



HAL
open science

Techniques d'interaction exploitant la mémoire pour faciliter l'activation de commandes

Bruno Fruchard

► **To cite this version:**

Bruno Fruchard. Techniques d'interaction exploitant la mémoire pour faciliter l'activation de commandes. Interface homme-machine [cs.HC]. Université Paris Saclay (COMUE), 2018. Français. NNT : 2018SACL010 . tel-02000844

HAL Id: tel-02000844

<https://pastel.hal.science/tel-02000844>

Submitted on 1 Feb 2019

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.

Techniques d'interaction exploitant la mémoire pour faciliter l'activation de commandes

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay
préparée à Télécom ParisTech

École doctorale n°580 Sciences et technologies
de l'information et de la communication (STIC)
Spécialité de doctorat : Informatique

Thèse présentée et soutenue à Paris, le 11 décembre, par

Bruno Fruchard

Composition du Jury :

Géry Casiez Professeur, Université de Lille	Rapporteur
Laurence Nigay Professeur, Université Grenoble Alpes	Rapporteur
Emmanuel Dubois Professeur, Université de Toulouse	Président
Pierre Dragicevic Chargé de Recherche, Inria	Examineur
Eric Lecolinet Maître de Conférence, Télécom ParisTech	Directeur de thèse
Olivier Chapuis Chargé de Recherche, CNRS	Co-Directeur de thèse

RÉSUMÉ

Avec les nouvelles avancées technologiques, de plus en plus de dispositifs interactifs font parti des environnements dans lesquels nous vivons, comme des montres intelligentes, des téléphones intelligentes, des ordinateurs, des systèmes de réalité augmenté/virtuelle, ou encore des objets connectés. Ces dispositifs proposent de nombreuses fonctionnalités qui peuvent être activées de différentes manières, ce qui impose à l'utilisateur d'adapter sa façon d'interagir avec chaque dispositif et de devoir se rappeler d'un grand nombre de fonctionnalités.

Concevoir des techniques d'interaction adaptées à des grands ensembles de commandes permet à l'utilisateur de n'utiliser qu'un seul dispositif interactif pour contrôler plusieurs systèmes. Il peut ainsi, par exemple, contrôler sa maison intelligente et interagir avec un système de réalité virtuelle uniquement en utilisant son téléphone ou sa montre intelligente. Pour aller plus vite dans la sélection d'une fonctionnalité, et ne pas avoir à la chercher dans des listes et des menus, il peut effectuer des raccourcis (p.ex. gestuels ou vocaux). Or, pour être efficace, il a besoin de se *rappeler* quels raccourcis il peut activer.

Plusieurs types de mémoire peuvent être mis à profit pour simplifier la tâche d'apprentissage, comme la mémoire *spatiale* pour mémoriser des positions spatiales, et donc l'emplacement de commandes, ou la mémoire *sémantique* pour se souvenir de leur signification, et pouvoir créer des moyens mnémoniques efficaces pour s'en souvenir plus facilement. Utiliser des raccourcis gestuels peut faire intervenir d'autres types de mémoire comme la mémoire *procédurale* ou la mémoire des *images*, pour visualiser le mouvement d'un geste.

Ces questions soulèvent deux problématiques majeures que nous examinons au cours de cette thèse : (1) comment les utilisateurs mémorisent des raccourcis gestuels pour sélectionner des commandes efficacement et comment peut-on les aider dans leur tâche, (2) comment concevoir des raccourcis gestuels simples à effectuer et mémoriser tout en permettant l'activation d'un grand nombre de commandes. Nous répondons à ces questions à l'aide de deux parties, la première orientée sur la mémorisation de commandes, et la deuxième sur la conception de raccourcis gestuels adaptés à la sélection d'un grand nombre de commandes.

Dans la première partie nous comparons la mémorisation de commandes à l'aide de gestes *positionnels* ou *directionnels*. Nous les comparons d'abord dans un contexte d'interactions mobiles, puis dans

un contexte d'interactions en trois dimension en utilisant le corps de l'utilisateur comme guide ou en les effectuant "en l'air". Nos résultats suggèrent que ces deux modalités mènent à des taux de rappels élevés et comparables. Nous montrons aussi que simplement suggérer aux utilisateurs de créer des histoires pour mieux mémoriser améliore leur performance de rappel. Enfin nos observations montrent que les utilisateurs adoptent des stratégies similaires pour mémoriser au cours des deux études effectuées, ce qui sert de lignes de conduites pour concevoir des interfaces mieux adaptées dans le futur.

Dans la deuxième partie nous détaillons la conception de techniques d'interaction qui définissent des gestes en combinant des *positions* et des *directions*. Nous validons avec des études utilisateurs l'efficacité de ce type de gestes, en montrant l'importance de l'utilisation de guides visuels ou visio-tactiles dans le cas où l'utilisateur doit effectuer un grand nombre de gestes. Enfin nous proposons une variante de ce type d'interaction adaptée aux petits dispositifs et à l'interaction à l'aveugle, pour permettre à l'utilisateur de déclencher un grand nombre de commandes tout en ne contraignant pas sa mobilité.

ABSTRACT

With recent advances in technology, more and more interactive devices are part of our living environments, such as smartwatches, smartphones, computers, augmented/virtual reality systems, or connected objects. These devices allow users to activate many features in different ways, which necessitates the users to adapt their interaction style of to each device and to recall a large number of features.

Offering interaction techniques adapted to large sets of commands allows the users to use a unique interactive device to control multiple systems. For example, they can control their smart home and interact with a virtual reality system only using their phone or their smartwatch. To go faster in selecting a feature, and not have to search for it in lists and menus, they can perform shortcuts (e.g., gestures or voice commands). To be effective, however, they need to *recall* which shortcuts they can activate.

Several types of memory can be used to simplify the learning task, such as *spatial* memory to store positions and thus the location of commands, or *semantic* memory to remember their meaning, and be able to create mnemonic aids to remember them more easily. Studying how users memorize the actions they perform when selecting commands helps to understand the strategies adopted, and to adapt the representation of these commands, or the interaction techniques exploited, to simplify the learning task. Using gesture shortcuts can

involve other types of memory such as *procedural* memory when performing the movement, or *image* memory to visualize the movement of a gesture.

These questions raise two significant issues that we address in this thesis: (1) how do users memorize gestural shortcuts to select commands efficiently and how can we help them in their task, (2) how to design gestural shortcuts that are simple to perform and easy to memorize, while enabling to activate a large set of commands. We answer these questions using two parts, the first oriented towards the memorization of commands, and the second towards the design of gestural shortcuts adapted to the selection of large sets of commands.

In the first part, we compare the memorization of commands using *positional* or *directional* gestures. We compare them first in a mobile context, then in a three-dimensional interactions context using the user's body as a guide or mid-air gestures. Our results suggest that both of these modalities lead to high and comparable recall rates. We also show that merely suggesting users to create stories related to commands improves their recall performance greatly. Finally, our observations show that users are adopting similar strategies to memorize during the two studies performed, which serve as guidelines for improving user interfaces in the future.

In the second part, we present the designs of interaction techniques that define gestures by combining *positions* and *directions*. We validate the effectiveness of such gestures with several user studies, highlighting the importance of using visual or visio-tactile guides in cases where users must perform large sets of gestures. Finally, we propose a variant of this type of interaction suitable for small devices and eyes-free interaction, to allow users activating large sets of commands without constraining their mobility.

PUBLICATIONS

- [1] Bruno FRUCHARD. « Interaction Techniques Exploiting Memory to Faciliate Command Activation ». In : *29ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine*. Sous la dir. d'AFIHM. Rencontres doctorales. AFIHM. Poitiers, France, août 2017. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01577856>.
- [2] Bruno FRUCHARD, Eric LECOLINET et Olivier CHAPUIS. « Démonstration de MarkPad : Augmentation du pavé tactile pour la sélection de commandes ». In : *29ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine*. Sous la dir. d'AFIHM. AFIHM. Poitiers, France, août 2017, 2 p. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01577687>.
- [3] Bruno FRUCHARD, Eric LECOLINET et Olivier CHAPUIS. « MarkPad : Augmenting Touchpads for Command Selection ». In : *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '17. Denver, Colorado, USA : ACM, 2017, p. 5630–5642. ISBN : 978-1-4503-4655-9. DOI : [10.1145/3025453.3025486](https://doi.org/10.1145/3025453.3025486). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3025453.3025486>.
- [4] Bruno FRUCHARD, Eric LECOLINET et Olivier CHAPUIS. « How Memorizing Positions or Directions Affects Gesture Learning? ». In : *Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*. ISS '18. Tokyo, Japan : ACM, 2018, p. 107–114. ISBN : 978-1-4503-5694-7. DOI : [10.1145/3279778.3279787](https://doi.org/10.1145/3279778.3279787). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3279778.3279787>.
- [5] Bruno FRUCHARD, Eric LECOLINET et Olivier CHAPUIS. « Impact of Semantic Aids on Command Memorization for On-body Interaction and Directional Gestures ». In : *Proceedings of the 2018 International Conference on Advanced Visual Interfaces*. AVI '18. Castiglione della Pescaia, Grosseto, Italy : ACM, 2018, 14 :1–14 :9. ISBN : 978-1-4503-5616-9. DOI : [10.1145/3206505.3206524](https://doi.org/10.1145/3206505.3206524). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3206505.3206524>.
- [6] Bruno FRUCHARD, Eric LECOLINET et Olivier CHAPUIS. « Mé-morisation de Commandes : Positions Spatiales versus Gestes Directionnels ». In : *30ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine*. Sous la dir. d'AFIHM. AFIHM. Brest, France : ACM, oct. 2018, 6 p.

