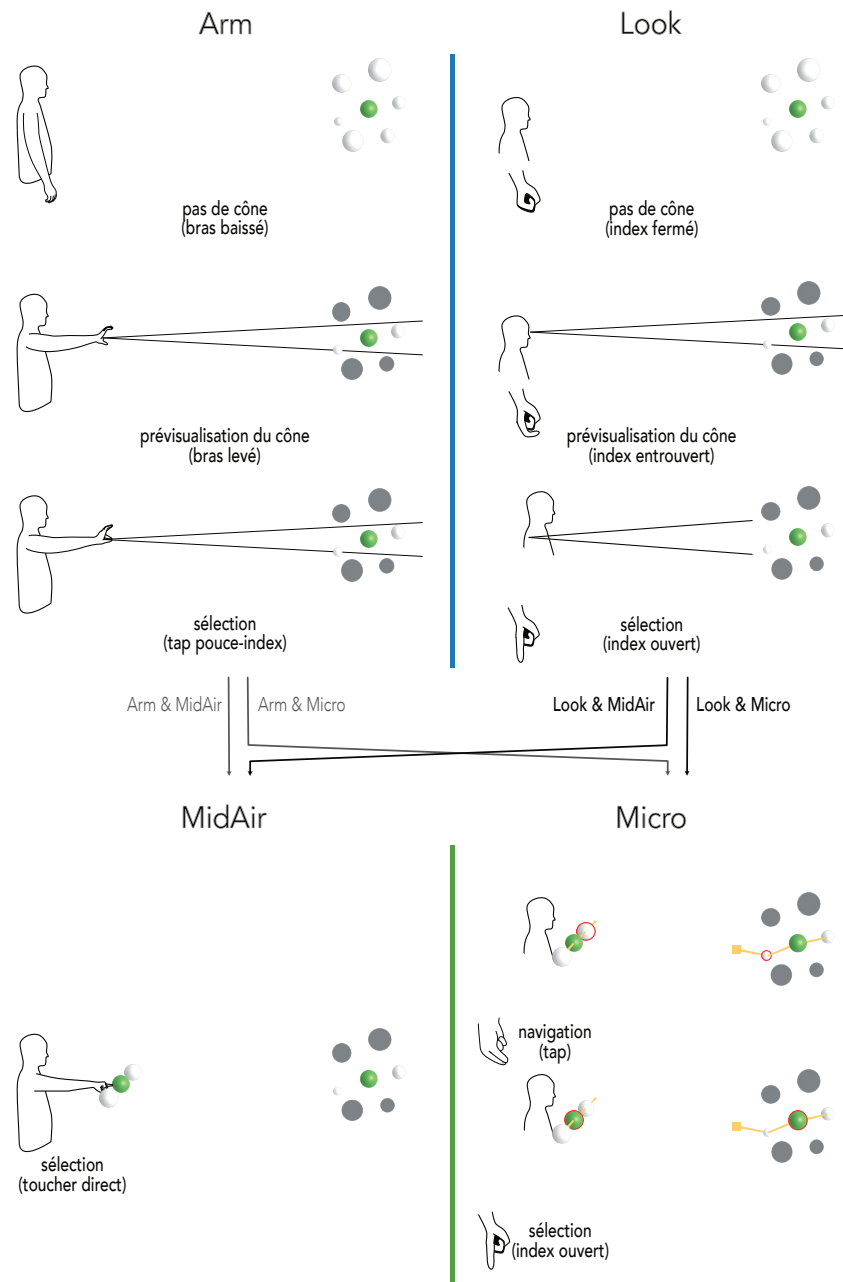


FIGURE 10.1: Utilisation du regard et des microgestes (à droite) pour réduire la fatigue en RM par une technique en deux phases. La première phase (Look) consiste à présélectionner des objets à l'aide d'un cône dirigé le long du regard et contrôlé par des microgestes. La seconde phase (Micro) consiste à sélectionner la cible en naviguant dans la liste des objets présélectionnés dans le contexte de la scène 3D ou, si nécessaire, en dehors de ce contexte. Modalités de référence (à gauche) : pointeur virtuel conique à partir du bras et toucher direct. La première phase (Arm) consiste à présélectionner des objets à l'aide d'un cône dirigé le long du bras et valider par un **tap**. La seconde phase (MidAir) consiste à sélectionner la cible à partir d'une liste hors contexte en utilisant le toucher direct. Nous identifions quatre techniques à partir des modalités des deux phases de sélection : Look & Micro, Look & MidAir, Arm & Micro, Arm & MidAir.

Chapitre 10

Conception et évaluation de techniques de sélection 3D basées sur les microgestes

Les travaux de ce chapitre ont fait l'objet d'une publication à ISMAR'23[16].

Dans ce chapitre, nous présentons la conception et l'évaluation de techniques de sélection 3D en deux phases basées sur les microgestes.

10.1 Techniques conçues

Dans ce qui suit, nous désignons par *modalité* une technique d'interaction utilisée au cours d'une phase, p. ex. le regard ou les microgestes, et par *technique* un composé de deux modalités, p. ex. Look&Micro ou Look&MidAir.

Comme exposé dans le chapitre précédent, nous avons identifié deux modalités prometteuses pour une technique de sélection 3D minimisant la fatigue physique : le regard et les microgestes. En raison de la faible précision du regard, ces techniques nécessitent deux phases d'interaction, une phase de sélection avec un cône et une phase de désambiguïsation. Pour ces deux phases, nous avons identifié une modalité de référence et une modalité minimisant a priori la fatigue physique.

Pour la phase de sélection avec un cône, au cours de laquelle les utilisateurs pré-sélectionnent des objets à l'aide d'un cône, la modalité de référence est l'interaction en l'air. Comme dans la technique de référence de l'HoloLens 2, notre modalité de référence utilise l'avant-bras et un microgeste de la main (Arm) pour sélectionner grossièrement un ensemble d'objets. Notre modalité minimisant la fatigue utilise le regard et l'extension du doigt (Look).

Pour la phase de désambiguïsation, au cours de laquelle les utilisateurs sélectionnent l'un des objets présélectionnés, la modalité de base utilise le toucher direct (MidAir) dans la liste des objets présélectionnés. Notre modalité minimisant la fatigue utilise des [taps](#) pouce-doigt (Micro) pour naviguer dans la liste des objets présélectionnés.

Les deux microgestes utilisés par les techniques sont décrits à l'aide de la notation μ Glyphe [17] : **tap** ($\overset{\circ}{\nabla}; \overset{\circ}{\blacktriangle}$) et **extension** ($\overset{\circ}{\blacktriangle}$).

Notre exploration de l'espace de conception, en considérant deux modalités pour chaque phase de la technique, nous conduit à définir quatre techniques. La Figure 10.1 représente chacune de ces modalités ainsi que les 4 techniques définies.

10.1.1 Arm&MidAir

Avec la technique Arm&MidAir, telle qu'elle est actuellement mise en œuvre dans l'HoloLens 2, la position de repos (c.-à-d. l'état d'interaction inactif) correspond au moment où les bras de l'utilisateur sont le long de son corps. Les utilisateurs lèvent l'avant-bras de leur main dominante pour lancer la phase de sélection avec un cône.

Dans l'axe de leur avant-bras, nous définissons un cône infini avec une ouverture de 3°, correspondant à la recommandation de Microsoft pour une expérience confortable¹. À 6 m de distance, le cône a une section circulaire de 30 cm de diamètre. Pendant la phase de sélection du cône, tous les objets de la scène sont grisés à l'exception de ceux qui intersectent le cône. Lorsque les utilisateurs effectuent un **tap** du pouce et de l'index, tous les objets intersectant le cône sont présélectionnés et la phase de désambiguïsation commence. Au cours de la phase de désambiguïsation, des copies des objets présélectionnés sont affichées sous la forme d'une liste linéaire à 60 cm devant les utilisateurs (29° verticalement sous le champ de vision). Cette conception est similaire au menu principal de l'HoloLens 2. Un retour visuel en bas de leur champ de vision informe les utilisateurs que la liste est disponible en baissant la tête. L'ordre des objets dans la liste est défini par leur proximité avec l'utilisateur dans la scène (p. ex., l'objet le plus à gauche de la liste est le plus proche de l'utilisateur). Pour sélectionner un objet, il suffit de le toucher directement dans la liste avec l'index. Pour conserver l'information du contexte, en survolant un objet dans la liste, l'objet correspondant dans la scène est entouré d'un halo rouge.

Si l'utilisateur baisse le bras, le processus de sélection est annulé.

10.1.2 Look&MidAir

La technique Look&MidAir combine le regard et des microgestes pour contrôler le cône pendant la phase de sélection du cône. Le cône, dont les propriétés sont identiques à celui décrit précédemment, est dirigé par le regard de l'utilisateur. Pour éviter le problème du toucher de Midas [61], la phase de sélection du cône doit commencer avec la main gauche de l'utilisateur complètement fermée. Le cône est déclenché lorsque l'index commence son **extension**. Comme précédemment, tous les objets sont grisés à l'exception de ceux qui intersectent le cône. Les utilisateurs peuvent ajuster le cône en changeant simplement la direction de leur regard. Lorsque l'index est complètement ouvert, les objets intersectant le cône

1. <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/eye-tracking>

sont présélectionnés et la phase de désambiguïsation, qui est la même que dans Arm&MidAir, commence.

Si l'utilisateur ferme la main gauche, l'ensemble du processus de sélection est annulé.

10.1.3 Look&Micro

La technique Look&Micro met en œuvre la phase de sélection avec le cône de Look&MidAir mais utilise des microgestes pour la phase suivante. Dans la phase de désambiguïsation, nous tirons parti de l'index, déjà tendu à la fin de la première phase, pour naviguer dans les objets présélectionnés. Nous utilisons un curseur formant un halo rouge autour des objets dans les deux représentations (un dans la **scène 3D** et un dans la **liste** devant les utilisateurs) pour représenter l'objet présélectionné. Ce curseur permet aux utilisateurs de naviguer dans les objets présélectionnés **avec** ou **sans** connaissances contextuelles. Les participants pouvaient choisir librement de désambiguïser **en** ou **hors** contexte, en regardant simplement **vers la scène** ou **vers la liste**. Pour renforcer la synchronisation des vues, les objets présélectionnés de la scène sont connectés comme dans la liste (c.-à-d. avec des lignes orange). Pour déplacer le curseur rouge, les utilisateurs effectuent un **tap** du pouce sur la phalange haute de l'index ou **tap** du pouce sur la phalange basse de l'index pour déplacer le curseur **plus loin** / **à droite** ou **plus près** / **à gauche**. Le curseur est initialement placé sur l'objet le plus **proche** / **à gauche**. Pour sélectionner l'objet délimité par le curseur, l'utilisateur effectue un **tap** du pouce sur l'ongle de l'annulaire.

Comme précédemment, si l'utilisateur ferme la main, l'ensemble du processus de sélection est annulé.

10.1.4 Arm&Micro

Pour pouvoir comparer les modalités de la deuxième phase sans le biais des modalités de la première phase, nous testons également la quatrième combinaison de modalités. La technique Arm&Micro met en œuvre la phase de sélection de Arm&MidAir et la phase de désambiguïsation de Look&Micro.

10.2 Étude expérimentale préliminaire

Dans cette première étude, nous explorons l'espace de conception pour les deux phases, la phase de sélection et la phase de désambiguïsation. Notre objectif est de comparer les performances de toutes les combinaisons de modalités présentées ci-dessus.

Pour la capture et la reconnaissance des microgestes, nous utilisons le gant *Off-The-Shelf* (OTS)(sous-section 6.1.1).

10.2.1 Tâche

Pour un essai donné, les participants doivent sélectionner une cible verte dans un nuage de points blancs. Le nuage de points reste le même tout au long d'un bloc. La densité du nuage de points et les positions des points varient d'un bloc à l'autre. Dans chaque bloc, la disposition du nuage de points est générée de manière pseudo-aléatoire et est la même pour chaque participant pour une densité donnée. Le nuage de points décrit une sphère de 0,5 m de rayon dont le centre est placé à 6 m devant les participants, comme les ensembles de points utilisés par Lu et coll. [81]. En comparaison, à la même distance, la section transversale du cône passant par le centre de la sphère est un cercle de 0,16 m de diamètre. Les positions de la cible varient tout au long d'un bloc d'essais. La position d'une cible est choisie au hasard dans une liste de positions prédéfinies, données en coordonnées sphériques autour du centre du nuage de points : $(r = 0,5 \text{ m}, \theta \in [0^\circ, 90^\circ, 180^\circ], \phi \in [0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ])$, ce qui correspond au milieu de nuage de points, ainsi qu'aux milieux des faces du cube englobant le nuage de points. Les participants peuvent se reposer aussi longtemps qu'ils le souhaitent entre les blocs. Entre chaque essai d'un bloc, un message à l'écran demande aux participants de désactiver la technique, c.-à-d. de fermer la main pour Look&Micro et Look&MidAir ou de baisser le bras pour Arm&MidAir ou Arm&Micro. Entre chaque bloc, un bouton virtuel placé à 60 cm des utilisateurs permet de commencer le bloc. En cas d'erreur, l'essai est reprogrammé à la fin du bloc, ce qui permet de s'assurer que l'essai est terminé une fois sans erreur. Nous distinguons deux types d'erreurs : les erreurs de sélection, c.-à-d. la présélection d'un ensemble d'objets qui ne contient pas la cible, et les erreurs de désambiguïsation, c.-à-d. que l'objet sélectionné pendant la phase de désambiguïsation n'est pas la cible.

10.2.2 Participants

Nous avons recruté 16 participants (24,9ans \pm 9). Aucun d'entre eux n'avait utilisé de casque [Réalité Mixte \(RM\)](#) auparavant. Quatre d'entre eux avaient déjà participé à une étude expérimentale trois mois plus tôt impliquant des [taps](#) du pouce sur le doigt. Les microgestes ont été utilisés dans un contexte différent de la [RM](#). Notre gant étant enfilé à la main gauche, nous avons choisi des participants droitiers afin d'éviter tout biais lié à l'utilisation de la main dominante ou non dominante. En effet, le but d'utiliser les microgestes est aussi de pouvoir interagir en parallèle d'une tâche principale, d'où l'utilisation des microgestes avec la main non dominante dans nos tests préliminaires.

10.2.3 Design

Nous avons utilisé un modèle intra-sujet avec les facteurs : TECHNIQUE, NOMBRE DE CIBLES et TAILLE DES CIBLES. L'ordre des quatre techniques a été contre-balancé par un carré latin. Nous avons décidé de tester deux densités de cibles à l'intérieur d'un nuage de points : 20 % et 60 %. Nous avons décomposé

la densité en deux paramètres : le nombre de cibles dans un volume et la taille des cibles. Tout d'abord, nous avons fixé le NOMBRE DE CIBLES en suivant un algorithme d'approximation par voxels d'une sphère² pour diviser le volume contenant les objets à sélectionner. Cet algorithme prend comme paramètre le nombre souhaité de voxels utilisés pour diviser le diamètre d'une sphère. Afin de garantir un voxel au centre de la sphère, nous avons utilisé des nombres impairs comme paramètres : un diamètre de 3, donnant une sphère de 19 voxels, et un diamètre de 5, donnant une sphère de 81 voxels. Nous avons ensuite choisi que chaque voxel contienne exactement une cible, ce qui donne deux conditions NOMBRE DE CIBLES : FAIBLE (19 cibles) et HAUTE (81 cibles). Ensuite, nous avons calculé la TAILLE DES CIBLES en fonction du nombre de cibles pour obtenir les deux densités visées, 20% et 60%. Pour une densité α , une cible a un diamètre égal à $\alpha \times \text{VOXEL SIDE}$. Les conditions TAILLE DES CIBLES sont donc de 3,3 cm (en densité 20%) et 10 cm (en densité 60%) de diamètre pour FAIBLE, et de 2 cm (en densité 20%) et 6 cm (en densité 80%) de diamètre pour HAUTE. Enfin, chaque cible a été positionnée aléatoirement en la décalant légèrement du centre de son voxel, en s'assurant que la cible est entièrement contenue à l'intérieur de son voxel. Avant chaque bloc TECHNIQUE \times NOMBRE DE CIBLES \times TAILLE DES CIBLES, les participants ont effectué 4 tâches d'entraînement. Ces données ont été écartées de l'analyse.

Au total, 1792 sélections ont été recueillies auprès de 16 participants \times 7 sélections \times 4 TECHNIQUE \times 2 NOMBRE DE CIBLES \times 2 TAILLE DES CIBLES. Après avoir terminé l'étude pour une technique, les participants ont rempli la première partie du questionnaire NASA TLX, appelé *RAW NASA TLX*, avec des échelles de Likert en 7 points. Afin de mesurer la fatigue, nous avons choisi d'utiliser le questionnaire NASA TLX au lieu d'une échelle unique (p. ex. l'échelle de Borg [14] pour mesurer séparément la fatigue mentale et la fatigue physique. De plus, pour connaître l'origine de la fatigue, nous avons demandé aux utilisateurs de commenter leurs réponses chaque fois qu'ils faisaient état d'une fatigue physique et/ou mentale. Après avoir réalisé l'étude avec chaque technique, les participants ont classé les techniques en fonction de la vitesse, de la précision et de la fatigue mentale et physique qu'ils percevaient, ainsi que de leur préférence. L'étude a duré environ 1 h.

10.3 Résultats

10.3.1 Temps

Pour l'analyse du temps, nos données étaient positivement asymétriques et ne suivaient donc pas une distribution normale (test de Shapiro $p < 0,001$). En suivant les recommandations 12 et 15 de Dragicevic [32], nous avons appliqué une transformation logarithmique puis utilisé une ANOVA à mesures répétées pour nos analyses d'effet et un t-test par paire, avec une correction de Bonferroni de la

2. [Algorithme d'approximation par voxel sur GitHub](#).