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier toutes les personnes qui m'ont accompagné au cours de cette thèse, autant celles qui ont su m'aider dans les moments durs, que celles avec qui j'ai partagé des moments inoubliables, ou encore celles qui m'ont énormément appris.

Tout d'abord, je n'aurais jamais pu faire cette thèse et parcourir ce chemin sans les deux personnes qui m'ont accompagné tout au long de celui-ci. J'aimerais donc remercier sincèrement Eric Lecolinet et Olivier Chapuis, deux chercheurs que j'estime beaucoup et à qui je dois énormément. Merci à eux de m'avoir guidé pendant mes premiers pas de chercheur et de m'avoir appris à raisonner comme tel. Particulièrement, j'aimerais remercier Eric pour toutes les discussions passionnantes que l'on a pu avoir (aussi bien techniques que de haut niveau). Elles m'ont beaucoup appris et m'ont aidé à grandir grâce aux défis qu'elles demandaient de relever. J'aimerais de même remercier Olivier pour son positivisme à toute épreuve et ses réflexions pertinentes qui ont souvent soulevé des problèmes auxquels nous n'avions pas pensé. Surtout, merci à vous deux de m'avoir accepté comme étudiant et de m'avoir supporté tout au long de ces trois ans, une tâche complexe dont certaines personnes peuvent témoigner.

Je ne pourrais pas soutenir cette thèse sans l'aide d'un groupe de chercheurs et chercheuses talentueux. Je remercie donc Emmanuel Dubois et Pierre Dragicevic qui ont accepté d'être membre de mon jury de thèse, ainsi que Laurence Nigay et Géry Casiez qui ont accepté d'être rapporteurs. Un grand merci à vous d'avoir pris le temps de juger mon travail et de m'avoir fait parvenir des retours très positifs. J'aimerais aussi remercier en parallèle toutes les personnes qui ont accepté de participer à mes expériences sans contrepartie. Sans elles, je n'aurais pas eu de résultats à analyser, et je n'aurais certainement pas pu arriver aux conclusions présentes dans ce manuscrit.

J'ai rencontré au cours de cette thèse beaucoup de chercheurs et chercheuses qui m'ont profondément inspiré et dont les avis parfois différents m'ont mis à l'épreuve, et m'ont énormément appris. J'aimerais en général remercier mes collègues des équipes DIVA et ILDA qui m'ont aidé à mieux comprendre mon sujet de recherche en discutant et en proposant des idées innovantes. Particulièrement, je tiens à remercier Emmanuel Pietriga, Caroline Appert, Anastasia Bezerianos, James Eagan, Gilles Bailly, Maria Jesus Lobo, Arnaud Prouzeau et Hugo Romat. En plus de ces personnes, je n'aurais pas accompli ce travail sans d'autres collègues talentueux qui sont devenus des amis chers par la suite. J'aimerais donc remercier sincèrement Emmanouil

Giannisakis (alias Manos avec moustache), Marc Teyssier, Abby Liu et Emmanouil Potetsianakis (alias Manos sans moustache). J'ai partagé énormément avec ces personnes, principalement autour d'une table de la Butte aux Cailles avec des bières à la main, mais aussi dans la fraîcheur d'Helsinki, au cours d'un voyage dans le mid-west américain ou encore sur les pistes de ski des Alpes. Je sais que me côtoyer a pu être difficile pour eux à certains moments, mais j'espère leur avoir apporté au moins autant que eux m'ont apporté.

Pour finir, cette thèse s'est accompagnée pour moi d'une évolution personnelle que je dois principalement aux membres de ma famille. Je ne peux donc pas finir cette partie sans remercier sincèrement mes frères Pierre et Gilles qui m'ont encouragé tout au long de mon parcours et m'ont félicité du travail accompli. De même, j'aimerais remercier mon oncle Hervé pour toutes les leçons de vie qu'il m'a enseigné et sa sympathie profonde qui sont une inspiration pour moi. Enfin j'aimerais remercier Linda qui m'a accompagné sur un bout du chemin, et qui aura su me rendre heureux au cours de cet instant de ma vie.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
1.0.1	Mémorisation de commandes	2
1.0.2	Grands ensembles de commandes	4
1.1	Contributions	5
1.1.1	Mémorisation de commandes	5
1.1.2	Grands ensembles de commandes	7
1.2	Organisation de la thèse	8

PARTIE I

PROCESSUS DE MÉMORISATION IMPLIQUÉS DANS LA SÉLECTION DE COMMANDES

		9
2	SÉLECTION DE COMMANDES ET APPRENTISSAGE	11
2.1	Sélections de commandes rapides	12
2.1.1	Pointage	12
2.1.2	Raccourcis clavier	14
2.1.3	Gestes continus	15
2.2	Apprentissage	16
2.2.1	Mode novice	17
2.2.2	Mode expert	18
2.3	Processus de mémorisation	18
2.3.1	Mémoire spatiale	19
2.3.2	Mémoire sémantique	20
2.3.3	Méthodes mnémoniques	21
3	MÉMORISATION DE GESTES POSITIONNELS ET DIRECTIONNELS	23
3.1	Contexte	23
3.2	Description des techniques	25
3.2.1	Pointage	25
3.2.2	Gestes directionnels	26
3.2.3	Dispositif	27
3.3	Etude utilisateur	27
3.3.1	Résultats	30
3.4	Discussion et conclusion	33
3.4.1	Discussion	33
3.4.2	Pistes de recherche et suggestions	35
3.4.3	Conclusion	36
4	IMPACT DE L'INTERACTION CORPORELLE ET DE L'UTILISATION D'AIDES SÉMANTIQUES SUR LA MÉMORISATION DE COMMANDES	37
4.1	Introduction	37

4.2	Contexte	39
4.2.1	Méthode des loci et aides sémantiques	39
4.2.2	Interaction Corporelle	40
4.3	Techniques d'interaction et environnement virtuel	41
4.3.1	Système de réalité virtuelle	42
4.3.2	BodyLoci	42
4.3.3	Marking Menus "en l'air"	44
4.4	Comparaison des techniques	44
4.4.1	Résultats	47
4.5	Impact des aides sémantiques	49
4.5.1	Résultats	50
4.6	Discussion et conclusion	53
4.6.1	Stratégies de mémorisation	53
4.6.2	Discussion	55
4.6.3	Conclusion	56

PARTIE II

TECHNIQUES D'INTERACTION ADAPTÉES À L'ACTIVATION DE GRANDS ENSEMBLES DE COMMANDES

		61
5	INTERACTIONS GESTUELLES ADAPTÉES AUX GRANDS ENSEMBLES DE COMMANDES	63
5.1	Interactions gestuelles	64
5.1.1	Caractéristiques des gestes	64
5.1.2	Nombre de gestes	66
5.2	Guidage de l'utilisateur	68
5.2.1	Guides passifs	68
5.2.2	Guides dynamiques	70
6	MARKPAD : AUGMENTATION DU PAVÉ TACTILE	73
6.1	Introduction	73
6.2	La technique MarkPad	75
6.3	Sélection de commandes en mode expert	78
6.3.1	Protocole expérimental	79
6.3.2	Résultats	81
6.3.3	Discussion	83
6.4	Interfaces simplifiées	84
6.4.1	Protocole expérimental	85
6.4.2	Résultats	85
6.4.3	Discussion	87
6.5	Conflits avec le pointage	88
6.5.1	Résultats	91
6.5.2	Discussion	92
6.6	Prototype et usage	93
6.6.1	Améliorations	95
6.7	Etude longitudinale	97
6.7.1	Protocole expérimental	98

6.7.2	Observations	100
6.8	Conclusion	105
7	SIDE-CROSSING MENUS : GESTES À L'AVEUGLE POUR DE GRANDS ENSEMBLES DE COMMANDES SUR PETITS DIS- POSITIFS	109
7.1	Introduction	109
7.2	Side-Crossing Menus	111
7.2.1	Aides tactiles passives et actives	114
7.3	Expérience utilisateur	115
7.3.1	Résultats	117
7.3.2	Discussion	119
7.3.3	Limitations	120
7.4	Contextes d'utilisation et formes alternatives	121
7.5	Conclusion	121
 PARTIE III		
<hr/>		
CONCLUSION		
<hr/>		
		125
8	CONCLUSION	127
8.1	Contributions	127
8.1.1	Mémorisation de commandes	127
8.1.2	Grands ensembles de commandes	128
8.2	Perspectives	129
8.2.1	Mémorisation de commandes	129
8.2.2	Guidage et personnalisation des gestes	132
 BIBLIOGRAPHIE		
135		