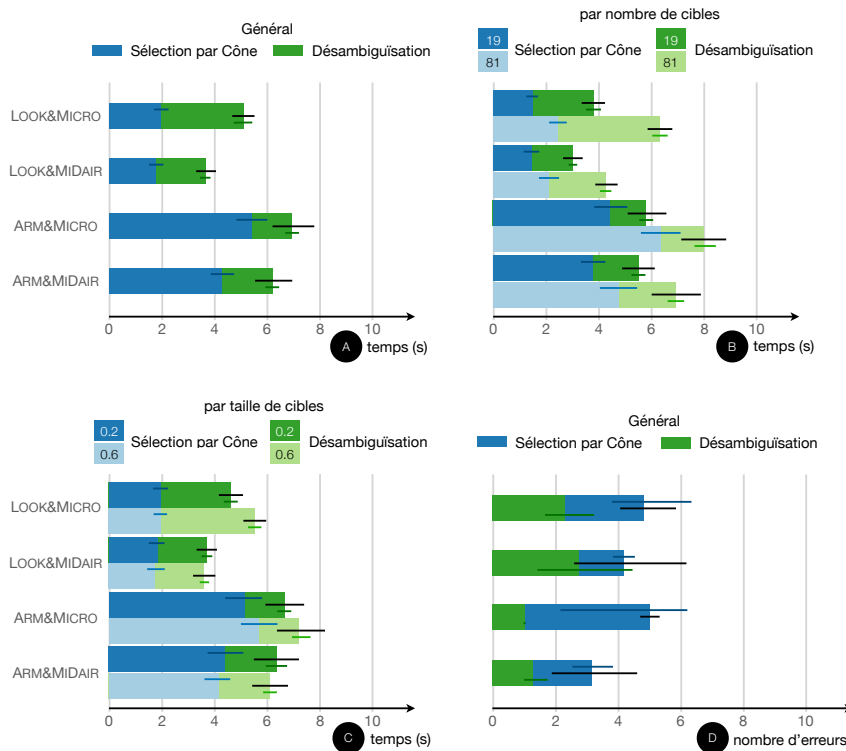


FIGURE 10.2: Résultats de l'étude préliminaire. A) Temps de réalisation moyen et IC à 95 % pour chaque technique et chaque phase. B) Temps de réalisation moyen et IC à 95 % pour chaque technique, phase et nombre de cibles. C) Temps de réalisation moyen et IC à 95 % pour chaque technique, phase et taille de cible. D) Nombre moyen d'erreurs et IC à 95 % par participant pour chaque technique et chaque phase.

p-valeur, pour l'analyse posthoc. Les Intervalles de Confiance (IC) à 95 % ont été calculés en utilisant la méthode *bootstrap*.

Comme montré à la Figure 10.2A, la technique la plus rapide est Look&MidAir (moyenne : 3,64 s, intervalle de confiance : [3,30, 3,99]), suivi de Look&Micro (m : 5,06 s, ic : [4,70, 5,47]), Arm&MidAir (m : 6,22 s, ic : [5,55, 6,91]), et Arm&Micro (m : 6,9 s, ic : [6,21, 7,71]).

Le facteur TECHNIQUE semble avoir un effet sur TEMPS DE SÉLECTION ($F_{(3,45)} = 42,92, p < 0,001, \eta^2 = 0,62$). Les tests posthoc semblent indiquer une absence d'effet entre Arm&Micro et Arm&MidAir ($p = 0,79$), un potentiel effet entre Arm&MidAir et Look&Micro ($p = 0,009$), et un effet entre toutes les autres paires ($p < 0,001$). Comme montré à la Figure 10.2B, TECHNIQUE \times NOMBRE DE CIBLES semble avoir un effet ($F_{(3,45)} = 9,22, p < 0,001, \eta^2 = 0,05$). Comme montré à la Figure 10.2C, TECHNIQUE \times TAILLE DES CIBLES semble avoir un effet ($F_{(3,45)} = 5,46, p = 0,003, \eta^2 = 0,03$).

Nous avons également analysé les performances temporelles par phase et étudié l'impact des différentes modalités. Pour la phase de *sélection par cône*, les techniques

utilisant le regard (m : 1,85 s, ic : [1,66, 2,05]) semblent être plus rapides que celles utilisant l'avant-bras (m : 4,81 s, ic : [4,32, 5,32]) ($F_{(1,15)} = 213,07, p \ll 0,001, \eta^2 = 0,85$). Pour la phase de *désambiguïsation*, les techniques utilisant le toucher direct (m : 1,91 s, ic : [1,84, 1,99]) semblent être plus rapides que celles utilisant les microgestes (m : 2,3 s, ic : [2,19, 2,42]) ($F_{(1,15)} = 5,10, p = 0,04, \eta^2 = 0,10$). Cependant, si nous considérons séparément la phase de *désambiguïsation* utilisant les microgestes, les microgestes de la technique Look&Micro sont moins performants (m : 3,12 s, ic : [2,79, 3,45]) et ceux de la technique Arm&Micro sont similaires (m : 1,52 s, ic : [1,31, 1,73]) aux techniques utilisant le toucher direct combinées. Cette différence n'est pas existante pour le toucher direct entre la phase de *désambiguïsation* de Look&MidAir (m : 1,86, ic : [1,71, 2,01]) et Arm&MidAir (m : 1,95, ic : [1,76, 2,14]). Ceci suggère un impact de la première phase sur la seconde pour les microgestes. Pour cette phase, TECHNIQUE semble avoir un effet sur TEMPS DE SÉLECTION ($F_{(1,15)} = 5,10, p = 0,04, \eta^2 = 0,10$). Les tests posthoc suggèrent une différence entre la phase de *désambiguïsation* de Look&Micro et celle de toutes les autres techniques (tous $p \ll 0,001$) mais aucune différence entre la phase de *désambiguïsation* de Arm&Micro et celle de Arm&MidAir, ainsi qu'entre celle de Arm&Micro et celle de Look&MidAir (tous deux $p > 0,08$).

Une analyse plus détaillée portant sur le nombre d'objets présélectionnés dans la liste suggère que : si la liste comprend moins de 10 objets, il n'y a pas de différence entre les microgestes (0,54s) et le toucher direct (0,45 s) ($t = 2,02, df = 15, p = 0,06$) ; si la liste comprend 10 objets ou plus, il y a une différence entre les microgestes (0,97 s) et le toucher direct (0,82 s) ($t = 2,36, df = 15, p = 0,03$). Il convient de noter que 78% des sélections comportaient moins de 10 objets dans la liste pendant la phase de *désambiguïsation*, et qu'une liste de plus de 10 objets n'apparaissait que dans des environnements denses de petites cibles (c.-à-d. DENSITÉ de 60% et NOMBRE DE CIBLES de 81).

10.3.2 Erreur

Nous considérons deux types d'erreurs : l'erreur de présélection (c.-à-d. que les objets présélectionnés ne contiennent pas l'objet cible) et l'erreur de sélection (c.-à-d. que l'objet sélectionné n'est pas la cible). La [Figure 10.2D](#) montre le nombre moyen d'erreurs par participant pour chaque technique. Le TECHNIQUE semble avoir un effet sur les erreurs de présélection ($F_{(3,42)} = 4,92, p = 0,005, \eta^2 = 0,19$). Les tests posthoc suggèrent des différences uniquement entre Look&Micro et Arm&Micro ($p = 0,037$), et entre Look&MidAir et Arm&Micro ($p = 0,027$). Toutes les autres paires ont un $p > 0,2$. Pour les erreurs de sélection, TECHNIQUE ne semble pas avoir d'effet ($F_{(3,42)} = 0,86, p = 0,47, \eta^2 = 0,04$).

10.3.3 Questionnaire NASA TLX

Nous avons utilisé la première partie du questionnaire NASA TLX (*Raw NASA TLX*) avec des échelles de Likert en 7 points. Comme nous n'avons donné aucune instruction aux participants quant au temps imparti pour réaliser les tâches, nous

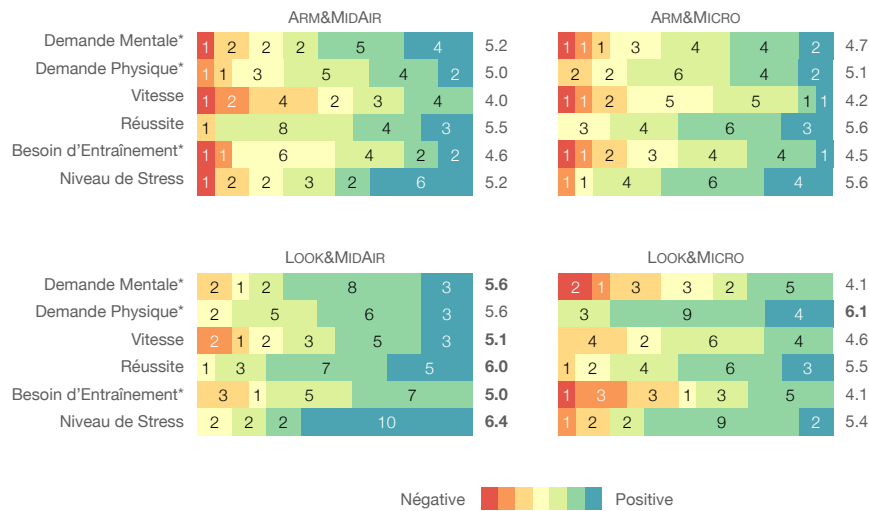


FIGURE 10.3: Scores bruts du questionnaire NASA TLX pour toutes les techniques.

avons remplacé la question sur le sentiment de précipitation par une question sur le sentiment de vitesse. Les données brutes et les moyennes sont présentées à la Figure 10.3. Nous utilisons une transformation *Aligned rank* afin d'utiliser une ANOVA non paramétrique [121]. Le facteur TECHNIQUE semble avoir un effet sur la fatigue mentale ($F_{(3,45)} = 5,05, p = 0,004$), la fatigue physique ($F_{(3,45)} = 7,20, p = 0,0005$) et le stress ($F_{(3,45)} = 3,02, p = 0,04$). En allant plus loin pour tester notre hypothèse sur la fatigue physique, les tests posthoc suggèrent des différences entre Look&Micro et Arm&MidAir ainsi que Look&Micro et Arm&Micro (tous $p < 0,01$). Cela suggère que le regard combiné à des microgestes pourrait effectivement réduire la fatigue physique.

10.3.4 Analyse des rangs

La Table 10.1 indique les rangs moyens et les écarts types. Look&MidAir arrive première pour la faible demande mentale, la préférence utilisateur, la rapidité et la performance. Look&Micro arrive première pour la faible demande physique.

10.4 Enseignements de l'étude exploratoire

10.4.1 Look

L'utilisation du regard pour la phase de *sélection par cône* a été la meilleure option dans l'étude. Les deux techniques utilisant le regard pendant la première phase sont les plus rapides et les mieux classées en fonction de la demande physique et des préférences des participants. Deux participants ont déclaré que le contrôle de l'état du cône à l'aide de la flexion de l'index était plus naturel que le geste de sélection de l'HoloLens 2, en raison de la transition fluide entre les deux phases.

| Technique | Demande Mentale* | Demande Physique* | Préférence | Plus Rapide | Plus performante |
|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Look&MidAir | 1,56 (0,73) | 2,19 (0,83) | 1,56 (0,83) | 1,50 (0,73) | 1,56 (0,73) |
| Look&Micro | 3,38 (1,09) | 1,62 (0,89) | 2,56 (1,26) | 2,56 (1,15) | 2,50 (1,26) |
| Arm&MidAir | 2,06 (0,77) | 3,25 (1,13) | 2,69 (0,79) | 2,75 (1,13) | 3,06 (1,06) |
| Arm&Micro | 3,00 (0,89) | 2,93 (0,93) | 3,19 (0,98) | 3,19 (0,75) | 2,88 (0,81) |

TABLE 10.1: Rangs moyens (STD) des techniques pour la demande mentale, demande physique, préférence, la vitesse et la performance. * : les résultats ont été inversés par rapport à ce qui a été demandé aux participants pour que la technique avec le plus petit score soit la meilleure.

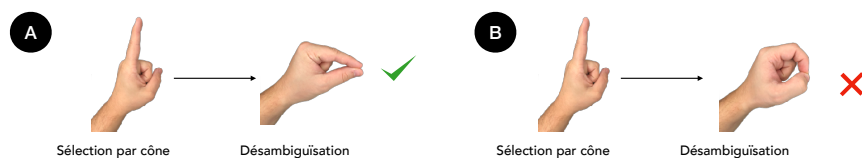


FIGURE 10.4: Selon la manière dont les participants effectuent un **tap** du pouce au doigt pour naviguer dans la liste pendant la phase de *désambiguïsation*, le système reconnaît l'index comme A) ouvert ou B) fermé.

Cependant, même si l'utilisation du regard et de la flexion de l'index implique une demande physique la plus faible, il convient de noter que deux autres participants ont signalé des douleurs dues aux flexions répétées de l'index, et qu'un participant aurait préféré une flexion de l'index dans la direction opposée (c.-à-d. d'une ouverture complète à une fermeture complète), utilisant ainsi la métaphore d'un clic de souris.

10.4.2 MidAir

Dans la phase de *désambiguïsation*, le fait de toucher directement les objets a été globalement plus rapide que l'utilisation de microgestes. Cependant, si nous comparons les techniques avec une première phase similaire, celles qui utilisent le toucher direct en l'air pour la deuxième phase sont plus exigeantes sur le plan physique. Nous pouvons aussi noter qu'avec une liste d'objets de grande taille (81 cibles, densité 60%), les participants devaient parfois se déplacer physiquement pour atteindre les cibles situées à la fin de la liste. Le toucher direct peut donc s'avérer difficile à utiliser dans des environnements denses.

10.4.3 Micro

Après avoir analysé les commentaires des participants, nous avons deux explications pour la différence entre Look&Micro et Arm&Micro pendant la phase de *désambiguïsation*.

1/ Pour certains participants, le gant était trop sensible à la flexion de l'index. Avec Look&Micro, après avoir ouvert leur index pour sélectionner le cône, les participants devaient se concentrer sur la façon dont ils effectuaient un **tap** du pouce sur l'index pour naviguer dans la liste. S'ils courbaient trop leur index, le système reconnaissait un index fermé, ce qui annulait la liste (Figure 10.4). Ce comportement était dû au fait que le capteur de flexion, étant trop court, ne couvrait pas l'articulation entre l'index et la paume. Après quelques erreurs, les participants étaient plus prudents, ce qui augmentait à la fois la durée de la phase de *désambiguïsation* et la demande mentale.

2/ Certains participants ont eu des difficultés à valider sur l'annulaire en gardant la main parfaitement fermée (sauf pour l'index et le pouce). Comme pour le cas 1/, les capteurs du gant reconnaissaient parfois une main ouverte, ce qui obligeait à tout recommencer. Les participants étaient donc plus prudents pour éviter une telle erreur, ce qui augmenterait le temps et la charge mentale.

10.5 Conception améliorée

L'étude préliminaire montre que le regard est la meilleure option pour la phase de sélection par cône. Les deux techniques utilisant le regard pendant la première phase sont les plus rapides et les mieux classées en termes de demande physique. Look&MidAir est la meilleure technique en termes de temps de sélection, de demande mentale et de préférence des participants. Look&MidAir est donc notre technique candidate la plus solide. D'après les résultats et les commentaires des participants, nous pensons également que Look&Micro pourrait être une bonne technique candidate si quelques améliorations étaient apportées pour réduire le temps de sélection et la demande mentale.

Dans la version améliorée de Look&MidAir, nous avons modifié l'ouverture du cône de 3° à 2°, ce qui, selon les recommandations de Microsoft, offre toujours une expérience confortable. En réduisant l'ouverture, nous souhaitons diminuer la taille de la liste d'objets dans la phase de *désambiguïsation*, afin d'éviter aux utilisateurs de se déplacer pour atteindre la fin de la liste. De plus, si les utilisateurs ne présélectionnent qu'un seul objet dans le cône, la phase de *désambiguïsation* est ignorée et l'objet est automatiquement sélectionné.

Dans la version améliorée de Look&Micro, nous avons également changé l'ouverture à 2° et supprimons de même la phase de *désambiguïsation* si un seul objet est présélectionné. Pour éviter de la réflexion supplémentaire lorsque la cible est le premier objet de la liste, nous avons ajouté un cube non sélectionnable au début de la liste, obligeant les utilisateurs à effectuer au moins un **tap** pour naviguer dans la liste. Cette solution semble correspondre au modèle mental en deux étapes de la phase de *désambiguïsation*.

Pour réduire davantage la demande mentale et les difficultés gestuelles durant la phase de *désambiguïsation*, nous avons abandonné la validation de l'annulaire pour être cohérent avec les gestes de la phase de *sélection par cône*. Étant donné que l'index est à moitié fermé pour les **taps** de navigation, nous reprenons le même

mouvement de validation qu'en *sélection par cône* en validant l'objet actuellement sélectionné dans la liste par une extension de l'index (Figure 10.1B). Enfin, nous avons ajouté un autre capteur de flexion sur l'index pour couvrir l'articulation entre la paume et l'index, ce qui résout le problème de détection décrit ci-dessus.

10.6 Étude expérimentale de validation

Dans cette deuxième étude expérimentale, nous évaluons et comparons les versions améliorées de Look&Micro et Look&MidAir.

10.6.1 Technique de référence

La technique multimodale la plus proche dans la littérature, à savoir Gaze&Pinch avec la désambiguïsation telle qu'elle est mise en œuvre dans [72], est une technique de sélection en 2D. Gaze&Pinch associe le regard à une modalité secondaire basée sur des gestes en l'air pour la phase de désambiguïsation. Les utilisateurs pointent avec leurs yeux et le microgeste *pincer* positionne un curseur sur le plan 2D des cibles à la position détectée du regard. Après la sélection initiale par le regard, des mouvements horizontaux et verticaux de la main contrôlent le curseur sur le plan de la cible. Le microgeste *relâcher* sélectionne la cible. Pour adapter cette technique à la 3D avec une sélection par le regard utilisant un cône, un curseur doit être positionné dans le cône après le geste de pincement. La position du curseur est alors contrôlée par les mouvements verticaux, horizontaux et de profondeur de la main. Mais cette adaptation de Gaze&Pinch à la sélection 3D n'est pas simple et nécessite une étude plus approfondie pour déterminer la meilleure position initiale du curseur dans le cône et le gain de contrôle-affichage le plus approprié pour permettre au curseur de se déplacer rapidement et avec précision à l'intérieur du cône de 6 mètres de long. En l'absence d'une technique multimodale de référence combinant le regard avec des gestes en l'air ou des microgestes, nous avons utilisé le pointeur virtuel [3] comme référence dans l'étude expérimentale. Plus précisément, nous utilisons le pointeur virtuel dirigé par le bras comme utilisé dans la littérature [51, 131, 95, 114]. Nous sommes conscients que le pointeur virtuel n'est pas la technique la plus performante, cependant nous l'avons choisi afin de fournir un point de comparaison stable dans le temps et facilement répliquable pour les futurs travaux sur le pointage 3D. En effet, bien que le pointeur virtuel était dirigé à l'aide d'un contrôleur dans les premiers casques de *Réalité Virtuelle (RV)*, il est maintenant dirigé avec le bras dans les casques de *Réalité Augmentée (RA)*, p. ex. l'Hololens 2, et est fournie « prêt à l'emploi » avec tous les appareils de *RA/RM* grand public. C'est pourquoi, nous avons utilisé le pointeur virtuel tel qu'il est implémenté dans l'Hololens 2, c.-à-d. en utilisant l'avant-bras pour pointer et un *tap* de l'index sur le pouce pour sélectionner, pour faciliter la réplification de l'étude et permettre des comparaisons futures. Dans ce qui suit, nous utilisons le terme *pointeur virtuel* pour désigner *pointeur virtuel dirigé par le bras*.

10.6.2 Hypothèses

D'après la littérature et les résultats de l'étude expérimentale préliminaire, nous faisons l'hypothèse que Look&MidAir et Look&Micro seront significativement plus rapides et auront un impact moindre sur la fatigue physique que le pointeur virtuel (H_1). Puisque Look&MidAir autorise un accès direct aux objets de la liste, alors que Look&Micro implique un accès séquentiel augmentant linéairement le temps d'accès, nous nous attendons également à ce que Look&MidAir soit plus rapide que Look&Micro dans les environnements denses, c.-à-d. lorsque la liste de désambiguïsation est longue, et que Look&MidAir et Look&Micro soient équivalentes dans les environnements peu denses, c.-à-d. lorsque la liste de désambiguïsation est courte (H_2). Conformément aux résultats de notre étude précédente, nous nous attendons à ce que Look&MidAir ait une demande mentale plus faible (H_M) mais une demande physique plus élevée (H_P) que Look&Micro.

10.6.3 Participants

Nous avons recruté 12 participants (26, 77ans \pm 5, 90). Aucun d'entre eux n'avait participé à l'étude préliminaire, ni utilisé un casque de [RM](#) auparavant, ni participé à une étude expérimentale utilisant des [taps](#) pouce-doigt. Notre gant étant enfilé à la main gauche, nous avons choisi des participants droitiers pour des microgestes de la main non dominante uniquement.

10.6.4 Matériel et Protocole

Nous avons réutilisé l'équipement de l'étude préliminaire, en modifiant légèrement le gant. Nous avons ajouté un capteur de flexion supplémentaire sur l'index pour capter l'angle entre l'index et la paume et ainsi éviter le problème illustré à la [Figure 10.4](#).

Nous utilisons la même tâche et le même design expérimental que dans l'étude exploratoire. La seule différence est que nous avons testé 3 TECHNIQUE au lieu de 4 : Look&Micro, Look&MidAir et le pointeur virtuel de l'Hololens 2 comme technique de référence.

Nous n'avons testé le pointeur virtuel que pour NOMBRE DE CIBLES = 19 car, après des essais pilotes auprès de 6 personnes, nous avons conclu que le NOMBRE DE CIBLES = 81 était beaucoup trop difficile au vu des taux d'erreurs dépassant les 80%.

Avant chaque bloc TECHNIQUE \times NOMBRE DE CIBLES \times TAILLE DES CIBLES, les participants ont effectué 7 tâches de sélection d'entraînement, afin de monter nos participants en compétence. Ces données d'entraînement ont été écartées de l'analyse. Dans chaque bloc, les participants ont effectué 7 tâches de sélection réelle. Au total, 840 sélections ont été recueillies, soit 12 participants \times 7 sélections \times 2 TECHNIQUE \times 2 NOMBRE DE CIBLES \times 2 TAILLE DE LA CIBLE + 12 participants \times 7 sélections \times 1 TECHNIQUE \times 1 NOMBRE DE CIBLES \times 2 TAILLE DE LA

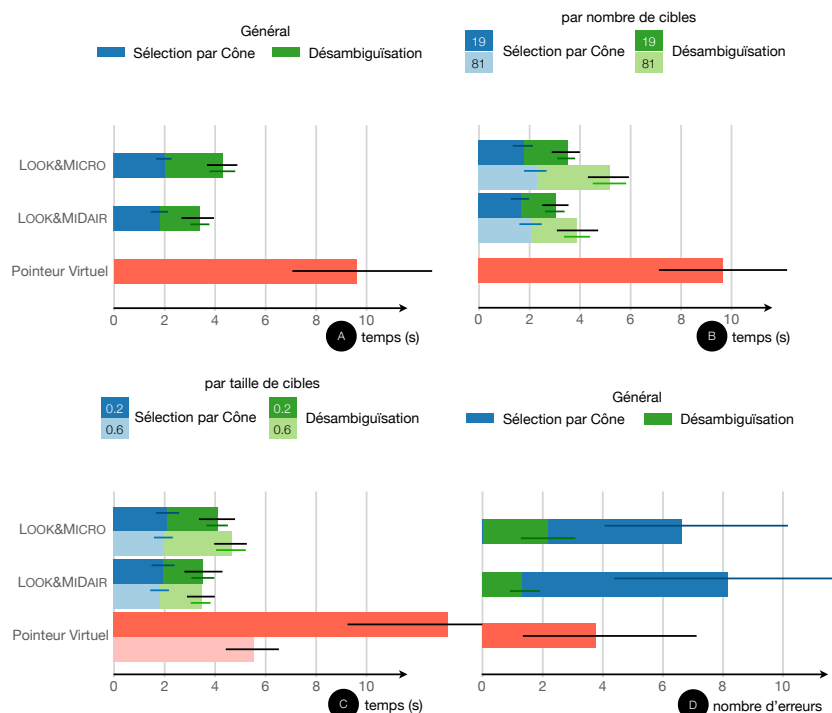


FIGURE 10.5: Résultats de l'étude de validation. A) Temps de réalisation moyen et IC à 95 % pour chaque technique et chaque phase. B) Temps de réalisation moyen et IC à 95 % pour chaque technique, phase et nombre de cibles. C) Temps de réalisation moyen et IC à 95 % pour chaque technique, phase et taille de cible. D) Nombre moyen d'erreurs et IC à 95 % par participant pour chaque technique et chaque phase.

CIBLE. Cela a donné 28 tâches de sélection pour Look&MidAir et Look&Micro, et 14 tâches de sélection pour le pointeur virtuel. L'étude a duré environ 1 h.

10.7 Résultats

10.7.1 Temps

Pour l'analyse du temps, nos données étaient positivement asymétriques et ne suivaient donc pas une distribution normale (test de Shapiro $p < 0,001$). Comme expliqué précédemment pour la première étude, nous avons utilisé une transformation logarithmique suivie d'une ANOVA à mesures répétées pour nos analyses d'effet et un t-test par paire, avec une correction de Bonferroni de la p-valeur, pour l'analyse posthoc.

Comme le montre la Figure 10.5A, la technique la plus rapide est Look&MidAir (moyenne : 3,41 s, intervalle de confiance : [2,97, 3,92]), suivie par Look&Micro (m : 4,31 s, ic : [3,80, 4,82]), et pointeur virtuel (m : 9,65 s, ic : [7,28, 12,35]).

TECHNIQUE semble avoir un effet sur le TEMPS DE SÉLECTION ($F_{(2,22)} =$

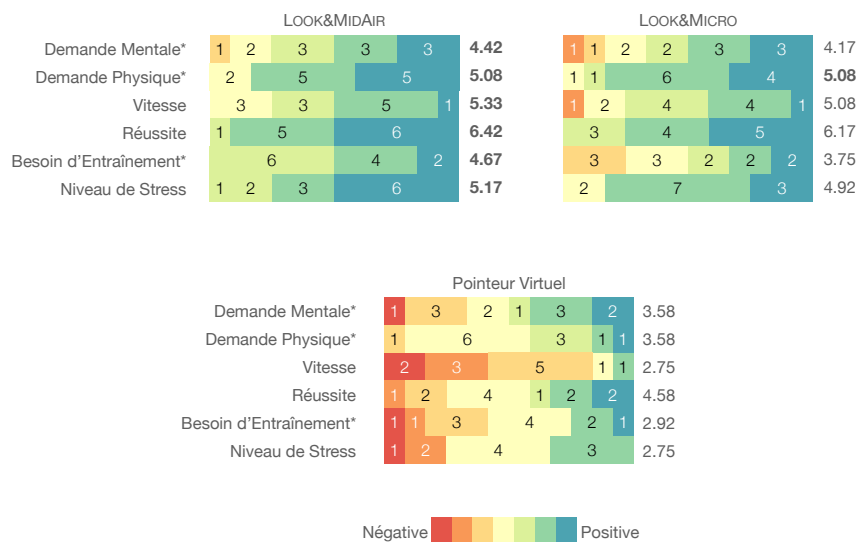


FIGURE 10.6: Scores bruts du NASA TLX. * : La demande mentale, la demande physique, le besoin d'entraînement et le niveau de stress sont inversés dans le graphique de sorte que toutes les valeurs bleues (respectivement rouges) encodent des résultats positifs (resp. négatifs), c.-à-d. la demande mentale, physique, le besoin d'entraînement et le niveau de stress les plus bas.

53,05, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,63$). Le t-test par paires ne suggère aucune différence entre Look&Micro et Look&MidAir ($p = 0,20$), et une différence entre ces deux techniques et le pointeur virtuel ($p < 0,001$). Comme le montre la Figure 10.5B, TECHNIQUE \times NOMBRE DE CIBLES ne semble pas avoir d'effet $F_{(1,11)} = 6,83$, $p = 0,24$, $\eta^2 = 0,03$. Comme le montre la Figure 10.5C, TECHNIQUE \times TAILLE DE LA CIBLE semble avoir un effet $F_{(2,22)} = 52,70$, $p \ll 0,001$, $\eta^2 = 0,31$.

Si nous considérons uniquement la phase de *désambiguïsation*, le toucher direct (m : 1,61 s, ic : [1,35, 1,92]) semble plus rapide que les microgestes pour naviguer dans la liste (m : 2,34 s, ic : [1,99, 2,70]) ($F_{(1,11)} = 15,81$, $p < 0,002$, $\eta^2 = 0,28$).

10.7.2 Erreur

Compte tenu de la nature de l'interaction du pointeur virtuel (en une seule phase), nous avons considéré toutes les erreurs dans cette condition comme des erreurs de sélection. Un t-test entre Look&MidAir et Look&Micro ne suggère pas d'effet de TECHNIQUE sur les erreurs de sélection ($t = 0,99$, $df = 11$, $p = 0,35$). Pour les erreurs de sélection, TECHNIQUE ne semble pas avoir d'effet ($F_{(2,22)} = 1,84$, $p = 0,18$, $\eta^2 = 0,10$).

10.7.3 Questionnaire NASA TLX

Comme pour l'étude précédente, nous utilisons la transformation Aligned-rank pour une ANOVA non paramétrique [121] suivie de tests posthoc utilisant les

moyennes marginales estimées sur le modèle ART. Lorsque nous ne considérons que la deuxième phase, nous avons supprimé le pointeur virtuel de nos données. Les données brutes et les moyennes sont présentées à la [Figure 10.6](#). TECHNIQUE ne semble pas avoir d'effet sur la fatigue mentale ($F_{(2,22)} = 1,12, p = 0,34$), mais semble avoir un effet sur la fatigue physique ($F_{(2,22)} = 10,89, p < 0,001$), la vitesse ($F_{(2,22)} = 15,52, p < 0,001$), la réussite ($F_{(2,22)} = 10,45, p < 0,001$) et le stress ($F_{(2,22)} = 16,47, p < 0,001$). Les tests posthoc suggèrent une différence entre le pointeur virtuel et les deux autres techniques, Look&MidAir et Look&Micro, pour la demande physique, la vitesse, le succès et le stress (tous $p < 0,002$).

10.7.4 Analyse des rangs

La [Table 10.2](#) indique les rangs moyens et les écarts types pour les différentes techniques.

| Technique | Demande Mentale* | Demande Physique* | Préférence | Plus Rapide | Plus performante |
|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Look&MidAir | 1,33 (0,65) | 1,67 (0,65) | 1,50 (0,67) | 1,25 (0,45) | 1,33 (0,65) |
| Look&Micro | 2,25 (0,75) | 1,50 (0,67) | 1,75 (0,75) | 1,92 (0,67) | 1,83 (0,58) |
| Raycasting | 2,42 (0,67) | 2,83 (0,39) | 2,75 (0,45) | 2,83 (0,39) | 2,83 (0,39) |

TABLE 10.2: Rangs moyens (STD) des techniques pour la demande mentale, demande physique, préférence, vitesse et performance. * : les résultats ont été inversés par rapport à ce qui a été demandé aux participants pour que la technique avec le plus petit score soit la meilleure.

10.8 Discussion

Look&MidAir et Look&Micro sont respectivement 60 % et 55 % plus rapides, sont préférés et ont une charge de travail plus faible que le pointeur virtuel (validation de H_1). Le principal problème du pointeur virtuel est la précision. P0 (Participant 0) et P6 ont expliqué qu'il était plus intuitif d'étendre son bras pour saisir un objet, mais ont également déclaré, comme d'autres participants (P2, P3, P9), que le pointeur virtuel était trop frustrant à utiliser. La frustration provenait à la fois 1) de la difficulté à être précis avec le pointeur se déplaçant autour de la cible et 2) du rayon se déplaçant hors de la cible lors de l'exécution du geste de sélection de l'HoloLens 2, un **tap sur le pouce par l'index**, ce qui entraînait une sélection manquée. Dans ce qui suit, nous ne discutons que des résultats pour Look&MidAir et Look&Micro, puisque l'objectif de l'étude est de comparer les modalités toucher direct et microgestes pour la phase de *désambiguïsation*.

10.8.1 Temps

Pour Look&Micro, les microgestes sont utilisés pour l'accès linéaire aux objets de la liste. Selon le contexte d'utilisation, la phase de *désambiguïsation* peut être effectuée dans la scène (p. ex., préservant la disposition spatiale des objets qui peut être utile pour la sélection) ou dans une liste distincte d'objets copiés affichée devant l'utilisateur (p. ex., pour accéder à des cibles partiellement cachées dans la scène). Puisque Look&MidAir fournit un accès direct aux objets, nous nous attendions à ce que Look&MidAir soit plus rapide que Look&Micro. Cependant, bien que les participants (P0, P1, P7, P8, P10) aient eu l'impression que Look&Micro était plus lent, notre analyse posthoc ne suggère pas de différence entre Look&MidAir et Look&Micro. La [Figure 10.2](#) suggère néanmoins une différence entre les deux techniques lors de la phase *désambiguïsation*. Comme dans notre étude exploratoire, un t-test suggère une différence entre les deux techniques pour la sélection impliquant 3 [taps](#) ou plus du pouce sur le doigt. Cependant, cela représente 23 % des cas dans les environnements peu denses, et 65 % des cas dans les environnements denses. Il est important de noter qu'au fur et à mesure que le système de suivi du regard s'améliore, le cône peut être affiné, ce qui permet d'obtenir des listes plus petites. Ainsi, plus le système de suivi est précis, plus Look&MidAir et Look&Micro seront équivalents en termes de temps, quel que soit le contexte. Par conséquent, cela valide en partie H_2 : Look&MidAir est plus rapide que Look&Micro dans le cas d'une longue liste d'objets présélectionnés.

10.8.2 Erreurs

En comparant les erreurs entre les deux études menées, il semble que la réduction de la taille du cône dans la seconde étude entraîne davantage d'erreurs de sélection, c.-à-d. que la cible ne se trouve pas à l'intérieur du cône. Un cône plus petit induit une liste plus réduite d'objets présélectionnés et donc une phase de *désambiguïsation* plus courte. Cependant, avec un cône plus petit, les participants doivent être plus précis dans la phase de *sélection par cône*, ce qui a un impact sur le taux d'erreur. Par conséquent, si nous souhaitons réduire la taille du cône pour faciliter la phase de *désambiguïsation*, il faut tenir compte de son impact sur la première phase.

10.8.3 Fatigue

Nous nous attendions à ce que Look&MidAir souffre de l'effet « bras du gorille », induisant ainsi une demande physique. Cependant, sur la base des scores bruts du questionnaire NASA TLX et des classements, il n'y a pas de différence claire entre Look&Micro et Look&MidAir en ce qui concerne la demande physique. Par conséquent, nous rejetons H_P . Nous pensons que le mouvement du bras dans Look&MidAir est suffisamment rapide pour ne pas souffrir du « bras de gorille », par opposition au pointeur virtuel pointant avec l'avant-bras. P10 a explicitement dit que Look&Micro induisait de la fatigue au niveau de l'index parce que les deux phases de la technique impliquent des gestes de l'index. Même si un seul participant

l’a signalé, il convient donc de faire attention, lors de la conception d’une technique avec des microgestes, à ne pas induire de fatigue avec des mouvements répétitifs. P6 a signalé une fatigue oculaire due à l’utilisation prolongée de l’Hololens 2 et a souhaité faire des pauses entre les techniques.

10.8.4 Demande mentale et courbe d’apprentissage

Il ne semble pas y avoir de différence dans les scores bruts du questionnaire NASA TLX. Cependant, Look&Micro est mieux classée que Look&MidAir pour la demande mentale. Nous expliquons cette demande mentale plus élevée par le fait que les participants doivent effectuer plusieurs microgestes qui doivent être planifiés mentalement. Cette demande mentale plus élevée pour Look&Micro pourrait avoir un impact sur la rapidité d’interaction. Trois de nos participants (P0, P1, P5) ont expliqué que Look&MidAir est la technique la plus facile à apprendre parce qu’il est plus intuitif de sélectionner directement une sphère que de naviguer dans la liste des sphères. Il semble donc que les microgestes nécessitent plus d’entraînement que le toucher direct. Ainsi, ces résultats sont compatibles avec notre hypothèse (H_M).

10.8.5 Préférence des utilisateurs

D’après l’analyse du classement, Look&MidAir semble être légèrement préférée à Look&Micro. Look&MidAir a été classée première 7 fois sur 12 et deuxième 4 fois. Look&Micro a été classée première 5 fois sur 12 et deuxième 5 fois. Par conséquent, même s’il n’y a pas de technique clairement préférée, les deux techniques sont mieux classées que le pointeur virtuel, ce qui est encourageant pour les travaux futurs combinant le regard et les microgestes. Un sentiment ludique et engageant encourageant a été signalé. Par exemple, P5 et P9 ont préféré Look&Micro parce que c’était « plus amusant ».

10.9 Limitations

10.9.1 Limitations matérielles

Nous utilisons le gant OTS (sous-section 6.1.1) pour détecter les microgestes lors de l’utilisation du regard, mais nous utilisons une caméra pour détecter le geste de sélection de l’HoloLens 2 (détection native). Par conséquent, les participants ont dû s’adapter au matériel pour que leurs gestes soient reconnus, p. ex. en apprenant à placer leur main pour que l’HoloLens 2 puisse détecter les gestes. Les commentaires des participants suggèrent que la différence de matériel pour reconnaître les microgestes a eu un impact sur les préférences. En effet, certains participants étaient gênés par les erreurs de reconnaissance de la caméra. Cependant, nous avons décidé d’utiliser le pointeur virtuel de l’HoloLens 2 comme référence de base pour les comparaisons futures avec nos techniques, en fournissant les détails pour reproduire les scènes utilisées dans nos études. De même, dans notre étude,

nous avons utilisé le gant *OTS* (sous-section 6.1.1) pour une reconnaissance rapide, peu coûteuse et fiable des microgestes. Bien que le port de gants semble irréaliste pour un usage quotidien hors professionnel, il n'existe pas encore de matériel de captation moins intrusif (chapitre 5) avec des taux de reconnaissance similaires. Enfin, la taille du cône est basée sur le cône d'erreur du dispositif de suivi du regard de l'HoloLens 2. L'amélioration du suivi oculaire permettra de réduire davantage la taille du cône. Cela pourra réduire la taille de la liste des objets présélectionnés pendant la phase de *désambiguïsation*, améliorant ainsi les performances globales de nos techniques.