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1.1	Gestes couramment utilisés	4
FIGURE 2.1	Interface WIMP	12
FIGURE 2.2	Interfaces consistantes spatialement	13
FIGURE 2.3	Raccourcis clavier de Visual Studio	14
FIGURE 2.4	Exemples de raccourcis gestuels	15
FIGURE 2.5	Exemples d'interfaces adaptatives	17
FIGURE 2.6	Exemples d'aides visuelles dynamiques	17
FIGURE 3.1	Représentation des menus et des commandes (gestes positionnels)	25
FIGURE 3.2	Représentation des menus et des commandes (gestes directionnels)	26
FIGURE 3.3	Zone d'interaction dédiée	27
FIGURE 3.4	Protocole expérimental	28
FIGURE 3.5	Catégories de commandes	29
FIGURE 3.6	Positions des commandes	30
FIGURE 3.7	Taux de rappel par TECH	30
FIGURE 3.8	Taux de rappel par schéma de positions	31
FIGURE 3.9	Temps d'affichage des commandes	31
FIGURE 3.10	Temps de réaction et d'exécution	32
FIGURE 3.11	Réponses au questionnaire soumis aux participants	33
FIGURE 3.12	Suggestions d'améliorations de menus linéaires	35
FIGURE 4.1	Présentation des techniques <i>BodyLoc</i> et <i>Marketing menus</i> "en l'air"	38
FIGURE 4.2	Emplacements des zones sur le corps	41
FIGURE 4.3	Système de sélection	42
FIGURE 4.4	Modes novice des deux techniques	43
FIGURE 4.5	Protocole expérimental	45
FIGURE 4.6	Catégories de commandes	46
FIGURE 4.7	Résultats de la première expérience	46
FIGURE 4.8	Résultats du questionnaire	47
FIGURE 4.9	Images d'arrière-plan	49
FIGURE 4.10	Résultats de la deuxième expérience	50
FIGURE 4.11	Taux de rappel obtenus au cours des deux expériences	51
FIGURE 4.12	Temps de complétion en phases d'apprentissage au cours des deux expériences	51
FIGURE 4.13	Résultats du questionnaire	52
FIGURE 5.1	<i>Zone & Polygon menus</i>	64
FIGURE 5.2	Raccourcis définis par la position des doigts de l'utilisateur	65

FIGURE 5.3	Exemples d'augmentation de la <i>profondeur</i> et <i>largeur</i> de menus gestuels	67
FIGURE 5.4	Gestes utilisant les contours d'une surface interactive	67
FIGURE 5.5	Exemple de menu <i>caché</i>	68
FIGURE 5.6	Exemples de guides passifs	69
FIGURE 5.7	Exemples de guides visio-tactiles dynamiques	72
FIGURE 6.1	Exemple d'un geste <i>MarkPad</i>	74
FIGURE 6.2	Gestes évalués dans l'étude utilisateur	78
FIGURE 6.3	Dispositif expérimental	80
FIGURE 6.4	Taux de succès et temps d'exécution	82
FIGURE 6.5	<i>Taux de succès</i> par ZONE D'ARRIVÉE POUR chaque INTERFACE.	85
FIGURE 6.6	Classement de chaque INTERFACE par les utilisateurs	86
FIGURE 6.7	Configuration des zones pour l'évaluation de faux-positifs	89
FIGURE 6.8	Pourcentage de faux-positifs détectés	91
FIGURE 6.9	Impact de la taille de la <i>séparation</i> sur la détection de gestes	92
FIGURE 6.10	Exemples de configurations <i>MarkPad</i>	94
FIGURE 6.11	Guides pour créer des gestes	96
FIGURE 6.12	Statistiques des gestes effectués	101
FIGURE 6.13	Configurations initiales et finales	103
FIGURE 6.14	Densité des positions de départ	104
FIGURE 6.15	Densité des positions d'arrivée	104
FIGURE 7.1	Un geste <i>SCM</i> effectué sur une montre intelligente	110
FIGURE 7.2	Mode novice et environnements adaptés pour <i>SCM</i>	110
FIGURE 7.3	Mode novice utilisé par <i>SCM</i>	112
FIGURE 7.4	Projection du mode novice sur l'avant-bras	113
FIGURE 7.5	Trois façons différentes d'activer la même commande	114
FIGURE 7.6	Détails de l'étude utilisateur	115
FIGURE 7.7	Stimulus visuel et mouvements des participants	117
FIGURE 7.8	Résultats de l'expérience	118
FIGURE 7.9	Exemples de dispositifs intégrant des petites surfaces tactiles	121
FIGURE 7.10	Exemples de zones en forme d'hexagones	122

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 4.1	Stratégies de mémorisation	54
TABLEAU 6.1	Résumé des résultats principaux pour chaque interface (1 ^e expérience)	81
TABLEAU 6.2	Résumé des résultats obtenus pour chaque interface (2 ^e expérience)	86
TABLEAU 6.3	Impact des tailles de <i>bordure</i> et <i>geste</i> sur les faux-positifs	90
TABLEAU 6.4	Nombre de menus et de gestes définis par les utilisateurs	99
TABLEAU 6.5	Changements apportés aux configurations	100

INTRODUCTION

Les utilisateurs ont recours à un nombre toujours croissant de dispositifs interactifs dans leur quotidien comme des téléphones intelligents, des tablettes, des ordinateurs, des objets connectés, ou encore avec les nouvelles avancées techniques, des systèmes de réalité virtuelle et de réalité augmentée. Un problème majeur est que ces dispositifs utilisent des façons d’interagir souvent différentes auxquelles l’utilisateur doit s’adapter (p.ex. différentes télécommandes pour plusieurs objets connectés). Il est donc nécessaire de lui proposer des moyens simples et rapides d’accéder aux fonctionnalités d’un système interactif, tout en lui permettant de se souvenir facilement des actions qu’il effectue pour qu’il s’en souvienne correctement et plus rapidement ultérieurement.

Les interfaces utilisateurs les plus communes à ce jour se basent sur le concept d’interfaces WIMP (Window, Icon, Menu, Pointing) qui permet à l’utilisateur de sélectionner des boutons ou des éléments dans des menus hiérarchiques pour déclencher des commandes. Avec ce paradigme d’interaction, les sélections de commandes se font principalement avec un dispositif de pointage comme une souris, mais les dispositifs actuels (p.ex. surface sensible au toucher) permettent d’autres types d’interaction comme l’utilisation de gestes ou de commandes vocales (p.ex. les interfaces vocales Siri de Apple ou Cortana de Windows). Ces types d’interaction permettent de sélectionner des commandes rapidement, à condition que l’utilisateur se souvienne du geste ou de la commande vocale à effectuer. Or, pour contrôler pleinement un environnement complexe ou plusieurs systèmes en même temps (p.ex. un système de réalité augmentée et une maison intelligente), l’utilisateur a besoin d’accéder à un grand nombre de commandes. Il est donc important de concevoir des interactions adaptées à ce grand nombre de commandes pour faciliter leur apprentissage et leur sélection.

Nous abordons au cours de cette thèse deux thématiques. Nous nous intéressons dans un premier temps à la façon dont les utilisateurs mémorisent certains types de raccourcis gestuels (c.à-d. des gestes dits *positionnels* et *directionnels*). Grâce aux connaissances accumulées au cours d’observations expérimentales, nous formulons des moyens destinés à aider les utilisateurs dans cette tâche. Nous nous intéressons dans un deuxième temps à la conception de techniques d’interaction qui permettent l’activation d’un grand ensemble de commandes. Nous proposons un nouveau type d’interaction ges-

tuelle et montrons son efficacité dans deux contextes d'interaction : en exploitant les possibilités offertes par le pavé tactile d'un ordinateur, et l'écran tactile d'une montre intelligente.

1.0.1 *Mémorisation de commandes*

Plusieurs types de mémoire peuvent être mis à profit pour aider les utilisateurs à mémoriser des commandes, en particulier la mémoire *spatiale* et la mémoire *sémantique*. Ces deux types de mémoire ont été largement étudiés dans le domaine de la psychologie et ont montré des résultats impressionnants. La mémoire *spatiale* permet d'apprendre implicitement des positions spatiales [8, 96] et est supposée pouvoir en accumuler un nombre infini sur le long terme [7]. La mémoire *sémantique* quant à elle permet d'encoder de l'information profondément en mémoire [19], et aide à créer des histoires pour se souvenir plus facilement d'un ensemble de commandes [114], ou de se souvenir de concepts auxquelles ces commandes font référence [147]. Cependant, un défi important est de faire en sorte que les méthodes visant à réduire l'effort d'apprentissage ne dérangent pas les utilisateurs dans leur tâche principale.

Mémoire spatiale. La mémoire spatiale est une faculté aussi innée qu'indispensable : pouvoir se repérer dans l'espace est une condition nécessaire pour survivre. De plus, l'acquisition de l'information spatiale est en bonne partie automatique, et ne nécessite donc pas d'effort explicite de la part de l'utilisateur [96]. Ceci peut être mis à profit dans le cas des interfaces utilisateurs en privilégiant l'utilisation d'interfaces dont l'arrangement spatial ne change pas dans le temps [64, 131, 132], afin de permettre aux utilisateurs de retrouver les commandes plus rapidement. Dans le cas d'interfaces denses où le nombre de commandes est important, des repères visuels saillants permettent de renforcer cet effet [114, 148]. Un point intéressant est que modifier légèrement des interfaces utilisateurs actuelles (c.à-d. placement des commandes, ou l'ajout de repères visuels) suffit pour permettre aux utilisateurs d'être plus efficaces sur le long terme [131, 148].

Méthodes mnémoriques. Quoique aujourd'hui assez peu usitées, l'efficacité des méthodes mnémoriques est bien connue [7]. Elles offrent une voie intéressante pour faciliter la mémorisation des commandes et des gestes associés. Par exemple, la méthode des loci, dont l'efficacité est connue depuis l'antiquité [22, 34, 167] consiste à mémoriser un environnement familier (que l'on pourra ensuite visualiser mentalement), puis à effectuer des associations entre les lieux (ou loci) de cet environnement et ce que la personne souhaite mémoriser. De plus, pour renforcer la mémorisation, des images frappantes sont également rajoutées à ces associations entre les repères spatiaux et les

éléments dont on souhaite se rappeler. Cette technique fait appel à plusieurs types de mémoire et en particulier la mémoire (*spatiale*, la mémoire *sémantique* et la mémoire des *objets*), dont la combinaison est supposée aider la mémorisation [99].

Cette technique a par exemple été adaptée pour l'Interaction Humain-Machine (IHM) dans un contexte de maison intelligente [114]. Selon ce principe, l'utilisateur associe des objets de sa maison à des commandes (p.ex. allumer telle lumière, lancer telle chaîne TV, telle webradio, etc.). Il lui suffit ensuite de pointer l'objet adéquat pour déclencher la commande correspondante. Cette méthode a montré son efficacité dans le cas d'associations non triviales, ce qui est nécessairement le cas lorsque le nombre de commandes est important. Par exemple, on ne peut pas juste pointer le téléviseur pour sélectionner une chaîne de TV parmi un ensemble. L'utilisateur aura alors recours à d'autres objets qui pourront (éventuellement mais pas nécessairement) évoquer la chaîne souhaitée (par exemple une photo de ski pour lancer une chaîne sportive).

Mémorisation incidentelle. Lorsqu'il interagit, l'utilisateur peut mémoriser les actions qu'il effectue pour pouvoir les reproduire plus rapidement ensuite. Même s'il ne se concentre pas pour mémoriser, il peut les apprendre de façon *implicite* [47]. Dans le cas de raccourcis gestuels, la simple répétition du geste nécessaire pour effectuer une commande peut suffire pour assurer sa mémorisation. Les *Marking menus* [83] exploitent ce principe, le mode *expert* étant appris par répétition du mode *novice*. En mode *novice*, un guide graphique montre à l'utilisateur comment effectuer le geste correctement. Ce mode est déclenché si l'utilisateur hésite (donc reste statique) avant de commencer son geste. Une fois qu'il sait effectuer ce geste, cette représentation visuelle n'est plus nécessaire (mode *expert*). L'utilisateur peut ainsi apprendre les gestes en mode *novice* et les mémoriser de façon *incidentelle* en répétant le mouvement.

Dans la première partie de cette thèse, nous nous intéressons à la mémorisation de commandes, qui reste un sujet relativement peu étudié dans le domaine de l'IHM, malgré son importance dans l'utilisation experte de systèmes interactifs. Nous comparons principalement l'utilisation de gestes *positionnels* et de gestes *directionnels* pour sélectionner des commandes, ces gestes étant couramment utilisés par les systèmes actuels et largement étudiés dans la littérature. Nous étudions également l'impact que peuvent avoir des instructions visant à guider les utilisateurs dans leurs tâches d'apprentissage.

1.0.2 Grands ensembles de commandes

L'utilisation de raccourcis gestuels pour déclencher des commandes rapidement a été largement étudiée en IHM [10], mais ce type de raccourcis reste peu utilisé dans les systèmes commerciaux actuels à part quelques exceptions comme les gestes de *glissement* ou de *pincement* (Figure 1.1). Le nombre de gestes proposés est donc très limité malgré les possibilités offertes par les surfaces sensibles au toucher, en particulier les écrans tactiles mais aussi le pavé tactile des ordinateurs.

Nombre de gestes. Les *Marking menus*, qui utilisent des gestes *directionnels*, ont montré leur efficacité au cours de plusieurs études expérimentales [83, 169, 170]. Leur version hiérarchique permet d'effectuer une combinaison de gestes directionnels pour parcourir une hiérarchie de menus, en un seul mouvement. Ce concept permet de naviguer en *profondeur* dans des menus facilement (c.à-d. plusieurs sous-menus), mais contraint ces (sous-)menus à contenir un maximum de huit éléments pour assurer une précision suffisante [83]. Quelques variantes de cette technique ont cherché à augmenter ce nombre en utilisant par exemple la courbure des gestes [9] ou la position de départ du geste [169]. Nous proposons dans le Chapitre 6 des menus dont la *largeur* n'est (quasiment) pas contraignante (34 éléments par menu). Ces menus s'adaptent facilement à n'importe quels environnements nécessitant un grand ensemble de commandes, et laissent une grande liberté aux utilisateurs pour associer des commandes aux gestes qui sont les plus adaptés à leurs besoins.

Guidage de l'utilisateur. Pour que les utilisateurs puissent effectuer un grand nombre de gestes avec précision, il est important de les guider. Un utilisateur novice peut reproduire un mouvement à l'aide d'une représentation graphique, comme c'est le cas des *Marking menus* [83] et des techniques dérivées [14, 169], mais ce mouvement est moins précis quand il est effectué plus rapidement sans aide visuelle (c.à-d. en mode expert). Des guides spatiaux peuvent aider des utilisateurs experts comme des marques statiques visuelles ou tangibles, ou des marques dynamiques (p.ex. des vibrations). Ces marques sta-

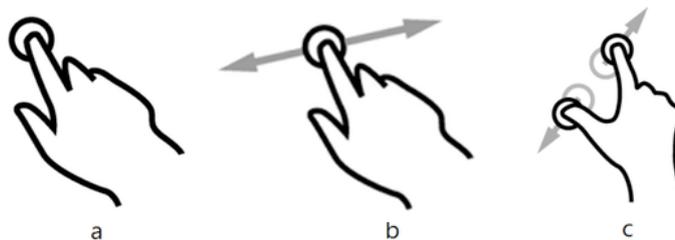


FIGURE 1.1 – Gestes couramment utilisés sur des interfaces sensibles au toucher. (a) Pointage, (b) Glissement, (c) Pincement. (source <http://www.gestureworks.com/>)

tiques peuvent faire partie du dispositif interactif (p.ex. les coins d'un pavé tactile). Elles peuvent aussi être ajoutées à celui-ci pour augmenter son potentiel en utilisant des matériaux bon marché (p.ex. ruban adhésif [58], voir Chapitre 6). Les guides dynamiques quant à eux peuvent utiliser des vibrations [21], ou avoir recourt à des technologies plus poussées pour modifier la surface d'interaction [43, 74, 76].

Mobilité. L'utilisateur peut avoir besoin d'interagir avec plusieurs systèmes interactifs en même temps, comme lorsqu'il utilise en parallèle un ordinateur et un système de réalité virtuelle, ou bien qu'il interagit avec un système de réalité virtuelle dans une maison intelligente. Dans ce cas, il doit pouvoir accéder à un grand nombre de fonctionnalités facilement, tout en étant mobile pour pouvoir interagir avec l'espace autour de lui. Pour ne pas interrompre sa fluidité de travail en changeant de dispositif interactif constamment, son corps peut servir de guide pour effectuer des gestes, ce qui lui permet non seulement d'être mobile, mais aussi d'être précis en s'aidant de la peau comme surface d'interaction [69, 70, 92]. De même, des petits dispositifs comme des montres intelligentes permettent de préserver la mobilité de l'utilisateur. Cependant, dans ce dernier cas, la taille de ces dispositifs contraint les gestes reproductibles, comme c'est le cas des marques composées des *Marking menus* [170]. Nous nous intéressons particulièrement à cette problématique dans le Chapitre 7.