10.9.2 Perte de l'information spatiale

Lorsqu'ils utilisent la liste devant eux, les participants perdent des informations spatiales et contextuelles. Avec *Look&MidAir*, ils peuvent survoler une cible pour la trouver dans la scène. Avec *Look&Micro*, la liste est également affichée dans la scène, ce qui permet une désambiguïsation à l'aide d'informations spatiales et contextuelles. Cependant, notre objectif étant de comparer les modalités de sélection 3D, nous n'avons pas comparé les performances de *Look&Micro* pour la désambiguïsation réalisée en regardant la scène ou la liste. D'après les commentaires de nos participants, nous pouvons nous attendre à ce que si l'environnement est peu dense, les utilisateurs effectuent la phase *désambiguïsation* en regardant dans la scène, mais s'il est dense, en regardant dans la liste devant eux (P1, P3). P3 a ajouté qu'il préférerait effectuer la phase de *désambiguïsation* dans la scène parce que regarder la liste nécessitait des mouvements de tête supplémentaires. Une étude future testant différentes configurations de scènes et différents types d'informations permettrait de mieux comprendre ce qui incite un utilisateur à regarder la liste plutôt que la scène.

10.9.3 Participants

Nos participants n'étaient pas familiers avec les casques de *RM* et les microgestes, ce qui a facilité la comparaison des performances des utilisateurs entre les techniques standard et nouvelles, puisqu'ils étaient novices dans les deux cas. Mais cela peut également avoir un impact sur la généralisation de notre travail aux utilisateurs expérimentés de la *RM*. Cependant, nous pensons que si les utilisateurs expérimentés peuvent obtenir de meilleurs résultats avec le pointeur virtuel de l'HoloLens 2, ils obtiendront aussi de meilleurs résultats pour *Look&MidAir* et *Look&Micro*. Enfin, notre population est légèrement biaisée vers les jeunes males. Les futures études basées sur nos techniques pourraient prendre en compte une population plus équilibrée en termes de genre et d'étude.

10.9.4 Loi de Fitts

La loi de Fitts est un modèle couramment utilisé pour la sélection en 2D à l'aide de la norme ISO-9241[128]. Cependant, il n'existe pas d'extension directement

applicable de la loi de Fitts en 2D (ni de la loi de Fitts en 2,5D) au cas de la 3D et, surtout, il n'y a pas de consensus sur une formule à utiliser compte tenu des 6 degrés de liberté ainsi que des changements de taille apparente de la cible dus à la profondeur [113, 112]. De plus, à notre connaissance, les modèles de Fitts ne prennent pas en compte l'occultation et n'ont pas d'extension 3D pour une tâche avec des distracteurs et/ou des environnements denses [11]. Étant donné qu'aucun modèle de Fitts ne reflétait notre contexte, c.-à-d. un arrangement 3D dense, nous avons utilisé une configuration similaire à des études antérieures [81, 7] pour l'arrangement 3D dense de cibles avec occultation.

Dans ce chapitre nous avons présenté et évalué expérimentalement deux techniques de sélection 3D en deux phases pour la RA : Look&MidAir et Look&Micro. Dans le chapitre suivant d'ouverture, nous étudions la combinaison des deux techniques et étendons les travaux en abordant la tâche de manipulation d'objets qui constitue une extension immédiate après la tâche de sélection d'objets.

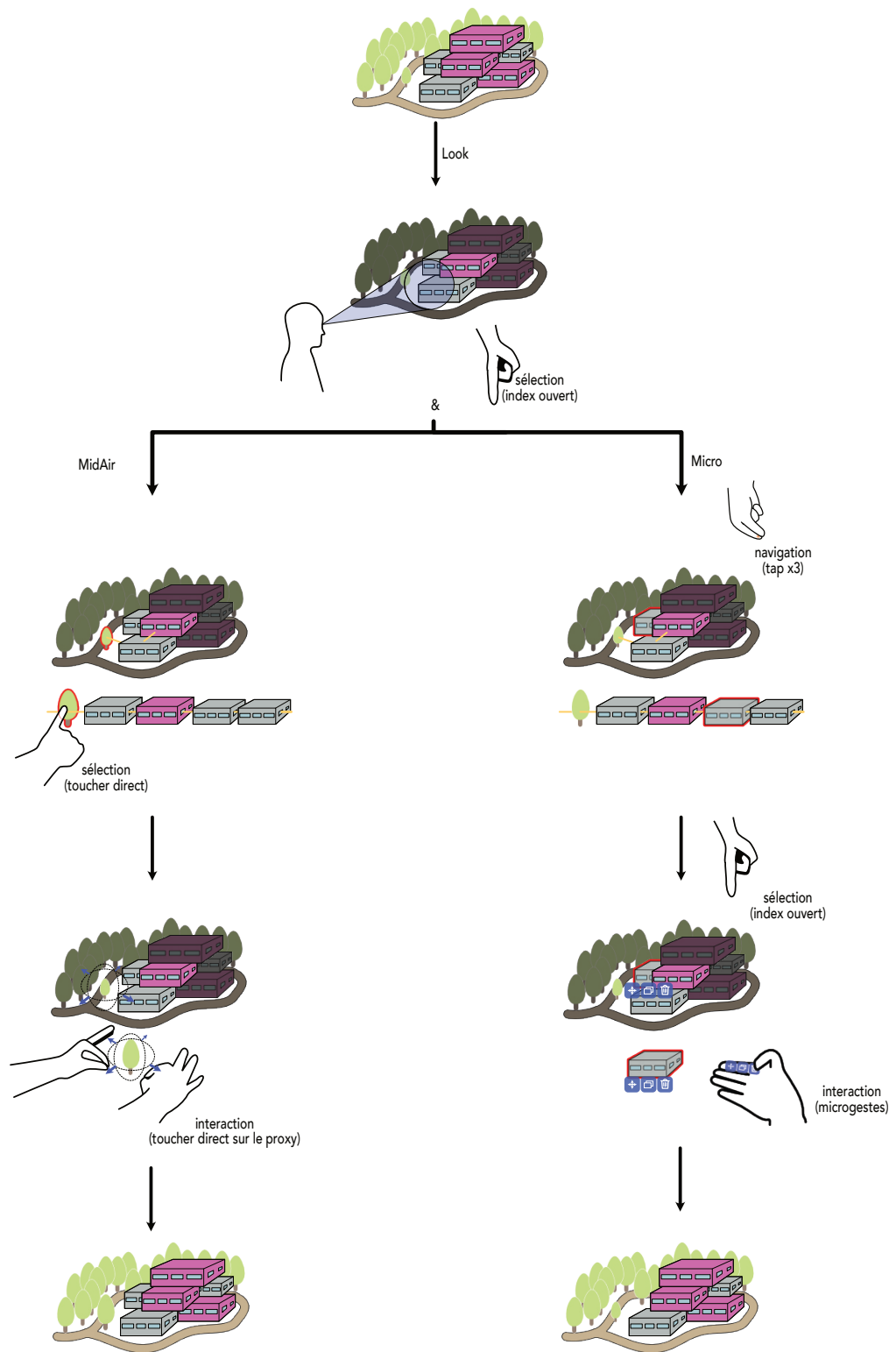


FIGURE 11.1: Scenario possible d'une utilisation combinée de Look&MidAir et Look&Micro pour la manipulation d'objets 3D.

Chapitre 11

Vers la manipulation 3D avec l'interaction directe et les microgestes

Dans cette partie, nous avons présenté la conception de Look&MidAir et Look&Micro, deux techniques de sélection 3D en deux phases pour la [Réalité Augmentée \(RA\)](#), utilisant le regard et la flexion de l'index pendant une première phase de sélection, et respectivement le toucher direct ou des [taps](#) du pouce sur le doigt pendant une deuxième phase de désambiguïsation. Au cours de la première phase, les utilisateurs contrôlent un cône dirigé le long du regard. En étendant leur index, ils présélectionnent tous les objets croisant le cône. Dans la deuxième phase, en utilisant Look&MidAir, ils touchent directement l'objet désiré. En utilisant Look&Micro, ils naviguent dans la liste des objets sélectionnés et sélectionnent l'un d'entre eux en effectuant des [taps](#) du pouce vers le doigt. Une première étude exploratoire a montré que le regard combiné aux microgestes est deux fois plus rapide et a un impact moindre sur la fatigue physique que l'utilisation de l'avant-bras pour pointer. Nous avons également constaté que les modalités de toucher direct en l'air et de microgestes étaient prometteuses pour la deuxième phase. Dans une deuxième étude, nous avons comparé Look&MidAir et Look&Micro au pointeur virtuel, en utilisant l'avant-bras pour pointer et un [tap](#) pour valider. Nous avons constaté que Look&MidAir et Look&Micro étaient au moins deux fois plus rapides, avec une fatigue physique et une demande mentale moindres que le pointeur virtuel dirigé par le bras. Bien que Look&MidAir ait été jugé plus rapide que Look&Micro dans certains contextes d'utilisation, ils étaient équivalents en termes de fatigue physique et de préférence des utilisateurs.

Ainsi, puisque Look&MidAir et Look&Micro sont équivalentes, nous examinons la possibilité de combiner les deux techniques Look&MidAir et Look&Micro. Dans les cas où la désambiguïsation nécessite un contexte spatial, on peut s'attendre à ce que Look&MidAir soit plus lent que Look&Micro car il nécessite des allers-retours entre la liste, pour survoler un objet, et la scène, pour voir où se trouve l'objet dans la scène 3D. De plus, les microgestes peuvent être utilisés tout en tenant des objets physiques, alors que cela peut être fastidieux dans le cas d'une interaction

en l'air. Par conséquent, puisque les deux techniques peuvent coexister, le fait de les proposer comme une technique combinée permettrait aux utilisateurs de décider quelle technique utiliser en fonction de leur contexte actuel. Cette combinaison laisse présager d'une grande souplesse pour la sélection 3D en fonction du contexte d'utilisation (p. ex., types d'objets cibles, densité de l'environnement, objet physique tenu ou non).

La sélection d'un objet n'est que la première étape de sa manipulation. Nous distinguons deux types de manipulation d'un objet : la manipulation *Rotate Scale Translate (RST)*, qui consiste à manipuler l'orientation, l'échelle et la position de l'objet dans l'espace 3D, et la manipulation des paramètres de l'objet via un menu. Pour la manipulation *RST*, l'utilisation d'une interaction directe à deux mains sur l'objet devrait permettre une manipulation rapide et simple car direct de l'objet. Avec *Look&MidAir*, l'objet est sélectionné par un toucher direct sur la copie de l'objet dans la liste. De cette manière, nous pouvons envisager une manipulation directe sur cette copie pour la manipulation *RST* d'un objet.

La manipulation des paramètres de l'objet s'effectue généralement via un ou plusieurs menus 2D affichés dans l'espace 3D. Cependant, avec les casques basés sur une optique transparente (*optic see-through*), les utilisateurs ont des difficultés à évaluer la distance des objets [109]. Il est donc difficile pour les utilisateurs novices d'interagir avec ces menus, car ils ont tendance à ne pas déplacer leur main suffisamment loin pour atteindre le bouton correspondant à l'item du menu. Nous avons observé ce phénomène lors de notre étude expérimentale sur *Look&MidAir* et *Look&Micro*, où les utilisateurs ont eu du mal à appuyer sur le bouton pour démarrer l'étude. De plus, comme il s'agit d'objets virtuels, ces menus n'ont pas de retour haptique. Pour résoudre ce problème, il est possible d'acheter des gants dotés de vibrateurs au bout des doigts¹. Une autre approche pourrait consister à utiliser des microgestes du pouce sur les doigts, comme exposé par Perella-Holfeldt coll. [94]. Le retour haptique est alors fourni par le contact entre les doigts. Par conséquent, *Look&Micro* pourrait être utilisé pour passer facilement de la sélection d'un objet à la manipulation des paramètres de l'objet.

Scénario : Manipuler un objet en 3D avec *Look&MidAir* et *Look&Micro* La [Figure 11.1](#) présente ce scénario de manipulation d'objet 3D. Diane est une étudiante en architecture qui peaufine son projet final. Elle a conçu un immeuble composé de différents modules et entouré d'un parc. Elle souhaite retirer un module de son bâtiment. Le cône de présélection de son regard croise un arbre et plusieurs modules de l'immeuble qui se ressemblent. Elle utilise donc *Look&Micro* pour sélectionner le module souhaité dans le contexte de la scène 3D déjà créée avec plusieurs modules similaires. Elle utilise ensuite le menu contextuel avec les microgestes pour le supprimer. Autour de son bâtiment, Diane a placé un parc et s'est rendu compte qu'elle avait placé un arbre trop petit. Elle utilise *Look&MidAir* pour sélectionner cet arbre car elle peut facilement le repérer dans la liste devant elle. Elle interagit ensuite avec le proxy de l'arbre dans la liste pour le redimensionner.

1. Prime 3 haptic : <https://www.manus-meta.com/products/prime-3-haptic-xr>

Conclusion

Avec la démocratisation des interfaces pervasives et de la [Réalité Augmentée \(RA\)](#), l'utilisation de gestes rapides et subtils de la main est devenu de plus en plus courante. Si de nombreuses études ont été réalisées sur les systèmes de captation et de reconnaissance des microgestes, peu ont caractérisé les microgestes et les ont comparés à d'autres modalités d'interaction. Enfin, l'absence de définitions, liée à la relative nouveauté du domaine, entraîne des incohérences terminologiques qui entravent la comparaison entre les différents travaux existants et l'exploration systématique des possibilités d'interaction offertes par les microgestes.

Les travaux de cette thèse ont pour but d'aller au-delà de la captation et reconnaissance des microgestes. Nos contributions traitent trois facettes complémentaires de l'interaction basée sur les microgestes : la modélisation et la représentation des microgestes et des contraintes imposées par le contexte ; la conception et l'étude de différents systèmes de captation et de reconnaissance des microgestes ; l'utilisation des microgestes pour la sélection 3D en [RA](#) pour réduire la fatigue physique de l'interaction en [RA](#).

Résumé de la démarche scientifique et des contributions

Dans un premier temps ([chapitre 1](#)), nous avons exploré la littérature sur les microgestes. Cet état de l'art nous a permis de souligner la grande diversité de microgestes existants ainsi que les problèmes terminologiques associés. De plus, nous avons aussi présenté les deux principaux types de contexte pour les microgestes : le contexte main libre et le contexte main occupée, c.-à-d. en tenant un objet.

En réponse aux problèmes terminologiques identifiés et pour définir plus précisément l'espace des possibles, nous avons introduit une notation, μ Glyphe ([chapitre 2](#)). Cette notation permet de décrire les composantes d'un microgeste : l'action, l'actionneur, la surface d'action et les propriétés de l'action. L'évaluation de cette notation par des doctorants et docteurs en IHM a démontré que μ Glyphe permettait de décrire sans ambiguïté un microgeste et ce après une courte formation de 10 minutes. Puis, nous avons exploré l'impact du contexte, en particulier les contextes main occupée, sur la faisabilité des microgestes ([chapitre 3](#)). Après avoir identifié un ensemble de 13 contextes dont la main libre et fixé un ensemble de 21 microgestes, nous avons réalisé une étude avec des utilisateurs pour tester la faisabilité de chaque

combinaison contexte \times microgeste. L'étude a montré que 20 % des combinaisons n'étaient pas faisables. Le contexte main occupée a donc un fort impact sur la faisabilité des microgestes. Pour permettre de déterminer facilement la faisabilité de nouveaux microgestes dans de nouveaux contextes, nous avons proposé un modèle de prédiction basé sur le concept de [Doigt Virtuel \(DV\)](#) et les observations de notre première étude. Avec une description correcte des [préhensions](#) à l'aide de [DV](#), notre modèle prédit correctement 99% du temps la faisabilité des combinaisons contexte \times microgeste de notre première étude. Enfin, avec les données de ces deux études, nous avons exploré la création d'un ensemble de microgestes qui soient compatibles avec nos 13 contextes, c.-à-d. que chaque microgeste de l'ensemble est faisable dans chaque contexte ([chapitre 4](#)). Nous avons exploré deux approches : (1) se focaliser sur l'action et la zone de l'actionneur associée au microgeste et (2) se focaliser sur l'actionneur et la zone de l'actionneur du microgeste. Avec cette deuxième approche, nous avons créé un ensemble de 4 microgestes compatibles et 3 microgestes supplémentaires quasi-compatibles.

L'espace des possibles mieux cerné, dans un deuxième temps, nous avons exploré la littérature des systèmes de captation et de reconnaissance des microgestes ([chapitre 5](#)). Cette littérature nous a permis d'identifier l'utilisation de gants pour capter et reconnaître facilement des microgestes. Après avoir présenté nos prototypes de gants, nous avons étudié l'impact du gant sur la faisabilité des microgestes ([chapitre 6](#)). Cet impact est faible, mais existant. Nous avons ensuite élaboré un système de reconnaissance basé sur l'un de nos gants, permettant de reconnaître les microgestes de l'ensemble défini dans la première partie de cette thèse 94% du temps ([chapitre 7](#)). De plus, dans le but de pouvoir augmenter l'expressivité du vocabulaire, nous avons aussi exploré la reconnaissance du contexte, c.-à-d. la reconnaissance du type de [préhensions](#) ou la main libre. Les résultats sont plus mitigés, avec un taux de reconnaissance de 80%. Au final, en explorant les différents systèmes de captation et de reconnaissance des microgestes, nous avons constaté que chaque système avait ses avantages, ses inconvénients et son langage. De ce fait, nous avons proposé la preuve de concept d'un système de captation et de reconnaissance modulaire pour les microgestes ([chapitre 8](#)). Ce système est en deux parties. Une partie matérielle, un gant en kit, permettant de facilement tester et changer de technologies de captation. Une autre partie logicielle pour alimenter en événements standardisés, décrits en μ Glyphe, toutes applications exploitant l'interaction par microgestes.

Enfin, dans un troisième temps, nous avons exploré l'utilisation des microgestes pour réduire la fatigue physique pour la sélection 3D en [RA](#). Pour ce faire, nous avons exploré la littérature des techniques de sélection 3D ([chapitre 9](#)). Puis, nous avons utilisé les microgestes identifiés dans la première partie de cette thèse et un des systèmes de captation et de reconnaissance conçu dans la deuxième partie de cette thèse, pour créer deux techniques d'interaction combinant regard et microgeste ([chapitre 10](#)). Les microgestes combinés au regard sont plus rapides et moins fatigants que le pointage avec le bras en l'air (interaction de référence en [RA](#)) pour pré-sélectionner grossièrement un ensemble de cible dans un espace 3D.

Cependant, les microgestes ont des performances similaires à celle de l'interaction en l'air pour le parcours d'une liste 1D, si celle-ci reste relativement courte. Pour finir, nous avons proposé une extension de nos techniques pour aller au-delà de la sélection d'objets 3D et traiter la manipulation d'objets 3D ([chapitre 11](#)).

Perspectives de recherche

Les travaux présentés dans cette thèse constituent des premiers pas pour mieux comprendre et étudier systématiquement les microgestes. De nombreux aspects restent à être améliorés et étudiés. Ainsi, outre l'amélioration des approches conceptuelles et des systèmes présentés ainsi que l'implémentation complète des systèmes présentés dans ce manuscrit comme des preuves de concept, nous présentons ci-dessous trois perspectives de recherche.

Représentation des microgestes pour les novices μ Glyphe est une notation destinée aux experts. Ainsi, μ Glyphe ne peut être utilisée pour décrire un microgeste dans un tutoriel à un utilisateur novice. En l'absence de lignes directrices sur comment représenter un microgeste, les images décrivant un microgeste restent potentiellement ambiguës. Une première étape sur la représentation d'un seul microgeste à la fois a été étudiée par Lambert et coll. [73]. Cependant, il reste maintenant à déterminer comment représenter plusieurs microgestes à la fois ainsi que les commandes associées. Ce travail est particulièrement important pour une large adoption des microgestes dans les applications interactives.

La [préhension](#) comme atout Nous avons étudié l'objet tenu, et en particulier la [préhension](#) associée, comme étant une contrainte pour la faisabilité d'un microgeste. Toutefois, la [préhension](#) a déjà été utilisée comme un atout pour permettre de changer de mode avec un stylet sur un écran tactile [106]. Ainsi, lorsque le stylet est tenu dans une [préhension Terminale](#), c.-à-d. lorsque nous écrivons avec ce stylet, les microgestes servent à modifier le fonctionnement du stylet, p. ex. la taille ou la couleur du trait. Cependant, quand le stylet est tenu dans une [préhension Cylindrique](#), les microgestes servent à interagir au niveau de l'application, p. ex. changer de page. De plus, le domaine des interfaces tangibles et des interfaces à changement de formes ouvrent de nouvelles perspectives pour les microgestes. Un objet pourrait se déformer pour permettre l'accès à un plus grand vocabulaire de microgestes si nécessaire. Plusieurs types de déformation sont possibles, p. ex. changer de volume, de forme ou d'orientation [97], et changer sa porosité ou sa courbure [66].

Considérons le scénario où nous souhaitons répondre à un message reçu et affiché en [RA](#) alors que l'on tiendrait une boîte d'allumettes entre le pouce et l'index (Palmaire Petit). A la réception du message, un [press](#) de l'index pourrait signifier que l'utilisateur veut interagir avec le message. Pour agrandir le vocabulaire d'entrée et permettre une interaction plus simple, la boîte d'allumettes pourrait s'agrandir sous l'index pour permettre de poser le majeur sur l'objet. Lorsque

l'interaction avec le message est terminé, la boîte retrouverait sa taille normale. Ainsi, le changement de forme permet de lever les restrictions sur la faisabilité des microgestes liées à une **préhension**, c.-à-d. permettre aux doigts de bouger sur ou en dehors de l'objet sans que celui-ci ne tombe.

Le changement de forme peut aussi apporter de nouvelles surfaces d'interaction et donc augmenter le vocabulaire. Par exemple, avec une tasse (**Cylindrique Grand**), tous les microgestes étudiés dans cette thèse sont faisables. Cependant, une déformation de la tasse peut faire apparaître trois « bosses » autour du pouce, ajoutant potentiellement 6 nouveaux microgestes : un **tap** et un **press** du pouce pour chaque « bosse ».

Étudier les facteurs humains Enfin, nous avons étudié seulement deux aspects des facteurs humains des microgestes : la faisabilité suivant la **préhension** et la fatigue pour la sélection 3D en **RA**. Toutefois, de nombreux aspects physiques et cognitifs restent à étudier.

Sur le plan physique, la notation μ Glyphe étant basée sur des mouvements biomécaniques, notre modèle sur la faisabilité des microgestes pourrait être étendu en incorporant des connaissances du monde médical, par exemple [71, 74, 4]. Cela pourrait permettre de plus facilement définir des ensembles de microgestes inclusifs qui tiennent compte des limitations dues à des conditions spécifiques, telles que l'arthrite des doigts. Bien que des travaux antérieurs aient déjà utilisé des connaissances médicales [122, 56], de nombreuses questions liées à la faisabilité physique des microgestes demeurent. Par exemple, est-il plus facile/faiguant d'effectuer un geste horizontal, c.-à-d. une adduction ou une abduction, qu'un geste vertical, c.-à-d. une flexion ou une extension ?

Sur le plan cognitif, aucune étude ne s'est intéressée à construire un ensemble de microgestes facile à retenir alors que la taille de ces ensembles varie considérablement dans la littérature, de trois microgestes [79] à plus de cinquante [105]. μ Glyphe peut être utilisée comme base pour comprendre quelles propriétés d'un microgeste sont plus faciles à retenir. Par exemple, il peut être plus facile de se souvenir d'un ensemble de plusieurs **taps**, p. ex. **tap** du pouce sur les doigts : $x \in \{i|m|r|p\}$, $y \in \{b|m|t\}$, $\overset{\circ\circ}{\nabla}(\overset{\circ\circ}{x} \bullet \overset{\circ\circ}{y})$; $\overset{\circ\circ}{\blacktriangle}$, qu'un ensemble de 5 microgestes avec des actions différentes, p. ex. **tap** : $\overset{\circ\circ}{\nabla}$; $\overset{\circ\circ}{\blacktriangle}$, **press** : $\overset{\circ\circ}{\nabla}$, **swipe** vers le haut : $\overset{\circ\circ}{-}$; $\overset{\circ\circ}{\blacktriangle}$; $\overset{\circ\circ}{-}$, **swipe** vers le bas : $\overset{\circ\circ}{-}$; $\overset{\circ\circ}{\nabla}$; $\overset{\circ\circ}{-}$ et **extension** : $\overset{\circ\circ}{\blacktriangle}$. Au delà du choix de microgestes faciles à retenir, une autre dimension à étudier est la correspondance entre le microgeste et la commande associée.

De nombreuses questions restent ouvertes dans le domaine des microgestes, et nous espérons que cette thèse puisse servir de base pour y répondre.

Acronymes

DIY Traduisible par « fais-le-toi-même ». Dans le contexte de la thèse, cette expression fait référence aux capteurs fabriqués. [93](#), [94](#), [100](#), [101](#), [103](#), [104](#), [106](#), [108](#), [113](#), [116](#)

DV Doigt Virtuel. Unité composée de parties de la main appliquant une pression dans la même direction pour tenir un objet. [63–70](#), [74](#), [75](#), [102](#), [108](#), [162](#)

GAMAM Ex GAFAM. Désigne les plus grosses entreprises américaines en informatique: Google, Apple, Meta, Amazon, Microsoft. [85](#)

IC Intervalle de Confiance. [39](#), [40](#), [58](#), [61–63](#), [106](#), [109–111](#), [142](#), [149](#), [185](#)

mob médiane ou basse. [56](#), [65](#), [68](#), [69](#), [71](#), [73–75](#), [95](#), [101–105](#), [169](#)

OTS Traduisible par « prêt-à-l’emploi ». Dans le contexte de la thèse, cette expression fait référence aux capteurs disponibles dans le commerce. [91](#), [92](#), [123](#), [139](#), [153](#)

PDC Proportion de chevauchement. [39](#), [40](#), [70](#), [106](#)

RA Réalité Augmentée. [vii](#), [viii](#), [1–5](#), [12](#), [13](#), [84](#), [91](#), [92](#), [123](#), [125](#), [127](#), [131](#), [147](#), [155](#), [157](#), [161–164](#)

RM Réalité Mixte. [49](#), [85](#), [127](#), [129](#), [136](#), [140](#), [147](#), [148](#), [154](#)

RST Traduisible par faire une orientation, changer d’échelle et déplacer. [158](#)

RV Réalité Virtuelle. [127](#), [129](#), [130](#), [147](#)

Glossaire

préhension Pose de la main lorsqu'elle tient un objet. En anglais: *grasp*. [vii](#), [3](#), [4](#), [11](#), [12](#), [14](#), [32](#), [46](#), [52–57](#), [62–65](#), [68–71](#), [73](#), [85](#), [94](#), [95](#), [101](#), [105](#), [108–113](#), [162–164](#), [169](#)

press Mot emprunté de l'anglais pour désigner l'action d'appuyer avec une certaine pression sur une surface. [4](#), [10](#), [11](#), [14](#), [15](#), [18](#), [23](#), [32](#), [35](#), [37](#), [40](#), [56](#), [57](#), [62–64](#), [66](#), [68](#), [69](#), [71](#), [73–76](#), [93–95](#), [101–105](#), [163](#), [164](#), [169](#)

swipe Mot emprunté de l'anglais pour désigner l'action de rentrer en contact sur une surface puis glisser et quitter la surface. En μ Glyphe: $\overset{\circ\bullet}{-}$; $\overset{\bullet\bullet}{-}$; $\overset{\circ\circ}{-}$. [9–13](#), [15](#), [18](#), [19](#), [21](#), [28–30](#), [35](#), [42](#), [45](#), [56](#), [57](#), [73](#), [93](#), [94](#), [164](#)

tap Mot emprunté de l'anglais pour désigner l'action d'un contact bref et ponctuel d'un doigt sur une surface. En μ Glyphe: $\overset{\circ\bullet}{-}$; $\overset{\bullet\circ}{-}$. [4](#), [9–15](#), [17](#), [18](#), [28](#), [35](#), [38](#), [39](#), [44](#), [45](#), [49](#), [53](#), [56](#), [57](#), [62](#), [66](#), [69](#), [70](#), [73–76](#), [91](#), [93–95](#), [101–105](#), [127](#), [136–140](#), [145–148](#), [151](#), [152](#), [157](#), [164](#), [169](#)

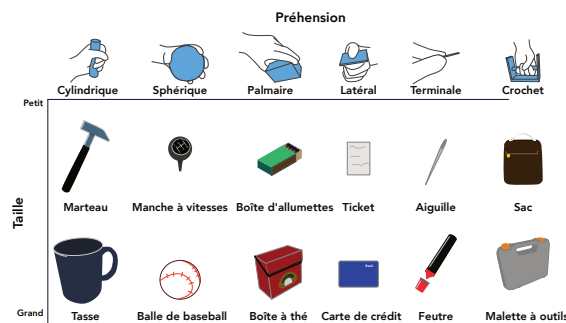
websocket Protocole de communication permettant une communication à double sens sur une seule connexion TCP. [121](#)

Aide à la lecture

Symboles μ Glyphe :

| | Symboles | Assemblages de symboles | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|-------------------------|----------------|----------|--|-----------|--|------------|---|-----------|--|-------------|---|----------|---|-------|-----------------------|-----------|---|--|-----------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|--|--|----------------|-------------------|--|--|---|--|
| | <table border="1"> <thead> <tr> <th>Concept</th> <th>Représentation</th> </tr> </thead> <tr> <td>Contexte</td> <td> En contact ● En l'air ○ Non spécifié - </td> </tr> <tr> <td>Mouvement</td> <td> Pas de mouvements ■ Mouvements ▼ flexion, ▲ extension, ► adduction, ◄ abduction Mouvements personnalisés ○ cercles, □ carrés, ▲ triangles, ⚡ zigzag, ... Non spécifié - </td> </tr> <tr> <td>Actionneur</td> <td>Doigts t pouce, i index, m majeur, r annulaire, p auriculaire</td> </tr> <tr> <td>Récepteur</td> <td> Doigts (●) t pouce, i index, m majeur, r annulaire, p auriculaire Objets (◆) tasse, ... </td> </tr> <tr> <td>Partie Main</td> <td> Phalanges b basse, m médiane, t haute Côtés l gauche, f devant, b derrière, r droite Articulation MCP paume/doigt, PCP phalange/phalange Autres paume, ... </td> </tr> <tr> <td>Pression</td> <td>Niveaux de pression Lo base, Md médian, Hi haut, Lo → Hi, ...</td> </tr> <tr> <td>Durée</td> <td>Temps xs, x < 1s, ...</td> </tr> <tr> <td>Amplitude</td> <td>Niveaux d'amplitude Op ouvert, Ha entrouvert, Cl fermé, → Ha, x%,</td> </tr> </table> | Concept | Représentation | Contexte | En contact ● En l'air ○ Non spécifié - | Mouvement | Pas de mouvements ■ Mouvements ▼ flexion, ▲ extension, ► adduction, ◄ abduction Mouvements personnalisés ○ cercles, □ carrés, ▲ triangles, ⚡ zigzag, ... Non spécifié - | Actionneur | Doigts t pouce, i index, m majeur, r annulaire, p auriculaire | Récepteur | Doigts (●) t pouce, i index, m majeur, r annulaire, p auriculaire Objets (◆) tasse, ... | Partie Main | Phalanges b basse, m médiane, t haute Côtés l gauche, f devant, b derrière, r droite Articulation MCP paume/doigt, PCP phalange/phalange Autres paume, ... | Pression | Niveaux de pression Lo base, Md médian, Hi haut, Lo → Hi, ... | Durée | Temps xs, x < 1s, ... | Amplitude | Niveaux d'amplitude Op ouvert, Ha entrouvert, Cl fermé, → Ha, x%, | <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Évènement</th> </tr> <tr> <th>position initiale = position finale</th> <th>position initiale ≠ position finale</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <th>Structure main</th> <th>Structure concise</th> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2"> Microgeste Élémentaire <input type="checkbox"/> Choix <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Séquence <input type="checkbox"/> ; <input type="checkbox"/> Parallélisme <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> </td> </tr> </tbody> </table> | Évènement | | position initiale = position finale | position initiale ≠ position finale | | | Structure main | Structure concise | | | Microgeste Élémentaire <input type="checkbox"/> Choix <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Séquence <input type="checkbox"/> ; <input type="checkbox"/> Parallélisme <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> | |
| Concept | Représentation | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Contexte | En contact ● En l'air ○ Non spécifié - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mouvement | Pas de mouvements ■ Mouvements ▼ flexion, ▲ extension, ► adduction, ◄ abduction Mouvements personnalisés ○ cercles, □ carrés, ▲ triangles, ⚡ zigzag, ... Non spécifié - | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Actionneur | Doigts t pouce, i index, m majeur, r annulaire, p auriculaire | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Récepteur | Doigts (●) t pouce, i index, m majeur, r annulaire, p auriculaire Objets (◆) tasse, ... | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Partie Main | Phalanges b basse, m médiane, t haute Côtés l gauche, f devant, b derrière, r droite Articulation MCP paume/doigt, PCP phalange/phalange Autres paume, ... | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pression | Niveaux de pression Lo base, Md médian, Hi haut, Lo → Hi, ... | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Durée | Temps xs, x < 1s, ... | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Amplitude | Niveaux d'amplitude Op ouvert, Ha entrouvert, Cl fermé, → Ha, x%, | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Évènement | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| position initiale = position finale | position initiale ≠ position finale | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Structure main | Structure concise | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Microgeste Élémentaire <input type="checkbox"/> Choix <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Séquence <input type="checkbox"/> ; <input type="checkbox"/> Parallélisme <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Douze contextes de **préhension** :



Ensemble de microgestes basé sur l'actionneur :

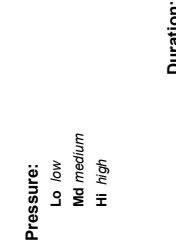
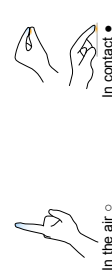
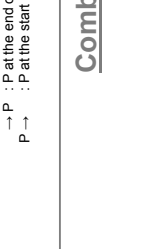
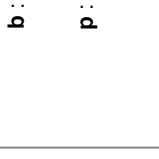

Dans cet ensemble, l'action du microgeste est un **tap** ou un **press**. La distinction d'un microgeste par rapport à l'autre se fait uniquement sur l'actionneur et la zone de l'actionneur utilisée. Ainsi, nous considérons les actionneurs pouce, index et majeur ainsi que les phalanges haute et **médiane ou basse (mob)**. De plus, nous considérons aussi l'actionneur correspondant à pouce, index et majeur combiné pour la phalange haute.

$$(x, y) \in \{t|i|m\} \times \{t|mob\} \cup \{(t|i|m, t)\}, \left(\begin{matrix} \circ & \circ \\ x & y \\ \blacktriangledown & \blacktriangle \end{matrix} ; \begin{matrix} \circ & \circ \\ x & y \\ \blacktriangle & \blacktriangledown \end{matrix} \right) \left| \left(\begin{matrix} \blacktriangledown & \blacktriangle \\ x & y \\ \text{Lo} \rightarrow \text{Hi} & \text{Hi} \rightarrow \text{Lo} \end{matrix} ; \begin{matrix} \blacktriangle & \blacktriangledown \\ x & y \\ \text{Hi} \rightarrow \text{Lo} & \text{Lo} \rightarrow \text{Hi} \end{matrix} \right)$$

Annexe A

Antisèche pour l'étude expérimentale μ Glyphe

Antisèche utilisée lors de l'étude expérimentale sur la notation μ Glyphe présentée en [section 2.4](#).

| <p><u>Movement</u></p>  <p>Flexion ▼</p> <p>Extension ▲</p> <p>Adduction ▶</p> <p>Abduction ◀</p> <p>Static ■</p> <p>In the air ○</p> <p>In contact •</p> | <p><u>Contact</u></p> <p>○ • 2 dots: Final and starting positions are different</p> <p>○ 1 dot: Final and starting positions are identical</p> | <p><u>Properties</u></p> <p>Pressure:</p> <p>Lo <i>low</i></p> <p>Mid <i>medium</i></p> <p>Hi <i>high</i></p> <p>Amplitude: %</p> <p>Cl <i>close</i></p> <p>Ha <i>half</i></p> <p>Op <i>open</i></p> <p>Duration: s</p> | | |
|--|---|---|--|--|
| <p><u>Actuator</u></p> <p>Standard Concise</p>  <p>m : middle</p> <p>i : index</p> <p>t : thumb</p> | <p><u>Receiver</u></p> <p>Standard Concise</p>  <p>n : nail</p> <p>t : tip</p> <p>m : middle</p> <p>b : base</p> <p>p : palm</p> | <p>Pressure:</p> <p>Lo <i>low</i></p> <p>Mid <i>medium</i></p> <p>Hi <i>high</i></p> <p>Amplitude: %</p> <p>Cl <i>close</i></p> <p>Ha <i>half</i></p> <p>Op <i>open</i></p> <p>Duration: s</p> <p>P : P during the entire movement</p> <p>P1 → P2 : P1 at the start, P2 at the end of the movement</p> <p>→ P : P at the end of the movement</p> <p>P → : P at the start of the movement</p> | | |
| <p><u>Combination</u></p> <p>;; sequence</p> <p> : choice</p> <p> : parallel</p> | | | <p><u>Factorization</u></p> <p>Index or the middle tap</p> <p>$x \in \{ \text{index} \text{middle} \}, x \in \{ \blacktriangledown, \blacktriangle \}$</p> <p>Index and middle touch on the palm</p>  | <p><u>Encapsulation</u></p> <p>Arrow replaced by the 2d drawing</p>  |

Annexe B

Microgestes de la littérature

Les tableaux ci-après présentent des microgestes tirés d'articles de la littérature. Chaque description μ Glyphe a été exportée de μ Dex en utilisant l'exportation \LaTeX pour μ Glyphe.