Pour répondre aux défis que nous venons de soulever (nombre de commandes, guidage, mobilité), nous présentons dans la deuxième partie de cette thèse un nouveau type d'interaction gestuelle qui exploite la combinaison de *positions* et *directions* pour définir des gestes. Nous présentons dans le Chapitre 6 une implémentation de cette technique pour le pavé tactile d'un ordinateur, et, dans le Chapitre 7, une variation de cette technique pour petits dispositifs (p.ex. une montre intelligente).

1.1 CONTRIBUTIONS

Nous décrivons dans cette section les contributions de la thèse et nous les détaillons pour chacune de ses parties.

1.1.1 Mémorisation de commandes

Nous présentons dans la première partie de la thèse deux études sur l'apprentissage de commandes. Ce type d'étude reste à ce jour rare dans la littérature en IHM malgré leur importance pour évaluer l'apprentissage de techniques d'interaction (p.ex. des gestes, des raccourcis clavier). Nous nous intéressons particulièrement à la mémorisation de commandes à l'aide de *positions* ou de *directions*. Nous

contribuons avec une première étude sur l'apprentissage de gestes *positionnels* et *directionnels* sur dispositif mobile, et une deuxième sur l'apprentissage de ces gestes lorsqu'ils sont réalisés sur le corps de l'utilisateur ou "en l'air" devant lui.

Le résultat principal de la première étude, détaillée dans le Chapitre 3, indique qu'utiliser des gestes *positionnels* ou *directionnels* pour mémoriser des commandes amène à des taux de rappels élevés et comparables. Ces deux modalités d'interaction semblent donc intéressantes pour mémoriser des commandes. De plus, nous avons pu observer qu'utiliser des *positions* facilite l'apprentissage de gestes par rapport aux *directions*. Une explication de ce résultat est que les gestes *positionnels* utilisaient des repères spatiaux dans notre expérience (c.à-d. marques visuelles sur la surface d'interaction), ce qui a pu aider les utilisateurs à tirer davantage profit de leur mémoire spatiale.

Dans la deuxième étude, détaillée dans le Chapitre 4, nous comparons l'utilisation de *positions* sur le corps de l'utilisateur et de *directions* "en l'air" devant lui pour sélectionner des commandes. Nous étudions cette fois des gestes en trois dimensions adaptés à un contexte mobile, ou un contexte favorisant l'interaction à l'aveugle (c.à-d. l'utilisateur ne voit pas les interactions qu'il effectue), comme c'est le cas avec un système de réalité virtuelle utilisant un casque opaque. Deux résultats principaux ressortent de cette étude. Tout d'abord, ces deux méthodes mènent à nouveau à des taux de rappels élevés et comparables, ce qui confirme le résultat de la première étude. Ensuite, en comparant un groupe d'utilisateurs à qui il était demandé de créer des moyens mnémoniques, et un autre qui ne l'était pas, nous avons observé une nette amélioration des taux de rappel (jusqu'à 28.5%) en utilisant ces moyens mnémoniques.

En résumé les contributions de cette première partie sont les suivantes :

1. nous détaillons deux études approfondies sur la mémorisation de commandes à l'aide de *positions* ou de *directions* dans deux contextes particuliers (c.à-d. interactions sur dispositif mobile, et en trois dimensions sur le corps de l'utilisateur ou "en l'air")
2. ces deux études suggèrent qu'utiliser des *positions* ou des *directions* pour sélectionner des commandes et les mémoriser amène à des taux de rappels élevés et comparables
3. la deuxième étude suggère que simplement proposer aux utilisateurs de créer des histoires liées aux commandes pour les mémoriser plus facilement permet d'améliorer considérablement leurs taux de rappels (jusqu'à 28.5% d'amélioration en phase de rétention)

1.1.2 Grands ensembles de commandes

Dans la deuxième partie de la thèse nous présentons deux techniques d'interaction qui combinent des *positions* et des *directions* pour activer de grands ensembles de commandes. Cette approche a été seulement étudiée brièvement dans la littérature, sans produire de techniques d'interaction efficaces pour des utilisateurs experts [103], jusqu'à récemment [67, 172]. Nous montrons que cette approche est viable et efficace pour déclencher un grand nombre de commandes avec précision.

Dans le Chapitre 6, nous présentons une technique d'interaction appelée MarkPad, un nouveau concept d'interaction gestuelle pour pavés tactiles qui définit des gestes seulement à l'aide de deux zones sur celui-ci. Trois expériences détaillées dans ce chapitre nous permettent d'arriver aux conclusions suivantes : (1) les utilisateurs effectuent ces gestes (un maximum de 680 dans notre expérience) avec une grande précision en étant guidés par des marques visuelles ou visio-tactiles, (2) réduire le nombre de marques réduit aussi la précision pour une configuration dense de gestes, (3) les gestes MarkPad peuvent être utilisés en parallèle du pointage usuel sur un pavé tactile. Nous présentons de même dans ce chapitre un prototype effectif de MarkPad et son utilisation par ces concepteurs dans un premier temps, puis des utilisateurs au cours d'une étude longitudinale.

Nous étendons le concept de MarkPad dans le Chapitre 7, en proposant une variante de son design sur petit dispositif. Cette variante considère la direction du mouvement au moment de finir le geste, ce qui permet de déclencher un grand nombre de gestes malgré la taille contraignante des petits dispositifs. Une étude en laboratoire sur montre intelligente montre que ces gestes peuvent être réalisés à l'aveugle (c.à-d. sans regarder le dispositif interactif) avec précision (95% de précision après 20 minutes d'entraînement). Nous discutons enfin de l'adaptation de ce type d'interactions pour plusieurs formes de surface d'interaction.

Les contributions de cette deuxième partie peuvent être résumées ainsi :

1. nous détaillons un nouveau type d'interaction gestuelle adaptée à un grand ensemble de commandes, définissant des gestes à l'aide de *positions* et de *directions*, et nous proposons une variante adaptée pour de l'interaction à l'aveugle sur petits dispositifs
2. nous montrons leur efficacité à l'aide de plusieurs expériences (95% de précision), et soulignons l'importance de guider l'utilisateur avec des marques visuelles ou visio-tactiles pour effectuer ces gestes

3. nous présentons un prototype effectif pour ordinateur portable qui permet à l'utilisateur de définir des gestes et actions à déclencher, et étudions son utilisation par ses concepteurs pendant 2 ans, et 6 utilisateurs novices pendant 1 mois

1.2 ORGANISATION DE LA THÈSE

Nous abordons dans une première partie la mémorisation de commandes. Nous proposons une revue de la littérature dans le Chapitre 2 des domaines de la psychologie (revue succincte) et de l'interaction homme-machine (focalisé sur l'apprentissage de commandes). Cette revue nous permet de présenter le contexte de la thèse et d'introduire certaines problématiques de celle-ci. Principalement, nous montrons que la mémorisation est une dimension encore peu étudiée en IHM malgré son impact indéniable sur notre utilisation des systèmes interactifs (p.ex. retrouver un fichier dans une hiérarchie de dossiers, ou une commande dans une hiérarchie de menus).

Nous présentons ensuite dans le Chapitre 3 une première étude sur la mémorisation de commandes, en comparant des gestes *positionnels* et des gestes *directionnels*. Nous poursuivons dans le Chapitre 4 avec une deuxième étude similaire, qui compare l'interaction guidée par le corps de l'utilisateur à des gestes "en l'air". Cette deuxième étude compare en parallèle l'utilisation d'instructions et d'images pour aider les utilisateurs à mémoriser.

Dans une seconde partie, nous nous intéressons à des gestes définis par des *positions* et des *directions*. Ces deux modalités sont largement étudiées dans la littérature, semblent efficaces pour mémoriser des commandes, et permettent de sélectionner facilement un grand nombre de commandes. Le Chapitre 5 contient une revue de la littérature sur les techniques d'interaction gestuelles, et particulièrement les techniques adaptées à un grand ensemble de commandes.

Dans le Chapitre 6 nous présentons la technique MarkPad, ainsi qu'un prototype effectif qui tire avantage du pavé tactile d'un ordinateur portable pour effectuer des gestes simples et déclencher des actions rapidement. Nous validons le concept de cette technique en étudiant la précision des utilisateurs lorsqu'ils effectuent ce type de gestes, et les conflits engendrés avec le pointage usuel. Nous poursuivons dans le Chapitre 7 en présentant une variante de ce concept adaptée pour petits dispositifs appelée *Side-Crossing Menus*.

Nous concluons cette thèse en résumant les contributions de celle-ci, et présentons plusieurs perspectives de travaux futurs qui seraient dans la continuité des résultats obtenus jusqu'à présent.

PARTIE I

PROCESSUS DE MÉMORISATION IMPLIQUÉS DANS LA
SÉLECTION DE COMMANDES

Un utilisateur novice navigue dans une interface utilisateur pour découvrir les fonctionnalités qu'elle propose. Il peut ensuite retrouver les commandes dont il a besoin en *reconnaissant* leurs noms ou leurs icônes. Une fois qu'il acquiert de l'expérience, il peut aller plus vite en se rappelant de la position de la commande. Pour aller encore plus vite, il peut utiliser des raccourcis comme des raccourcis clavier, des commandes vocales, ou des gestes. L'avantage principal des raccourcis est qu'ils permettent de sélectionner des commandes rapidement, ce qui est adapté aux utilisateurs experts. Cependant, pour utiliser efficacement des raccourcis, les utilisateurs experts doivent les mémoriser pour s'en *rappeler* facilement plus tard.