TABLE B.1: Première partie de la série de microgestes dérivés du motif $\overset{\circ}{-}; \overset{\circ}{-}$.
Microgeste **Article** **μ Glyphe**

| Microgeste | Article | μ Glyphe |
|------------------------|-----------------------------|--|
| Click | Chan et coll. 2013 [20] | $\overset{\circ}{\nabla}_t(\bullet_t); \overset{\circ}{\blacktriangle}_t$ |
| Closed Gap touch | Way et coll. 2014 [118] | $x_0 \in \{t i m r p\},$ $x_1 \in \{t i m r p\}, x_0 \neq x_1,$ $\overset{\circ}{\nabla}_{x_0}(\bullet_{x_1}) \overset{\circ}{\nabla}_{x_1}(\bullet_{x_0})$ |
| Double Tap | Song et coll. 2011 [106] | $\overset{\circ}{\blacktriangle}_i; \overset{\circ}{\nabla}_i(\bullet_i); \overset{\circ}{\blacktriangle}_i; \overset{\circ}{\nabla}_i(\bullet_i)$ |
| External Surface Touch | Way et coll. 2014 [118] | $\overset{\circ}{\nabla}_{t i m r p}(\bullet)$ |
| Flick | Deyle et coll. 2007 [28] | $x \in \{i m r p\}, \overset{\circ}{\blacksquare}_n(t \bullet); \overset{\circ}{\blacktriangle}_x$ |
| Finger Pinch | Way et coll. 2014 [118] | $\overset{\circ}{\nabla}_{(i m r p) \bullet (b m t)}$ |
| Finger Tap | Soliman et coll. 2018 [105] | $\overset{\circ}{\nabla}_{(i m r) \bullet (b m t)}$ |
| Fist Tap | Soliman et coll. 2018 [105] | $\overset{\circ}{\nabla}_t(\bullet) \overset{\circ}{\blacksquare}_{i i m r p}$ |
| Make a fist | Chan et coll. 2016 [18] | $\overset{\circ}{\nabla}_{t i i m r p}$ $\rightarrow ct$ |
| Mult Flicks | Lee et coll. 2020 [75] | $x \in \{i m m r r p i m r m r p i m r p\},$ $\overset{\circ}{\blacksquare}_n(t \bullet); \overset{\circ}{\blacktriangle}_x$ |
| Mult Taps | Lee et coll. 2020 [75] | $x \in \{i m m r r p i m r m r p i m r p\},$ $y \in \{\text{nail center} \text{nail tip}\},$ $\overset{\circ}{\nabla}_t(\bullet_x \bullet_y); \overset{\circ}{\blacktriangle}_t$ |
| Pinch gesture | Saponas et coll. 2009 [99] | $\overset{\circ}{\nabla}_{(i m r p) \bullet}_t \overset{\circ}{\blacktriangle}_t$ |
| Press on tip of index | Chan et coll. 2013 [20] | $\overset{\circ}{\nabla}_t(\bullet_t)$ |
| Snip | Wolf et coll. 2011 [122] | $(\overset{\circ}{\blacktriangleright}_{(m) \bullet} \overset{\circ}{\blacktriangle}_{(i) \bullet}); (\overset{\circ}{\blacktriangle}_{(i) \bullet} \overset{\circ}{\blacktriangleright}_{(m) \bullet})$ |
| Stretch | Sharma et coll. 2019 [103] | $\overset{\circ}{\blacktriangle}_{r p}(\bullet)$ |
| Stretch | Sharma et coll. 2019 [103] | $\overset{\circ}{\blacktriangle}_{m r p}(\bullet_p)$ |

TABLE B.2: Seconde partie de la série de microgestes dérivés du motif $\overset{\circ\circ}{\nabla}; \overset{\circ\circ}{-}$.

| Microgeste | Article | μ Glyphe |
|--|------------------------------|---|
| Tab | Wolf et coll. 2011 [122] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_{i m r p}(t \bullet_t)$ |
| Tab | Wolf et coll. 2011 [122] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_{i m r i m}(\bullet)$ |
| Tab index or middle on object | Wolf et coll. 2011 [122] | $x \in \{i m\}, y \in \{\}, \overset{\circ\circ}{\nabla}_x(\bullet); \overset{\circ\circ}{\nabla}_x(\bullet)$ |
| Tap | Huang et coll. 2016 [56] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_{t(i m r p \bullet b m t)}$ |
| Tap | Lee et coll. 2020 [75] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_{t(i m r p \bullet \text{nail tip nail root nail inner nail outer nail center})}; \overset{\circ\circ}{\nabla}_t$ |
| Tap | Sharma et coll. 2019 [103] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_t(\bullet); \overset{\circ\circ}{\nabla}_t$ |
| Tap | Sharma et coll. 2019 [103] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_m(\bullet); \overset{\circ\circ}{\nabla}_m$ |
| Tap | Sharma et coll. 2019 [103] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_i(\bullet); \overset{\circ\circ}{\nabla}_i$ |
| Tap | Sharma et coll. 2021 [102] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_{t i m}(\bullet); \overset{\circ\circ}{\nabla}_{t i m}$ |
| Tap | Whitmire et coll. 2017 [119] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_t(i m r p \bullet b m t); \overset{\circ\circ}{\nabla}_t$ |
| Tap all fingers together | Chan et coll. 2016 [18] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_{t i m r p}(\bullet)$ |
| Tap and Flap | Soliman et coll. 2018 [105] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_t(i \bullet b m t) \left(\left \overset{\circ\circ}{\nabla}_{m r p} \right \overset{\circ\circ}{\nabla}_{m r p} \right)$ $\overset{\circ\circ}{\nabla}_{i m}(\bullet) \left \overset{\circ\circ}{\nabla}_{i m}(\bullet) \right)$ |
| Tap index and middle finger together | Chan et coll. 2016 [18] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_{i m}(\bullet) \left \overset{\circ\circ}{\nabla}_{i m}(\bullet) \right)$ |
| Tap of the thumb on other fingers phalanx and nail | Wambecke et coll. 2021 [117] | $\left(\overset{\circ\circ}{\nabla}_{i m}(\bullet b m t) \right); \overset{\circ\circ}{\nabla}_{i m}(\bullet_{t,i}); \overset{\circ\circ}{\nabla}_{i m}(\bullet_n); \overset{\circ\circ}{\nabla}_t$ |
| Tap palm with index, middle and ring fingers | Chan et coll. 2016 [18] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_{i m r}(\bullet_p)$ |
| Tap palm with thumb | Chan et coll. 2016 [18] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_t(\bullet_p)$ |
| Tap the wheel | Wolf et coll. 2011 [122] | $x \in \{t i i m r p\}; \overset{\circ\circ}{\nabla}_x(\bullet)$ |
| Tap thumb and pinky | Chan et coll. 2016 [18] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_p(\bullet)$ |
| Tap thumb with middle finger | Chan et coll. 2016 [18] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_m(\bullet)$ |
| Tap thumb with index and middle finger | Chan et coll. 2016 [18] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_{i m}(\bullet)$ |
| Tap thumb with index finger | Chan et coll. 2016 [18] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_i(\bullet)$ |
| Tap thumb with ring and pinky finger | Chan et coll. 2016 [18] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_{r p}(\bullet)$ |
| Tap thumb with ring finger | Chan et coll. 2016 [18] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_r(\bullet)$ |
| Tap to the very tip | Chan et coll. 2013 [20] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_t(i \bullet_{\text{very tip}}); \overset{\circ\circ}{\nabla}_t$ |
| Thumb Up | Wolf et coll. 2011 [122] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_t$ |
| Touch | Wolf et coll. 2011 [122] | $\overset{\circ\circ}{\nabla}_t(i m r p \bullet_n)$ |

TABLE B.3: Microgestes utilisant la pression.

| Microgeste | Article | μ Glyphe |
|------------|------------------------------|---|
| Force Tap | Whitmire et coll. 2017 [119] | $x \in \{i m r p\}, y \in \{b m t\},$ |
| Press | Saponas et coll. 2009 [99] | |
| Press | Sharma et coll. 2019 [103] | |
| Press | Sharma et coll. 2019 [103] | |
| Press | Sharma et coll. 2019 [103] | |
| Press | Wolf et coll. 2011 [122] | |
| Press | Yi et coll. 2019 [125] | |
| Pull | Saponas et coll. 2009 [99] | |

TABLE B.4: Première partie de la série de microgestes dérivés du motif $\overset{\circ\circ}{-}$.

| Microgeste | Article | μ Glyphe |
|--|------------------------------|--|
| Drag Index or Middle finger on stylus up or down | Wolf et coll. 2011 [122] | $\overset{\circ\circ}{i im} \overset{\circ\circ}{\nabla}(\bullet) \overset{\circ\circ}{i im} \overset{\circ\circ}{\blacktriangle}(\bullet)$ |
| Drag and Drop Index on Thumb | Wolf et coll. 2011 [122] | $\overset{\circ\circ}{i} \overset{\circ\circ}{-}(\bullet); \overset{\circ\circ}{i} \overset{\circ\circ}{\nabla}(\bullet); \overset{\circ\circ}{i} \overset{\circ\circ}{-}$ |
| Drag and Drop Middle on Index | Wolf et coll. 2011 [122] | $\overset{\circ\circ}{m} \overset{\circ\circ}{-}(\bullet_d); \overset{\circ\circ}{m} \overset{\circ\circ}{\nabla}(\bullet_d); \overset{\circ\circ}{m} \overset{\circ\circ}{-}$ |
| Drag and Drop Thumb on Index-side | Wolf et coll. 2011 [122] | $x \in \{i m r p\}, \overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{-}(\bullet_n); \overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{\blacktriangleright}(\bullet_n); \overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{-}$ |
| Drag fingers around the wheel | Wolf et coll. 2011 [122] | $\overset{\circ\circ}{i i r p} \overset{\circ\circ}{\nabla}(\bullet)$ |
| Drag middle finger above object | Wolf et coll. 2011 [122] | $\overset{\circ\circ}{m} \overset{\circ\circ}{\blacktriangle}(\bullet)$ |
| Drag thumb along object | Wolf et coll. 2011 [122] | $\overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{\blacktriangleleft}(\bullet) \overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{\blacktriangleright}(\bullet)$ |
| Drag thumb around object | Wolf et coll. 2011 [122] | $\overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{\nabla}(\bullet) \overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{\blacktriangle}(\bullet)$ |
| Extension | Sharma et coll. 2021 [102] | $\overset{\circ\circ}{t i im} \overset{\circ\circ}{\blacktriangle}(\bullet)$ |
| Fingertip slide | Soliman et coll. 2018 [105] | $\overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{\blacktriangleleft}(\overset{\circ\circ}{i i mr} \bullet_n) \overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{\blacktriangleright}(\overset{\circ\circ}{i i mr} \bullet_n)$ |
| Flexion | Sharma et coll. 2021 [102] | $\overset{\circ\circ}{t i im} \overset{\circ\circ}{\nabla}(\bullet)$ |
| Flip | Wolf et coll. 2011 [122] | $\overset{\circ\circ}{i i mr p} \overset{\circ\circ}{\blacktriangle}(\bullet); \overset{\circ\circ}{i i mr p} \overset{\circ\circ}{\blacktriangle}$ |
| HSwipe | Lee et coll. 2020 [75] | $x \in \{i m r p\}, y \in \{\text{nail top} \text{nail center} \text{nail root}\},$ $\overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{-}(\bullet_y); \left(\overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{\blacktriangleleft}(\bullet_y) \overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{\blacktriangleright}(\bullet_y) \right); \overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{-}$ |
| Linear Finger to Thumb slide | Soliman et coll. 2018 [105] | $\overset{\circ\circ}{i i mr} \overset{\circ\circ}{\nabla}(\bullet) \overset{\circ\circ}{i i mr} \overset{\circ\circ}{\blacktriangle}(\bullet)$ |
| Linear Thumb to Finger slide | Soliman et coll. 2018 [105] | $\overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{\nabla}(\overset{\circ\circ}{i i mr} \bullet_{lr}) \overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{\blacktriangle}(\overset{\circ\circ}{i i mr} \bullet_{lr})$ |
| Move | Chan et coll. 2016 [18] | $\overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{-}(\bullet_t)$ |
| Mult HSwipe | Lee et coll. 2020 [75] | $x \in \{i m m r r p i m r m r p i m r p\},$ $y \in \{\text{nail tip} \text{nail center} \text{nail root}\},$ $\overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{-}(\bullet_y); \left(\overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{\blacktriangleleft}(\bullet_y) \overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{\blacktriangleright}(\bullet_y) \right); \overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{-}$ |
| Multi-finger snap | Deyle et coll. 2007 [28] | $\overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{-}(\bullet_p); \overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{\blacktriangleleft}(\bullet); \overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{\blacktriangleleft}(\bullet_m); \overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{\blacktriangleleft}(\bullet); \overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{-}$ |
| Ream | Wolf et coll. 2011 [122] | $\overset{\circ\circ}{i i mr p} \overset{\circ\circ}{\nabla}(\bullet_t) \overset{\circ\circ}{i i mr p} \overset{\circ\circ}{\blacktriangle}(\bullet_t)$ |
| Rotational thumb-to-finger slide | Soliman et coll. 2018 [105] | $\overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{\blacktriangleleft}(\overset{\circ\circ}{i i mr} \bullet_{b mr}) \overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{\blacktriangleright}(\overset{\circ\circ}{i i mr} \bullet_{b mr})$ |
| Slide | Whitmire et coll. 2017 [119] | $x \in \{i m r p\}, y \in \{b m t\},$ $\overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{-}(\bullet_x); \left(\overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{\nabla}(\bullet_x) \overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{\blacktriangle}(\bullet_x) \right); \overset{\circ\circ}{t} \overset{\circ\circ}{-}$ |

TABLE B.5: Seconde partie de la série de microgestes dérivés du motif $\overset{\bullet\bullet}{-}$.

| Microgeste | Article | μ Glyphe |
|---|----------------------------|---|
| Swipe | Sharma et coll. 2019 [103] | $\overset{\bullet\bullet}{\leftarrow}(\bullet) _t\overset{\bullet\bullet}{\rightarrow}(\bullet)$ |
| Swipe | Sharma et coll. 2019 [103] | $\overset{\bullet\bullet}{\nabla}(\bullet); \overset{\bullet\bullet}{\blacktriangle}(\bullet)$ |
| Swipe | Sharma et coll. 2019 [103] | $\overset{\bullet\bullet}{\leftarrow}(\bullet) _m\overset{\bullet\bullet}{\rightarrow}(\bullet)$ |
| Swipe | Sharma et coll. 2019 [103] | $\overset{\bullet\bullet}{\nabla}(\bullet) _m\overset{\bullet\bullet}{\blacktriangle}(\bullet)$ |
| Swipe | Sharma et coll. 2019 [103] | $\overset{\bullet\bullet}{\leftarrow}(\bullet) _i\overset{\bullet\bullet}{\rightarrow}(\bullet)$ |
| Swipe | Sharma et coll. 2019 [103] | $\overset{\bullet\bullet}{\nabla}(\bullet) _i\overset{\bullet\bullet}{\blacktriangle}(\bullet)$ |
| Swipe | Song et coll. 2011 [106] | $\overset{\bullet\bullet}{i t}-$ |
| Swipe Left | Sharma et coll. 2021 [102] | $\overset{\bullet\bullet}{t j m}\overset{\bullet\bullet}{\leftarrow}(\bullet)$ |
| Swipe Right | Sharma et coll. 2021 [102] | $\overset{\bullet\bullet}{t j m}\overset{\bullet\bullet}{\rightarrow}(\bullet)$ |
| Swipe across all fingers with thumb | Chan et coll. 2016 [18] | $\overset{\circ\circ}{t}(\bullet_p); \overset{\bullet\bullet}{\leftarrow}(\bullet_t); \overset{\bullet\bullet}{\leftarrow}(\bullet_m); \overset{\bullet\bullet}{\leftarrow}(\bullet_i); \overset{\circ\circ}{t}-$ |
| Swipe index and middle fingers with thumb | Chan et coll. 2016 [18] | $\overset{\circ\circ}{t}(\bullet); \left(\overset{\bullet\bullet}{\nabla}(\bullet_{i m}) _t\overset{\bullet\bullet}{\blacktriangle}(\bullet_{i m}) \right); \overset{\circ\circ}{t}-$ |
| Swipe index finger with thumb | Chan et coll. 2016 [18] | $\overset{\circ\circ}{t}(\bullet_i); \left(\overset{\bullet\bullet}{\nabla}(\bullet_i) _t\overset{\bullet\bullet}{\blacktriangle}(\bullet_i) \right); \overset{\circ\circ}{t}-$ |
| Swipe middle and ring fingers with thumb | Chan et coll. 2016 [18] | $\overset{\circ\circ}{t}(\bullet_{m r}); \left(\overset{\bullet\bullet}{\nabla}(\bullet_{m r}) _t\overset{\bullet\bullet}{\blacktriangle}(\bullet_{m r}) \right); \overset{\circ\circ}{t}-$ |
| Swipe middle finger with thumb | Chan et coll. 2016 [18] | $\overset{\circ\circ}{t}(\bullet_m); \left(\overset{\bullet\bullet}{\nabla}(\bullet_m) _t\overset{\bullet\bullet}{\blacktriangle}(\bullet_m) \right); \overset{\circ\circ}{t}-$ |
| Swipe thumb leftward | Chan et coll. 2013 [20] | $\overset{\bullet\bullet}{\leftarrow}(\bullet_t)$ |
| Thumb index rub backward | Deyle et coll. 2007 [28] | $\overset{\bullet\bullet}{\leftarrow}(\bullet_i)$ |
| V Swipe | Lee et coll. 2020 [75] | $x \in \{i m r p\},$ $y \in \{\text{nail inner} \text{nail center} \text{nail outer}\},$ $\overset{\circ\circ}{t}(\bullet_{x,y}); \left(\overset{\bullet\bullet}{\nabla}(\bullet_{x,y}) _t\overset{\bullet\bullet}{\blacktriangle}(\bullet_{x,y}) \right); \overset{\circ\circ}{t}-$ |

TABLE B.6: Microgestes dérivés du motif $\overset{\circ\circ}{-}$.

| Microgeste | Article | μ Glyphe |
|---------------|--------------------------------|--|
| Down | Endres et coll. 2011 [33] | $\overset{\circ\circ}{i} \blacktriangledown$ |
| Finger Curl | Way et coll. 2014 [118] | $t i m r p \overset{\circ\circ}{\blacktriangledown}$ |
| Finger Extend | Way et coll. 2014 [118] | $t i m r p \overset{\circ\circ}{\blacktriangle} \text{ MCP}$ |
| Finger Lift | Way et coll. 2014 [118] | $t i m r p \overset{\circ\circ}{\blacktriangledown} \text{ MCP}$ |
| Left | Endres et coll. 2011 [33] | $\overset{\circ\circ}{i} \blacktriangleleft$ |
| Open Palm | Hauslschmid et coll. 2015 [52] | $t i m r p \overset{\circ\circ}{\blacktriangle}$ |
| Right | Endres et coll. 2011 [33] | $\overset{\circ\circ}{i} \blacktriangleright$ |
| Stretch | Sharma et coll. 2019 [103] | $r p \overset{\circ\circ}{\blacktriangle}$ |
| Swipe | Hauslschmid et coll. 2015 [52] | $\overset{\circ\circ}{i} \blacktriangleright \overset{\circ\circ}{i} \blacktriangleleft$ |
| Up | Endres et coll. 2011 [33] | $\overset{\circ\circ}{i} \blacktriangle$ |

TABLE B.7: Microgestes décrivant un dessin

| Microgeste | Article | μ Glyphe |
|---|--------------------------------|---|
| Clock wise and counter clockwise circle | Hauslschmid et coll. 2015 [52] | $\overset{\circ}{\circ} \overset{\circ}{\circ}$ |
| Circle | Chan et coll. 2013 [20] | ${}_t\ddot{\circ}(\bullet)_t {}_t\ddot{\circ}(\bullet)_t$ |
| Circle | Huang et coll. 2016 [56] | ${}_t\ddot{\circ}(\bullet_{(i m r p)}\bullet_{b m t}) {}_t\ddot{\circ}(\bullet_{(i m r p)}\bullet_{b m t})$ |
| Circle | Sharma et coll. 2021 [102] | ${}_{t i m}\ddot{\circ}(\bullet)$ |
| Circle CW | Endres et coll. 2011 [33] | $\overset{\circ}{\circ}_i$ |
| Circle CCW | Endres et coll. 2011 [33] | $\overset{\circ}{\circ}_i$ |
| Circle CW & CCW | Wolf et coll. 2011 [122] | $x \in \{i m r p\}, {}_t\ddot{\circ}(x\bullet_n) {}_t\ddot{\circ}(x\bullet_n)$ |
| Circle sidewise | Wolf et coll. 2011 [122] | ${}_t\ddot{\circ}({}_{i m r p}\bullet) {}_t\ddot{\circ}({}_{i m r p}\bullet)$ |
| Circle thumb over side of index finger | Chan et coll. 2016 [18] | ${}_t\ddot{\circ}(\bullet)$ |
| Draw Circle | Soliman et coll. 2018 [105] | ${}_t\ddot{\blacksquare}(\bullet_b); {}_t\ddot{\circ}(\bullet_{(i m r p)}\bullet)$ |
| Square | Huang et coll. 2016 [56] | ${}_t\ddot{\blacksquare}(\bullet_{(i m r p)}\bullet_{b m t}) {}_t\ddot{\blacksquare}(\bullet_{(i m r p)}\bullet_{b m t})$ |
| Square CW | Endres et coll. 2011 [33] | $\overset{\circ}{\square}_i$ |
| Square CCW | Endres et coll. 2011 [33] | $\overset{\circ}{\square}_i$ |
| Triangle | Huang et coll. 2016 [56] | ${}_t\ddot{\triangle}(\bullet_{(i m r p)}\bullet_{b m t}) {}_t\ddot{\triangle}(\bullet_{(i m r p)}\bullet_{b m t})$ |
| Triangle CW | Endres et coll. 2011 [33] | $\overset{\circ}{\triangle}_i$ |
| Triangle CCW | Endres et coll. 2011 [33] | $\overset{\circ}{\triangle}_i$ |
| Zigzag | Sharma et coll. 2021 [102] | ${}_{t i m}\ddot{\zeta}(\bullet)$ |

Annexe C

Analyse statistiques de l'étude utilisateur évaluant la notation μ Glyphe

Lors de l'analyse de l'étude utilisateur évaluant la notation μ Glyph [section 2.4](#), nous avons opté pour une analyse visuelle des données basée sur le [Intervalle de Confiance \(IC\)](#). Dans cette section, nous vérifions l'analyse des résultats obtenus avec cette approche en refaisant l'analyse avec des tests statistiques. Les tests ont été réalisés à l'aide de Jamovi¹. Un test de Shapiro-Wilk a été utilisé pour tester si les distributions étudiées suivent la loi normale.

Temps (Lecture) Les distributions du temps de lecture pour texte+image et μ Glyphe concis suivent une distribution normale (p-valeur > 0,17), mais pas pour μ Glyphe standard (p-valeur = 0,04). Un test de Friedman indique un effet significatif du type de représentation sur le temps de lecture ($\chi^2 = 15.5, df = 2, p - valeur < 0.001$). Un test post-hoc de Durbin-Conover montre une différence significative entre texte+image et μ Glyphe standard, entre texte+image et μ Glyphe concis, mais pas entre μ Glyphe standard et μ Glyphe concis. Cette analyse statistique donne les mêmes résultats que l'analyse visuelle utilisée dans ce manuscrit (??).

Confiance (Lecture) Les distributions de confiance pour texte+image, μ Glyphe standard et μ Glyphe concis suivent toutes une distribution normale (p-valeur > 0,30). Une ANOVA à mesures répétées indique un effet significatif du type de représentation sur la confiance ($F = 12, 6, df = 2, p - valeur < 0, 001$). Un test post-hoc montre une différence significative entre texte+image et μ Glyphe standard, entre texte+image et μ Glyphe concis, mais pas entre μ Glyphe standard et μ Glyphe concis. Cette analyse statistique donne les mêmes résultats que l'analyse visuelle utilisée dans ce manuscrit (??).

1. <https://www.jamovi.org>

Annexe D

Activités Scientifiques

Cette annexe décrit les activités scientifiques réalisées pendant cette thèse.

D.1 Publications

Cette section regroupe les travaux de recherche publiés ou en cours de soumission réalisés pendant la thèse. Les PDF des articles sont accessibles sur HAL.

CONFÉRENCE INTERNATIONALE AVEC COMITÉ DE LECTURE

1. **Adrien Chaffangeon Caillet**, Alix Goguy & Laurence Nigay. 3D Selection in Mixed Reality : Designing a Two-Phase Technique To Reduce Fatigue. In 2023 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2023). [[chapitre 10](#)]
2. Vincent Lambert, **Adrien Chaffangeon Caillet**, Alix Goguy, Sylvain Malacria & Laurence Nigay. Studying the visual representation of microgestures. In the 25th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI 2023). [Article Connexe]
3. **Adrien Chaffangeon Caillet**, Alix Goguy & Laurence Nigay. μ Glyph : a Micogesture Notation. In the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2023). [[chapitre 2](#)]

CONFÉRENCE NATIONALE AVEC COMITÉ DE LECTURE

4. **Adrien Chaffangeon**, Alix Goguy & Laurence Nigay. μ Glyphe : Une Notation Graphique pour Décrire les Microgestes. À la 33ème conférence francophone sur l'Interaction Humain-Machine (IHM 20-21). [[chapitre 2](#)]

EN COURS DE SOUMISSION

5. **Adrien Chaffangeon**, Alix Goguy & Laurence Nigay. Microgesture + Grasp : a journey from human capabilities to interaction with microgestures. Soumis à International Journal of Human-Computer Studies. [Chapitre [chapitre 3](#),[chapitre 6](#)&[chapitre 7](#) : Gant V2 avec études associées]

Le [chapitre 5](#) et le [chapitre 8](#) feront l'objet d'une soumission à EICS en 2024.

RENCONTRES DOCTORALES

1. **Adrien Chaffangeon** Journée des doctorants du LIG 2022. Prix de la meilleure présentation.
2. **Adrien Chaffangeon** IHM 20-21.

D.2 Autres activités

ENGAGEMENT DANS LA COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE

1. Relecteur : CHI (1), CHI LBW (3), INTERACT (2), IHM (1), EICS (2), ISMAR (1).
2. Session chair : IHM'23
3. Associate chair : IHM'24
4. Représentant des doctorants à la commission recherche : Septembre 2023-Décembre 2023

ENSEIGNEMENT

1. Total de 216 heures réparties entre CM et TD à l'IUT MMI (2A), Polytech Grenoble (5A) et l'UFR IM2AF (L3 et M2) de l'Université Grenoble Alpes
2. Création du cours collectif pour Polytech Grenoble (étudiants informatique 5A)
3. Enseignant référent pour les stages en industrie à Polytech
4. Jury pour les projets étudiants de l'ENSIMAG (5A)

ENCADREMENT

1. **Pedro Pablo Vega Fernandez** : Stage de L2 sur la fabrication de manchons pour le gant modulaire. *Mai-Juin 2023*. Co-supervisé avec Aurélien Conil.

2. **Vincent Lambert** : Stage de M2 sur la représentation visuelle des microgestes[73]. *Février-Juillet 2022*. Co-supervisé avec Alix Goguey et Laurence Nigay.
3. **Carla Coutant** : Stage de L2 sur l'extraction des définitions et illustrations de microgestes dans la littérature et traduction de ces microgestes avec μ Glyphe. *Juin-Juillet 2022*.
4. **Matthieu Gillet** : Stage de M2 sur la saisie de textes au clavier pour écran sphérique manipulable à perspective corrigée. *Février-Juillet 2021*. Co-supervisé avec François Bérard.

MÉDIATION SCIENTIFIQUE

1. **Adrien Chaffangeon & Alix Goguey**. Introduction à l'interaction humain-machine, Pint of Science (2022)
2. **Adrien Chaffangeon**. Introduction à l'interaction humain-machine, Notre Dame de Charlieu (2022)

PROJETS COLLABORATIFS

1. Projet MIC : cette thèse, ainsi que la thèse de Gauthier Faisandaz et les travaux de Wambecke et coll. [117], ont contribué à la création du projet ANR MIC (2022-2026) coordonné par Laurence Nigay. Je suis membre actif de ce projet.
2. Projet iGlove : le [chapitre 8](#), sur le gant modulaire et le serveur μ Poly, ont contribué à l'obtention d'un financement CARNOT LSI. Je suis membre actif de ce projet.

Annexe E

Bibliographie

- [1] A. Antoine, S. Malacria, N. Marquardt, and G. Casiez. Esquisse : Using 3d models staging to facilitate the creation of vector-based trace figures. In D. Lamas, F. Loizides, L. Nacke, H. Petrie, M. Winckler, and P. Zaphiris, editors, *Human-Computer Interaction – INTERACT 2019*, pages 496–516, Cham, 2019. Springer International Publishing.
- [2] M. A. Arbib. Coordinated control programs for movement of the hand. *Hand Function and the Neocortex*, pages 111–129, 1985.
- [3] F. Argelaguet and C. Andujar. A survey of 3d object selection techniques for virtual environments. *Computers & Graphics*, 37(3) :121–136, 2013.
- [4] R. Arunachalam, V. S. Weerasinghe, and K. R. Mills. Motor control of rapid sequential finger tapping in humans. *Journal of Neurophysiology*, 94(3) :2162–2170, 2005. PMID : 15928053.
- [5] D. L. Ashbrook. *Enabling Mobile Microinteractions*. PhD thesis, USA, 2010. AAI3414437.
- [6] S. Balbo, N. Ozkan, and C. Paris. Choosing the right task-modeling notation : A taxonomy. *The handbook of task analysis for human-computer interaction*, 1 :445–465, 2004.
- [7] M. Baloup, T. Pietrzak, and G. Casiez. RayCursor : A 3D Pointing Facilitation Technique based on Raycasting. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '19*, pages 1–12, Glasgow, Scotland Uk, 2019. ACM Press.
- [8] T. Baudel and M. Beaudouin-Lafon. Charade : Remote control of objects using free-hand gestures. *Commun. ACM*, 36(7) :28–35, jul 1993.
- [9] R. Benesh and J. Benesh. *Reading dance : the birth of choreology / by Rudolf and Joan Benesh*. Souvenir Press London, London, UK, 1977.
- [10] F. Beruscha, K. Mueller, and T. Sohnke. Eliciting tangible and gestural user interactions with and on a cooking pan. In *Proceedings of the Conference on Mensch Und Computer, MuC '20*, page 399–408, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.

- [11] R. Blanch and M. Ortega. Benchmarking pointing techniques with distractors : Adding a density factor to fitts' pointing paradigm. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, page 1629–1638, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.
- [12] J. Blattgerste, P. Renner, and T. Pfeiffer. Advantages of eye-gaze over head-gaze-based selection in virtual and augmented reality under varying field of views. In *Proceedings of the Workshop on Communication by Gaze Interaction*, COGAIN '18, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [13] R. Boldu, A. Dancu, D. J. Matthies, P. G. Cascón, S. Ransir, and S. Nayakkara. Thumb-in-motion : Evaluating thumb-to-ring microgestures for athletic activity. In *Proceedings of the 2018 ACM Symposium on Spatial User Interaction*, SUI '18, page 150–157, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [14] G. A. Borg. Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine and science in sports and exercise*, 14(5) :377–381, 1982.
- [15] A. Chaffangeon, A. Goguey, and L. Nigay. μ glyph : A graphical notation to describe microgestures. In *Proceedings of the 33rd Conference on l'Interaction Humain-Machine*, IHM '22, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [16] A. Chaffangeon Caillet, A. Goguey, and L. Nigay. 3D Selection in Mixed Reality : Designing a Two-Phase Technique To Reduce Fatigue. In *2023 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, Sydney (Australia), Australia, Oct. 2023.
- [17] A. Chaffangeon Caillet, A. Goguey, and L. Nigay. μ glyph : a microgesture notation. In *In Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '23)*, New York, NY, USA, To Be Published 2023.
- [18] E. Chan, T. Seyed, W. Stuerzlinger, X.-D. Yang, and F. Maurer. User elicitation on single-hand microgestures. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, page 3403–3414, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [19] L. Chan, Y. L. Chen, C. H. Hsieh, R. H. Liang, and B. Y. Chen. Cyclopsring : Enabling whole-hand and context-aware interactions through a fisheye ring. *UIST 2015 - Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, (October) :549–556, 2015.
- [20] L. Chan, R.-H. Liang, M.-C. Tsai, K.-Y. Cheng, C.-H. Su, M. Y. Chen, W.-H. Cheng, and B.-Y. Chen. Fingerpad : Private and subtle interaction using fingertips. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, page 255–260, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.

- [21] E. Choi, H. Kim, and M. K. Chung. A taxonomy and notation method for three-dimensional hand gestures. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44(1) :171–188, 2014.
- [22] M. Christ, N. Braun, J. Neuffer, and A. Kempa-Liehr. Time series feature extraction on basis of scalable hypothesis tests (tsfresh – a python package). *Neurocomputing*, 307, 05 2018.
- [23] S. T. Chung, G. Kumar, R. W. Li, and D. M. Levi. Characteristics of fixational eye movements in amblyopia : Limitations on fixation stability and acuity? *Vision Research*, 114 :87–99, 2015.
- [24] R. M. S. Clifford, N. M. B. Tuanquin, and R. W. Lindeman. Jedi forceextension : Telekinesis as a virtual reality interaction metaphor. In *2017 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pages 239–240, Los Angeles, CA, USA, 2017. IEEE.
- [25] G. Cumming. Inference by eye : Reading the overlap of independent confidence intervals. *Statistics in medicine*, 28 :205–20, 01 2009.
- [26] C. Dagdeviren, P. Joe, O. L. Tuzman, K.-I. Park, K. J. Lee, Y. Shi, Y. Huang, and J. A. Rogers. Recent progress in flexible and stretchable piezoelectric devices for mechanical energy harvesting, sensing and actuation. *Extreme Mechanics Letters*, 9 :269–281, 2016.
- [27] W. Delamare, C. Coutrix, and L. Nigay. Designing disambiguation techniques for pointing in the physical world. In *Proceedings of the 5th ACM SIGCHI Symposium on Engineering Interactive Computing Systems*, EICS '13, page 197–206, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [28] T. Deyle, S. Palinko, E. S. Poole, and T. Starner. Hambone : A bio-acoustic gesture interface. In *2007 11th IEEE International Symposium on Wearable Computers*, pages 3–10, New York, NY, USA, 2007. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- [29] R. Dobinson, M. Teyssier, J. Steimle, and B. Fruchard. Micropress : Detecting pressure and hover distance in thumb-to-finger interactions. In *Proceedings of the 2022 ACM Symposium on Spatial User Interaction*, SUI '22, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [30] J. A. Dobrzynska and M. A. Gijs. Capacitive flexible force sensor. *Procedia Engineering*, 5 :404–407, 2010. Eurosensor XXIV Conference.
- [31] S. A. Douglas, A. E. Kirkpatrick, and I. S. MacKenzie. Testing pointing device performance and user assessment with the iso 9241, part 9 standard. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '99, page 215–222, New York, NY, USA, 1999. Association for Computing Machinery.
- [32] P. Dragicevic. *Fair Statistical Communication in HCI*, pages 291–330. Springer International Publishing, Cham, 2016.
- [33] C. Endres, T. Schwartz, and C. A. Müller. Geremin" : 2d microgestures for drivers based on electric field sensing. In *Proceedings of the 16th International*

- Conference on Intelligent User Interfaces*, IUI '11, page 327–330, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.
- [34] A. Esteves, D. Verweij, L. Suraiya, R. Islam, Y. Lee, and I. Oakley. Smoothmoves : Smooth pursuits head movements for augmented reality. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, page 167–178, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [35] Facebook. Inside facebook reality labs : Wrist-based interaction for the next computing platform, 2021.
- [36] G. R. J. Faisandaz, A. Goguey, C. Jouffrais, and L. Nigay. Keep in touch : Combining touch interaction with thumb-to-finger μ gestures for people with visual impairment. In *Proceedings of the 2022 International Conference on Multimodal Interaction*, ICMI '22, page 105–116, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [37] G. R. J. Faisandaz, A. Goguey, C. Jouffrais, and L. Nigay. μ get : Multimodal eyes-free text selection technique combining touch interaction and microgestures. In *Proceedings of the 2023 International Conference on Multimodal Interaction*, ICMI '23, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [38] J. Fan, X. Fan, F. Tian, Y. Li, Z. Liu, W. Sun, and H. Wang. What is That in Your Hand? *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 2(4) :1–24, 2018.
- [39] T. Feix, J. Romero, H. B. Schmiedmayer, A. M. Dollar, and D. Kragic. The GRASP Taxonomy of Human Grasp Types. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 46(1) :66–77, 2016.
- [40] N. Fellion, T. Pietrzak, and A. Girouard. Flexstylus : Leveraging bend input for pen interaction. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, page 375–385, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [41] A. Forsberg, K. Herndon, and R. Zeleznik. Aperture based selection for immersive virtual environments. In *Proceedings of the 9th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '96*, pages 95–96, Seattle, Washington, United States, 1996. ACM Press.
- [42] R. Ganhör and W. Spreicer. Monox : Extensible gesture notation for mobile devices. In *Proceedings of the 16th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices & Services*, MobileHCI '14, page 203–212, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [43] M. Geronimi. *Analyse biomécanique de la préhension chez la personne âgée : effet des propriétés intrinsèques et extrinsèques de l'obstacle sur les phases du mouvement*. PhD thesis, 2023.