Les modalités utilisées pour interagir avec une interface utilisateur peuvent varier entre une utilisation novice et experte. Dans le cas classique des menus linéaires sur un ordinateur, l'utilisateur peut déclencher des raccourcis clavier (mode expert) qui utilisent des combinaisons de touches pour déclencher une commande, sans utiliser la souris (mode novice). Cette différence de modalités est un problème pour les utilisateurs novices qui doivent faire la transition vers une utilisation experte [32, 130]. Pour éviter la création d'un faussé entre les modes novice et expert, des interactions similaires peuvent être utilisées dans ces deux modes. Les raccourcis gestuels sont une solution intéressante qui permettent à un utilisateur d'effectuer des mouvements guidés lorsqu'il est novice, puis de retirer ce guide dès qu'il devient expert [83]. Ce guide peut-être visuel [14, 83] ou sonore [45, 107] pour faciliter l'apprentissage de gestes.

Un utilisateur peut avoir recours à plusieurs composantes de la mémoire pour apprendre les raccourcis et déclencher des commandes plus vite. Dans le cas du pointage, la mémoire *spatiale* permet à l'utilisateur de se souvenir de la position de la commande sélectionnée [35, 131]. Dans le cas des raccourcis clavier, les utilisateurs doivent se souvenir d'une lettre et d'une à plusieurs autres touches pour déclencher une commande. La lettre peut correspondre à l'initiale de la commande pour simplifier sa mémorisation, mais des conflits sont alors fréquents (p.ex. les commandes "copier" et "coller"). L'utilisateur peut aussi utiliser l'imagerie mentale [81], et ainsi tirer avantage de sa mémoire des *images*, pour mémoriser la lettre comme un symbole (p.ex. la lettre 'X' peut être vue comme des ciseaux pour déclencher la commande 'couper' [55]). Dans le cas des gestes, la mémoire *mus-*

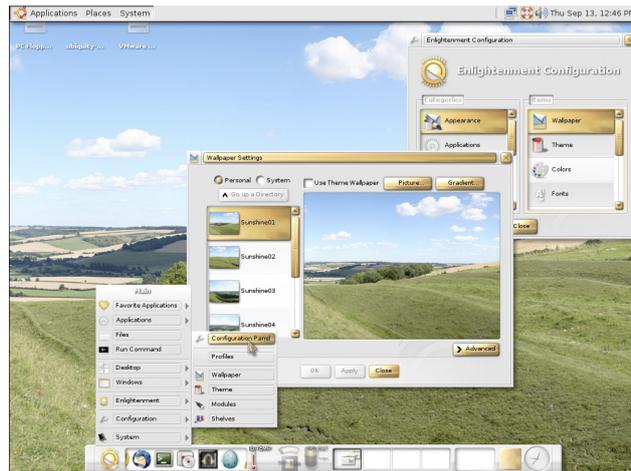


FIGURE 2.1 – Exemple d’interface WIMP avec des fenêtres, des icônes, des menus et l’utilisation d’un curseur pour pointer (source <https://en.wikipedia.org/>).

culaire peut intervenir sur le long terme [134]. Enfin, la combinaison de plusieurs types de mémoire améliore la mémorisation [99, 109].

Ce chapitre est constitué de trois parties dans lesquelles nous présentons : (1) différents types de raccourcis pour accélérer la sélection de commandes, (2) des méthodes utilisées pour faciliter l’apprentissage de ces raccourcis, (3) les types de mémoires impliqués dans cet apprentissage et des méthodes mnémoniques dont les utilisateurs peuvent bénéficier.

2.1 SÉLECTIONS DE COMMANDES RAPIDES

La sélection de commandes peut se faire de plusieurs façons. Nous décrivons dans cette partie trois des principaux mécanismes de sélection de commandes permettant à un utilisateur expert de déclencher des commandes rapidement.

2.1.1 Pointage

Dans le contexte d’interfaces WIMP (interfaces graphiques utilisant des **Windows**, **Icons**, **Menus**, **Pointing** ; Figure 2.1), le pointage est la méthode la plus utilisée pour sélectionner des commandes. Les utilisateurs peuvent naviguer dans des hiérarchies de menus ou des listes pour trouver les commandes dont ils ont besoin. Bien que cette modalité soit adaptée pour des utilisateurs novices, elle ne permet pas directement à des utilisateurs experts de sélectionner rapidement des commandes. Pour palier ce manque, certaines interfaces utilisateur offrent aux utilisateurs la possibilité de les personnaliser [42] (p.ex. les

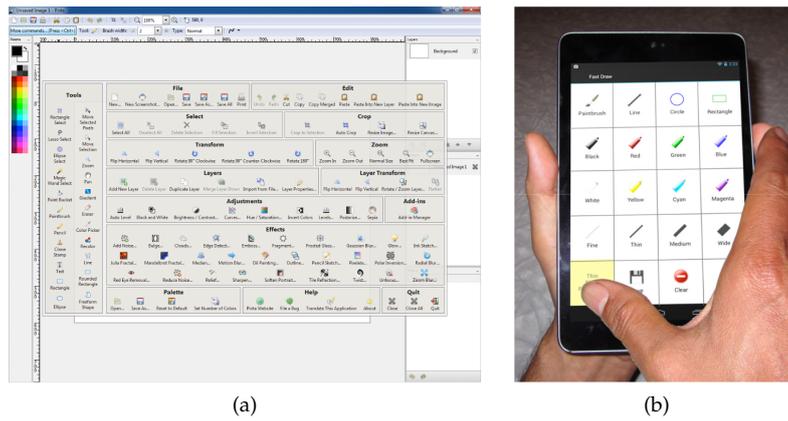


FIGURE 2.2 – Interfaces utilisateurs consistantes spatialement dans le temps :
 (a) CommandMaps utilisée avec le logiciel Pinta (source [131]),
 (b) FastTap utilisé sur tablette (source [66]).

logiciels Adobe Photoshop CC [2] ou Blender [44]). Ceux-ci peuvent par exemple sauvegarder une action particulière pour y accéder plus rapidement comme enregistrer un marque-page sur un navigateur web. Cette action crée alors un nouvel élément dans l'interface qui est plus facilement accessible (p.ex. une nouvelle entrée dans une liste). Ce concept peut être étendu à des actions plus complexes [27, 144].

Une autre façon de sélectionner des commandes rapidement en utilisant le pointage est d'utiliser des interfaces utilisateurs consistantes spatialement dans le temps (Figure 2.2). Ainsi, un utilisateur peut directement pointer sur la position d'une commande pour la sélectionner sans avoir besoin de voir son nom affiché [66]. Cette idée a été explorée précédemment dans plusieurs travaux [66, 131, 132, 135, 150] et a montré des résultats intéressants. Par exemple, une comparaison entre l'interface du logiciel Word et une méthode affichant les commandes sous forme de grille a montré que les vitesses d'exécution étaient meilleures dans le second cas [131]. Une explication est que cette seconde interface tire avantage de la mémoire spatiale des utilisateurs et leur permet ainsi de retrouver les commandes plus rapidement, comme décrit dans la suite.

Lorsque les interfaces sont spatialement consistantes dans le temps, les commandes peuvent être invisibles en mode expert [66, 85], ce qui rend leur sélection difficile. Pour simplifier ce processus, des repères spatiaux peuvent être utilisés pour guider l'utilisateur. Ces repères spatiaux peuvent être inhérents aux dispositifs, comme les coins et les bords de la surface d'interaction, ou à la technique d'interaction, comme la position des doigts de l'utilisateur dans le cas des *HandMenus* [150]. Des repères spatiaux peuvent aussi être ajoutés à l'interface, ce qui aide particulièrement si l'utilisateur doit sélectionner un grand nombre de commandes [148]. Pour que les positions des commandes soient encore mieux adaptées aux besoins des utilisateurs, ils peuvent



Visual Studio Code
Keyboard shortcuts for Mac

General	
⌘P, F1	Show Command Palette
⌘P	Quick Open
⌘N	New window/instance
⌘W	Close window/instance

Basic editing	
⌘X	Cut line (empty selection)
⌘C	Copy line (empty selection)
⇧↓ / ⇧↑	Move line down/up
⇧⇧↓ / ⇧⇧↑	Copy line down/up
⌘K	Delete line
⇧Enter / ⇧⇧Enter	Insert line below/above
⌘⇧\	Jump to matching bracket
⇧ / ⇧[Indent/outdent line
Home / End	Go to beginning/end of line
⇧1 / ⇧↓	Go to beginning/end of file
⇧PgUp	Scroll line up

Search and replace	
⌘F	Find
⇧⇧F	Replace
⌘G / ⇧⇧G	Find next/previous
⇧Enter	Select all occurrences of Find match
⇧D	Add selection to next Find match
⇧K ⇧D	Move last selection to next Find match

Rich languages editing	
⇧Space	Trigger suggestion
⇧⇧Space	Trigger parameter hints
Tab	Emmet expand abbreviation
⇧⇧F	Format document
⇧K ⇧F	Format selection
F12	Go to Definition
⇧F12	Peek Definition
⇧K F12	Open Definition to the side
⇧.	Quick Fix
⇧F12	Show References
F2	Rename Symbol
⇧⇧. / ⇧⇧,	Replace with next/previous value
⇧K ⇧X	Trim trailing whitespace
⇧K M	Change file language

FIGURE 2.3 – Exemple de raccourcis clavier (c.à-d. combinaison de touches) pour déclencher des commandes dans le logiciel Visual Studio (source <https://www.devacron.com>).

les personnaliser. Ces positions peuvent alors être associées à des repères spatiaux dans un environnement 2D (ou plutôt 2D et demi avec la profondeur) [120, 121] ou 3D [16, 114].

2.1.2 Raccourcis clavier

Les raccourcis clavier sont un moyen de sélectionner une commande rapidement à l'aide d'une *combinaison* de touches (Figure 2.3). Une touche spéciale appelée *modificateur* permet d'initier cette combinaison (p.ex. la touche "Control") sans entrer en conflit avec l'entrée de texte standard. Les commandes les plus communes d'une application sont souvent associées à un raccourci clavier, ce qui permet aux utilisateurs d'éviter de parcourir une hiérarchie de menus pour activer la commande dont ils ont besoin. La possibilité de combiner plusieurs modificateurs permet à l'utilisateur d'activer un grand ensemble de commandes. Cependant, le nombre de touches à appuyer et leurs positions sur le clavier peuvent rendre cette action compliquée. De plus, la mémorisation des combinaisons peut s'avérer difficile, comme discuté dans la suite.

Pour faciliter la mémorisation d'un raccourci clavier, la lettre utilisée peut correspondre à une des initiales de la commande en question (p.ex. 'C' pour copier). Par ce moyen, un utilisateur a besoin de faire moins d'effort pour retenir un raccourci. Cependant, cette méthode engendre rapidement des conflits entre les commandes ce qui peut porter à confusion (p.ex. "copier" et "coller"). La lettre utilisée pour le raccourci clavier peut aussi faire référence à une forme particulière (p.ex. la lettre "X" ressemble à des ciseaux pour la commande "couper"), ce qui peut-être mis en évidence sur l'icône représentant cette commande [55]. D'autres mécanismes comme des claviers augmentés

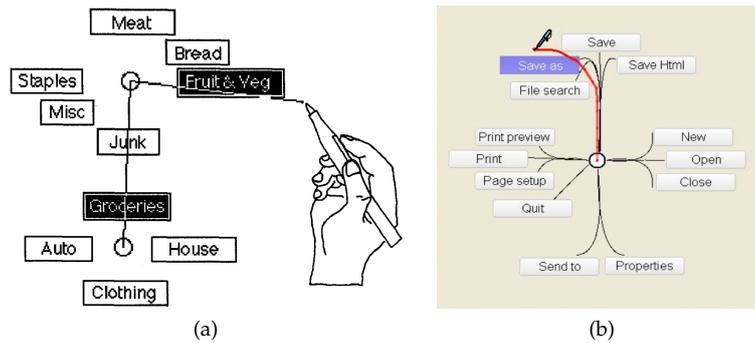


FIGURE 2.4 – Exemples de raccourcis gestuels. (a) Gestes directionnels hiérarchiques (*Marking Menus* [83]). (b) Gestes définis par une direction et une courbure particulière (*Flower menus* [9]).

[13] peuvent aider les utilisateurs en mettant en évidence les touches pouvant être activées.

L'apprentissage de raccourcis clavier est cependant un problème majeur car les utilisateurs doivent utiliser un dispositif de pointage pour sélectionner les commandes mais le clavier pour déclencher des raccourcis en mode expert. Les utilisateurs doivent donc avoir conscience de cette nouvelle modalité et faire l'effort de l'utiliser pour améliorer leur performance, ce qui peut entraîner une perte de performance dans un premier temps [32, 130]. Des méthodes ont été proposées pour pousser les utilisateurs à utiliser des raccourcis clavier [59], mais les utilisateurs risquent de se contenter du pointage pour effectuer la grande majorité des interactions s'ils ne voient pas de bénéfice à changer de modalité ou si l'effort demandé leur semble trop important [130].

2.1.3 Gestes continus

Les raccourcis gestuels offrent une autre alternative pour sélectionner rapidement des commandes. L'utilisateur peut effectuer un mouvement continu en utilisant un dispositif de pointage (p.ex. une souris ou un pavé tactile), ou en utilisant un ou plusieurs doigts sur une surface tactile pour activer une commande. Pour ne pas rentrer en conflit avec les actions de pointage un *mode* particulier peut être actionné (p.ex. en appuyant sur le bouton droit de la souris, ou en démarrant le geste d'un bord de la surface d'interaction). Un algorithme de reconnaissance reconnaît alors le geste grâce à différentes caractéristiques comme sa direction [83] ou sa courbure [9] (Figure 2.4). Un geste peut aussi être effectué en trois dimensions [45, 57] pour permettre plus de liberté à l'utilisateur et favoriser l'utilisation de gestes pour des systèmes où l'utilisateur doit être mobile (p.ex. systèmes de réalité virtuelle ou augmentée, mur d'écrans).

Comme les menus linéaires, les raccourcis gestuels permettent de naviguer dans des hiérarchies de menus et des listes commandes. Un premier geste élémentaire peut ainsi sélectionner un menu et être suivi d'un second geste qui sélectionne une commande dans ce menu [83]. Cette succession de gestes peut se faire dans un mouvement continu [83] (Figure 2.4-a) ou à l'aide de plusieurs gestes effectués les uns après les autres [170].

Cependant, les menus linéaires classiques permettent de prévisualiser le contenu d'un sous menu en passant la souris dessus, sans pour autant le sélectionner. Ce mécanisme utile pour des utilisateurs novices n'est pas disponible avec les menus gestuels qui ne représentent pas leur contenu en cascade, comme les *Simple-mark menus* [170]. Des travaux se sont intéressés à ce problème en proposant de prévisualiser le contenu de menus gestuels à la manière des menus linéaires classiques [46]. Un autre problème important est le nombre de commandes contenues à chaque niveau de cette hiérarchie. Ce nombre peut s'avérer vite contraint comme dans le cas des *Marking menus* [83] (8 sélections possibles par niveau). Cette caractéristique est discutée plus en détails dans le Chapitre 5.

Un atout non-négligeable des gestes est qu'ils semblent plus facilement mémorisables que des raccourcis clavier, et les utilisateurs semblent les préférer [6]. Leurs caractéristiques inhérentes combinent plusieurs dimensions (direction, position, courbure, etc.) qui en font des candidats intéressants pour faciliter leur apprentissage à l'aide de la mémoire *spatiale* et *procédurale* [134]. De plus, leurs formes peuvent être adaptées pour simplifier leur mémorisation, par exemple en utilisant des lettres [128]. Les gestes permettent d'utiliser des raccourcis sur des petites surfaces sensibles au toucher (p.ex. téléphone intelligent, montre intelligente) pour lesquelles des raccourcis clavier sont moins adaptés (utilisation de plusieurs doigts en plus de tenir le dispositif, besoin d'être précis car petit espace d'interaction), et peuvent être effectués en deux dimensions comme en trois dimensions. Ces caractéristiques permettent de les utiliser dans des contextes mobiles comme des systèmes de RV, de RA, ou des murs d'écrans.

2.2 APPRENTISSAGE

Pour apprendre à sélectionner les commandes d'une application, les utilisateurs doivent soit explorer l'interface de celle-ci, ce qui revient à naviguer dans de nombreux menus et fenêtres, ou bien suivre des explications sous forme de tutoriel. Pour retenir au mieux les actions effectuées et les reproduire correctement plus tard, plusieurs mécanismes peuvent être mis en place pour aider l'utilisateur. Nous présentons dans cette section plusieurs de ces mécanismes.

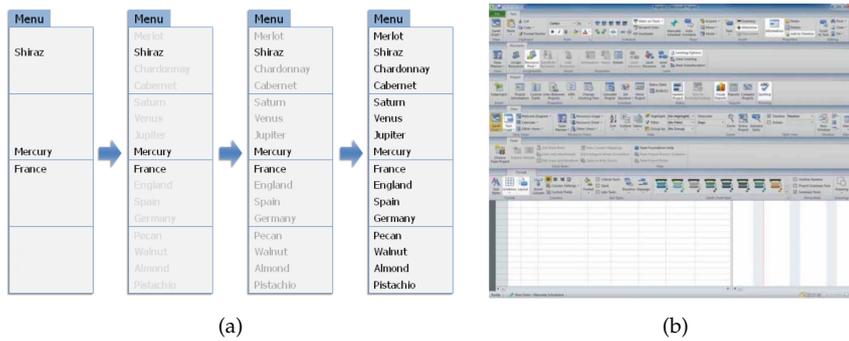


FIGURE 2.5 – Exemples d’interfaces adaptatives mettant en évidence un sous ensemble de commandes qui peuvent être activées. (a) Adaptation de l’interface pour que des utilisateurs novices puissent la découvrir plus facilement (source [42]). (b) Mise en évidence de certaines commandes pour faciliter leur recherche (source [133]).