- [44] T. Green and M. Petre. Usability analysis of visual programming environments : A ‘cognitive dimensions’ framework. *Journal of Visual Languages & Computing*, 7(2) :131–174, 1996.
- [45] T. R. G. Green. Cognitive dimensions of notations. In *A. Sutcliffe and L. Macaulay (Eds.) People and Computers V*, pages 443–460, Cambridge, UK, 1989. Cambridge University Press.
- [46] T. Grossman and R. Balakrishnan. The design and evaluation of selection techniques for 3d volumetric displays. In *Proceedings of the 19th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST ’06, page 3–12, New York, NY, USA, 2006. Association for Computing Machinery.
- [47] A. H. Guest. *Labanotation : The System of Analyzing and Recording Movement : Ann Hu*. Taylor & Francis, New York, NY, USA, Jan 2005.
- [48] A. H. Guest and j. Kolff. *Advanced Labanotation issue 5 : Hands, fingers*. Dance Books Ltd, Hampshire, England, UK, 2002.
- [49] G. Haan, M. Koutek, and F. Post. Intenselect : Using dynamic object rating for assisting 3d object selection. pages 201–209, 01 2005.
- [50] J. P. Hansen, V. Rajanna, I. S. MacKenzie, and P. Bækgaard. A fitts’ law study of click and dwell interaction by gaze, head and mouse with a head-mounted display. In *Proceedings of the Workshop on Communication by Gaze Interaction*, COGAIN ’18, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [51] F. Haque, M. Nancel, and D. Vogel. Myopoint : Pointing and clicking using forearm mounted electromyography and inertial motion sensors. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’15, page 3653–3656, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [52] R. Häuslschmid, B. Menrad, and A. Butz. Freehand vs. micro gestures in the car : Driving performance and user experience. *2015 IEEE Symposium on 3D User Interfaces, 3DUI 2015 - Proceedings*, 0336 :159–160, 2015.
- [53] M. Hesenius and V. Gruhn. Gesturecards : A hybrid gesture notation. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, 3(EICS), jun 2019.
- [54] G. Heumer, H. Ben Amor, and B. Jung. Grasp recognition for uncalibrated data gloves : A machine learning approach. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 17(2) :121–142, 2008.
- [55] J. D. Hincapié-Ramos, X. Guo, P. Moghadasian, and P. Irani. Consumed endurance : A metric to quantify arm fatigue of mid-air interactions. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’14, page 1063–1072, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [56] D.-Y. Huang, L. Chan, S. Yang, F. Wang, R.-H. Liang, D.-N. Yang, Y.-P. Hung, and B.-Y. Chen. Digitspace : Designing thumb-to-fingers touch interfaces for one-handed and eyes-free interactions. In *Proceedings of the*

- 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, page 1526–1537, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [57] A. Huckauf and M. H. Urbina. Object selection in gaze controlled systems : What you don't look at is what you get. *ACM Trans. Appl. Percept.*, 8(2), Feb. 2011.
- [58] T. Iberall. Grasp planning from human prehension. In *Proceedings of the 10th International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume 2*, IJCAI'87, page 1153–1156, San Francisco, CA, USA, 1987. Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- [59] Y. Irvantchi, M. Goel, and C. Harrison. Beamband : Hand gesture sensing with ultrasonic beamforming. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, page 1–10, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [60] Y. Irvantchi, Y. Zhao, K. Kin, and A. P. Sample. Sawsense : Using surface acoustic waves for surface-bound event recognition. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [61] R. J. K. Jacob. What you look at is what you get : Eye movement-based interaction techniques. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems Empowering People - CHI '90*, pages 11–18, Seattle, Washington, United States, 1990. ACM Press.
- [62] S. Jalaliniya, D. Mardanbeigi, T. Pederson, and D. W. Hansen. Head and Eye Movement as Pointing Modalities for Eyewear Computers. In *2014 11th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks Workshops*, pages 50–53, Zurich, Switzerland, June 2014. IEEE.
- [63] A. Jogeshwar, G. Diaz, S. Farnand, and J. Pelz. The cone model : Recognizing gaze uncertainty in virtual environments. volume 32, 01 2020.
- [64] D. Kammer, D. Henkens, C. Henzen, and R. Groh. Gesture Formalization for Multitouch. *Software : Practice and Experience*, 45(4) :527–548, apr 2015.
- [65] M. Khamis, C. Oechsner, F. Alt, and A. Bulling. Vrpursuits : Interaction in virtual reality using smooth pursuit eye movements. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Advanced Visual Interfaces*, AVI '18, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [66] H. Kim, C. Coutrix, and A. Roudaut. Morphees+ : Studying everyday reconfigurable objects for the design and taxonomy of reconfigurable uis. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, page 1–14, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [67] K. Kin, B. Hartmann, T. DeRose, and M. Agrawala. Proton : Multitouch gestures as regular expressions. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, page 2885–2894, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.

- [68] R. Kopper, F. Bacim, and D. A. Bowman. Rapid and accurate 3d selection by progressive refinement. In *2011 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pages 67–74, Singapore, Singapore, 2011. IEEE.
- [69] E. Krupka, K. Karmon, N. Bloom, D. Freedman, I. Gurvich, A. Hurvitz, I. Leichter, Y. Smolin, Y. Tzairi, A. Vinnikov, and A. Bar-Hillel. Toward realistic hands gesture interface : Keeping it simple for developers and machines. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, page 1887–1898, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [70] Y. Kubo, Y. Koguchi, B. Shizuki, S. Takahashi, and O. Hilliges. AudioTouch : Minimally Invasive Sensing of Micro-Gestures via Active Bio-Acoustic Sensing. In *Proceedings of the 21st International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '19, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [71] L.-C. Kuo, H.-Y. Chiu, C.-W. Chang, H.-Y. Hsu, and Y.-N. Sun. Functional workspace for precision manipulation between thumb and fingers in normal hands. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 19(5) :829–839, 2009.
- [72] M. Kytö, B. Ens, T. Piumsomboon, G. A. Lee, and M. Billinghurst. *Pinpointing : Precise Head- and Eye-Based Target Selection for Augmented Reality*, page 1–14. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2018.
- [73] V. Lambert, A. Chaffangeon Caillet, A. Goguey, S. Malacria, and L. Nigay. Studying the visual representation of microgestures. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, 7(MHCI), sep 2023.
- [74] C. E. Lang and M. H. Schieber. Human finger independence : Limitations due to passive mechanical coupling versus active neuromuscular control. *Journal of Neurophysiology*, 92(5) :2802–2810, 2004. PMID : 15212429.
- [75] D. Lee, S. Lee, and I. Oakley. Nailz : Sensing Hand Input with Touch Sensitive Nails. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, pages 1–13, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [76] C. Liang, C. Yu, Y. Qin, Y. Wang, and Y. Shi. Dualring : Enabling subtle and expressive hand interaction with dual imu rings. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, 5(3), sep 2021.
- [77] J. Liang and M. Green. JDCAD : A highly interactive 3D modeling system. *Computers & Graphics*, 18(4) :499–506, 1994.
- [78] J. Lien, N. Gillian, M. E. Karagozler, P. Amihoud, C. Schwesig, E. Olson, H. Raja, and I. Poupyrev. Soli : Ubiquitous gesture sensing with millimeter wave radar. *ACM Trans. Graph.*, 35(4), jul 2016.
- [79] Y. Liu, H. Meng, M. R. Swash, Y. F. A. Gaus, and R. Qin. Holoscopic 3d micro-gesture database for wearable device interaction. In *2018 13th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2018)*, pages 802–807, New York, NY, USA, 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers.

- [80] C. Loclair, S. Gustafson, and P. Baudisch. PinchWatch : a wearable device for one-handed microinteractions. *Proc. MobileHCI Workshop on Ensembles of On-Body Devices*, (c) :4, 2010.
- [81] Y. Lu, C. Yu, and Y. Shi. Investigating bubble mechanism for ray-casting to improve 3d target acquisition in virtual reality. In *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pages 35–43, 2020.
- [82] W. E. Mackay. Augmented reality : Linking real and virtual worlds : A new paradigm for interacting with computers. In *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces, AVI '98*, page 13–21, New York, NY, USA, 1998. Association for Computing Machinery.
- [83] C. L. Mackenzie and T. Iberall. *The Grasping Hand*. 1994.
- [84] A. Mahr, C. Endres, C. Müller, and T. Schneeberger. Determining human-centered parameters of ergonomic micro-gesture interaction for drivers using the theater approach. *Proceedings of the 3rd International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, AutomotiveUI 2011*, pages 151–157, 2011.
- [85] D. J. C. Matthies, B. Urban, K. Wolf, and A. Schmidt. Reflexive Interaction. pages 266–278, 2019.
- [86] M. R. Mine. Virtual environment interaction techniques. Technical report, 1995.
- [87] D. Miniotas, O. Špakov, I. Tugoy, and I. S. MacKenzie. Speech-augmented eye gaze interaction with small closely spaced targets. In *Proceedings of the 2006 Symposium on Eye Tracking Research & Applications, ETRA '06*, page 67–72, New York, NY, USA, 2006. Association for Computing Machinery.
- [88] A. Mutasim, A. U. Batmaz, M. Hudhud Mughrabi, and W. Stuerzlinger. Performance analysis of saccades for primary and confirmatory target selection. In *Proceedings of the 28th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '22*, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [89] B. A. Myers. Taxonomies of visual programming and program visualization. *Journal of Visual Languages & Computing*, 1(1) :97–123, 1990.
- [90] V. Nguyen, S. Rupavatharam, L. Liu, R. Howard, and M. Gruteser. Hand-Sense : Capacitive coupling-based dynamic, micro finger gesture recognition. *SenSys 2019 - Proceedings of the 17th Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pages 285–297, 2019.
- [91] L. Nigay and J. Coutaz. A generic platform for addressing the multimodal challenge. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '95*, page 98–105, USA, 1995. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [92] A. Olwal, T. Starner, and G. Mainini. E-Textile Microinteractions : Augmenting Twist with Flick, Slide and Grasp Gestures for Soft Electronics. In

- Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, pages 1–13, apr 2020.
- [93] W. PENFIELD and E. BOLDREY. Somatic motor and sensory representation in the cerebral cortex of man as studied by electrical stimulation. *Brain*, 60(4) :389–443, 12 1937.
- [94] F. Perella-Holfeld, S. A. Faleel, and P. Irani. Evaluating design guidelines for hand proximate user interfaces. In *Proceedings of the 2023 ACM Designing Interactive Systems Conference*, DIS '23, page 1159–1173, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [95] K. Pfeuffer, B. Mayer, D. Mardanbegi, and H. Gellersen. Gaze + pinch interaction in virtual reality. In *Proceedings of the 5th Symposium on Spatial User Interaction*, SUI '17, page 99–108, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [96] Y. Y. Qian and R. J. Teather. The eyes don't have it : An empirical comparison of head-based and eye-based selection in virtual reality. In *Proceedings of the 5th Symposium on Spatial User Interaction - SUI '17*, pages 91–98, Brighton, United Kingdom, 2017. ACM Press.
- [97] M. K. Rasmussen, E. W. Pedersen, M. G. Petersen, and K. Hornbæk. Shape-changing interfaces : A review of the design space and open research questions. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, page 735–744, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.
- [98] T. Saponas, D. Tan, D. Morris, and R. Balakrishnan. Demonstrating the feasibility of using forearm electromyography for muscle-computer interfaces. pages 515–524, 04 2008.
- [99] T. S. Saponas, D. S. Tan, D. Morris, R. Balakrishnan, J. Turner, and J. A. Landay. Enabling always-available input with muscle-computer interfaces. In *Proceedings of the 22nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '09, page 167–176, New York, NY, USA, 2009. Association for Computing Machinery.
- [100] G. Schlesinger. *Der mechanische Aufbau der künstlichen Glieder*, pages 321–661. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1919.
- [101] G. Schmidt, Y. Baillet, D. Brown, E. Tomlin, and J. Swan. Toward disambiguating multiple selections for frustum-based pointing. In *3D User Interfaces (3DUI'06)*, pages 87–94, 2006.
- [102] A. Sharma, M. A. Hedderich, D. Bhardwaj, B. Fruchard, J. McIntosh, A. S. Nittala, D. Klakow, D. Ashbrook, and J. Steimle. Solofinger : Robust micro-gestures while grasping everyday objects. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [103] A. Sharma, J. S. Roo, and J. Steimle. Grasping microgestures : Eliciting single-hand microgestures for handheld objects. In *Proceedings of the 2019*

- CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, page 1–13, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [104] A. Sharma, C. Salchow-Hömmen, V. S. Mollyn, A. S. Nittala, M. A. Hedderich, M. Koelle, T. Seel, and J. Steimle. SparseIMU : Computational Design of Sparse IMU Layouts for Sensing Fine-grained Finger Microgestures. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 30(3) :1–40, jun 2023.
- [105] M. Soliman, F. Mueller, L. Hegemann, J. S. Roo, C. Theobalt, and J. Steimle. Fingering : Capturing expressive single-hand thumb-to-finger microgestures. In *Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '18, page 177–187, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [106] H. Song, H. Benko, F. Guimbretiere, S. Izadi, X. Cao, and K. Hinckley. Grips and gestures on a multi-touch pen. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, page 1323–1332, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.
- [107] L. D. Spano, A. Cisternino, F. Paternò, and G. Fenu. Gestit : A declarative and compositional framework for multiplatform gesture definition. In *Proceedings of the 5th ACM SIGCHI Symposium on Engineering Interactive Computing Systems*, EICS '13, page 187–196, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [108] S. Stellmach and R. Dachsel. Look & touch : Gaze-supported target acquisition. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, page 2981–2990, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.
- [109] J. E. Swan, A. Jones, E. Kolstad, M. A. Livingston, and H. S. Smallman. Egocentric depth judgments in optical, see-through augmented reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 13(3) :429–442, 2007.
- [110] Y. Tan, S. H. Yoon, and K. Ramani. BikeGesture : User Elicitation and Performance of Micro Hand Gesture as Input for Cycling. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '17, pages 2147–2154, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [111] S. Tanrikulu, Ş. Bekmez, A. Üzümcügil, and G. Leblebicioğlu. *Anatomy and Biomechanics of the Wrist and Hand*, pages 441–447. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [112] R. J. Teather, A. Pavlovych, W. Stuerzlinger, and I. S. MacKenzie. Effects of tracking technology, latency, and spatial jitter on object movement. In *2009 IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, pages 43–50, 2009.
- [113] E. Triantafyllidis and Z. Li. The challenges in modeling human performance in 3d space with fitts' law. In *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '21, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.

- [114] E. Tse, M. Hancock, and S. Greenberg. Speech-filtered bubble ray : Improving target acquisition on display walls. In *Proceedings of the 9th International Conference on Multimodal Interfaces, ICMI '07*, page 307–314, New York, NY, USA, 2007. Association for Computing Machinery.
- [115] P. Wacker, O. Nowak, S. Voelker, and J. Borchers. ARPen : Mid-Air Object Manipulation Techniques for a Bimanual AR System with Pen & Smartphone. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '19*, pages 1–12, Glasgow, Scotland Uk, 2019. ACM Press.
- [116] A. Waghmare, Y. Ben Taleb, I. Chatterjee, A. Narendra, and S. Patel. Z-ring : Single-point bio-impedance sensing for gesture, touch, object and user recognition. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '23*, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [117] J. Wambecke, A. Goguy, L. Nigay, L. Dargent, D. Hauret, S. Lafon, and J.-S. L. de Visme. M[eye]cro : Eye-gaze+microgestures for multitasking and interruptions. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, 5(EICS), May 2021.
- [118] Way, David. EMGRIE : Ergonomic Microgesture Recognition and Interaction Evaluation, A Case Study. Technical Report 2000, Massachusetts Institute of Technology, 2014.
- [119] E. Whitmire, M. Jain, D. Jain, G. Nelson, R. Karkar, S. Patel, and M. Goel. DigiTouch. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 1(3) :1–21, 2017.
- [120] G. Wilson, C. Stewart, and S. A. Brewster. Pressure-based menu selection for mobile devices. In *Proceedings of the 12th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services, MobileHCI '10*, page 181–190, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.
- [121] J. O. Wobbrock, L. Findlater, D. Gergle, and J. J. Higgins. The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only anova procedures. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '11*, page 143–146, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.
- [122] K. Wolf, A. Naumann, M. Rohs, and J. Müller. A taxonomy of microinteractions : Defining microgestures based on ergonomic and scenario-Dependent requirements. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 6946 LNCS(PART 1) :559–575, 2011.
- [123] Z. Xu, P. C. Wong, J. Gong, T. Y. Wu, A. S. Nittala, X. Bi, J. Steimle, H. Fu, K. Zhu, and X. D. Yang. TipText : Eyes-free text entry on a fingertip keyboard. *UIST 2019 - Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pages 883–889, 2019.
- [124] A. L. Yarbus. *Eye movements and vision*. Springer, Boston, MA, USA, 2013.

- [125] H. Yi, J. Hong, H. Kim, and W. Lee. DexController : Designing a VR controller with grasp-recognition for enriching natural game experience. In *Proceedings of the 25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '19*, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [126] S. Zhai, C. Morimoto, and S. Ihde. Manual and gaze input cascaded (magic) pointing. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '99*, page 246–253, New York, NY, USA, 1999. Association for Computing Machinery.
- [127] C. Zhang, A. Waghmare, P. Kundra, Y. Pu, S. Gilliland, T. Ploetz, T. E. Starnier, O. T. Inan, and G. D. Abowd. Fingersound : Recognizing unistroke thumb gestures using a ring. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, 1(3), sep 2017.
- [128] X. Zhang and I. S. MacKenzie. Evaluating eye tracking with iso 9241 - part 9. In *Proceedings of the 12th International Conference on Human-Computer Interaction : Intelligent Multimodal Interaction Environments, HCI'07*, page 779–788, Berlin, Heidelberg, 2007. Springer-Verlag.
- [129] Q. Zhou, S. Sykes, S. Fels, and K. Kin. Gripmarks : Using Hand Grips to Transform In-Hand Objects into Mixed Reality Input. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, pages 1–11, apr 2020.
- [130] D. Zielasko, M. Krüger, B. Weyers, and T. Kuhlen. Passive haptic menus for desk-based and hmd-projected virtual reality. 03 2019.
- [131] K. Özacar, J. D. Hincapié-Ramos, K. Takashima, and Y. Kitamura. 3D Selection Techniques for Mobile Augmented Reality Head-Mounted Displays. *Interacting with Computers*, 29(4) :579–591, 12 2016.