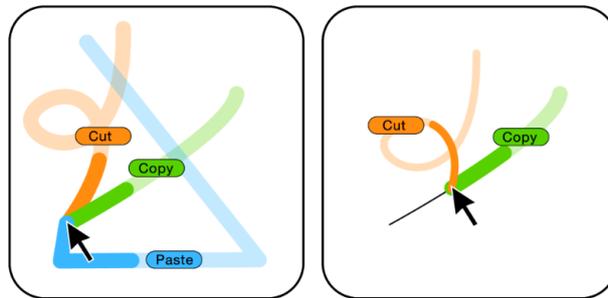


FIGURE 2.6 – Exemple d’aides dynamiques indiquant à l’utilisateur le reste des chemins à parcourir pour effectuer un geste (source [14]).

2.2.1 Mode novice

Interface adaptative. Pour simplifier la découverte d’un ensemble de commandes par des utilisateurs novices, une interface graphique peut être modifiée pour n’afficher qu’un sous ensemble de toutes ses fonctionnalités [42] (Figure 2.5-a). Grâce à ce mécanisme, l’utilisateur n’est pas submergé par une trop grande quantité d’informations et peut apprendre progressivement. Dans le cas où les commandes sont affichées en grille pour faciliter l’apprentissage à l’aide de la mémoire spatiale [66, 131], certaines commandes peuvent être grisées pour parvenir au même résultat [133] (Figure 2.5-b). Ce type de mécanisme permet de s’adapter au niveau de connaissances de l’utilisateur en lui révélant l’interface petit à petit pour l’aider à faire la transition vers une utilisation experte.

Interaction Gestuelle. Pour apprendre un geste, l’utilisateur doit reproduire un chemin comme illustré à l’aide d’un schéma [6], ou bien en suivant des indications affichées lorsqu’il interagit [37]. Ces indications peuvent représenter le chemin à parcourir à partir du début du

geste [9, 83, 126] (Figure 2.4), ou en indiquant le reste du chemin à parcourir pour finaliser un geste [14, 37] (Figure 2.6). Comme introduit dans le concept des *Marking menus* [83], l'utilisateur peut déclencher cette aide visuelle en attendant un délai de 300 millisecondes avant de commencer un geste. Ce mécanisme permet un contrôle fluide du mode novice, et simplifie la transition vers un mode expert. Enfin, des guides sonores peuvent aussi servir aux utilisateurs pour apprendre à effectuer des gestes [45, 107].

2.2.2 Mode expert

La répétition des gestes est supposée permettre aux utilisateurs de les apprendre de façon incidente [83]. Ainsi, au bout d'un certain temps, l'utilisateur n'a plus besoin d'être guidé par une aide visuelle ou sonore. Cette supposition repose entre autre sur la combinaison de la mémoire *implicite* [47] et de la mémoire *procédurale* [134]. Cette première nous permet de mémoriser sans en avoir conscience, et donc sans produire d'efforts particuliers, alors que la deuxième aide à mémoriser un mouvement à force de le répéter sur le long terme. La mémoire *procédurale* peut avoir recours à la mémoire *déclarative* [147] pour initier le processus de procéduralisation, avant d'effectuer une pratique régulière sur le long terme. Cependant, peu d'études se sont intéressées jusqu'à présent à l'apprentissage incident de gestes en IHM [84]. Les études présentées dans cette thèse abordent brièvement cette question en évaluant les fréquences d'utilisation des différents modes novices.

Le but principal du mode expert est de permettre des sélections de commandes rapides. Dans l'idéal un utilisateur expert connaît tous les raccourcis dont il a besoin et les réalise à la perfection. Or dans les faits, un utilisateur expert a besoin d'accéder facilement au mode novice pour apprendre à nouveau certains raccourcis ou bien confirmer que la commande associée au raccourci qu'il va déclencher est bien la bonne. De ce fait, une transition fluide entre les deux modes (comme proposée dans le design des *Marking menus* [83]) est primordiale. De plus, un utilisateur expert peut hésiter au cours d'un mouvement s'il a un doute. Dans ce cas, certaines techniques proposent des modes *semi-novice* qui se déclenchent si l'utilisateur s'arrête après avoir commencé son geste [14] (voir Chapitre 6).

2.3 PROCESSUS DE MÉMORISATION

Apprendre les gestes proposés par une application permet à un utilisateur de se les rappeler plus tard pour les effectuer plus rapidement. En facilitant ce procédé, nous espérons pouvoir aider l'uti-

lisateur à les apprendre plus vite et en apprendre un plus grand nombre. Notre approche au cours de cette thèse est de proposer des gestes simples qui s'appuient sur des caractéristiques intéressantes du point de vue de la mémorisation. Plusieurs types de mémoire semblent intéressants à privilégier comme la mémoire *spatiale*, la mémoire *sémantique* ou *l'imagerie mentale*. Des méthodes mnémotechniques exploitant ces types de mémoire permettent d'améliorer les performances de mémorisation ce qui offre des voies intéressantes pour l'IHM. Nous présentons ces concepts dans cette section.

2.3.1 Mémoire spatiale

La mémoire *spatiale* est une composante importante de notre mémoire qui nous permet de nous orienter dans un environnement à l'aide de repères pour ne pas se perdre [30]. Elle nous permet de mémoriser l'emplacement de repères spatiaux ainsi que leurs positions relatives sur le court terme [75] (rétention de quelques secondes), mais aussi sur le long terme [7, 35]. À l'aide d'une structure hiérarchique [7, 30], il est supposé qu'une quantité infinie d'informations spatiales pourraient même être retenues sur le long terme. Avec le développement des systèmes immersifs (p.ex. les systèmes de réalité virtuelle), la mémoire spatiale peut être facilement mise à profit en utilisant des repères spatiaux qui permettent de guider correctement l'utilisateur [39], lorsque celui-ci navigue dans un environnement virtuel par exemple [155].

À l'aide de la mémoire spatiale, un utilisateur peut apprendre la position des éléments graphiques d'une interface pour les retrouver plus facilement ensuite. En plaçant les commandes à des positions distinctes dans un environnement 2D [131] ou 3D [114], les utilisateurs peuvent apprendre leurs positions de façon incidente ce qui améliore leur rapidité de sélection [131], mais aussi leur rapidité de mémorisation [114]. Comme les bénéfices de la mémoire *spatiale* sont observables dans le cadre de mémorisation à court terme [75] et à long terme [7, 35], ce type de mémoire est aussi intéressant pour les utilisateurs novices que les utilisateurs experts. Dans les études présentées dans ce manuscrit, nous essayons de tirer avantage au maximum des bénéfices liés à la mémoire *spatiale* (voir les Chapitres 3-4-6-7).

Un avantage de la mémoire spatiale est qu'elle permet l'apprentissage incident de positions spatiales [30, 39, 96]. Cette caractéristique permet aux utilisateurs de pouvoir se focaliser sur une tâche principale sans avoir besoin de fournir d'efforts pour mémoriser des positions spatiales. Pour leur faciliter la tâche, des repères spatiaux peuvent être mis en évidence [30, 39, 114, 148]. Ainsi l'utilisateur peut s'appuyer sur ces repères pour retrouver aisément la position d'une commande. Enfin laisser le choix aux utilisateurs de placer

eux-mêmes les éléments dont ils doivent se rappeler [114, 120] leur permet de créer des catégories qui ont du sens à leurs yeux, ce qui facilite d'autant plus leur mémorisation [18, 97].

2.3.2 *Mémoire sémantique*

La mémoire *sémantique* est une composante de la mémoire *explicite* qui nous permet de stocker et d'accéder des connaissances générales [147]. Elle se différencie de la mémoire *épisode* qui encode des événements passés dans notre mémoire [147]. Ce type de mémoire permet de mémoriser des *concepts* qui peuvent être associés à différents stimuli (p.ex. des émotions peuvent être associées à des images ou des couleurs) [7]. Le *langage* en est une composante très importante car il permet de définir ces concepts, ce qui est entre autre justifié par des déficits de la mémoire *sémantique* observés chez des sujets possédant des troubles du langage [7, 159]. Un problème non négligeable dans le cas de l'apprentissage de commandes est que celles-ci peuvent sembler très abstraites pour un utilisateur qui aurait du mal à définir les concepts associés aux commandes, ce qui serait un frein à la mémoire sémantique [79].

Bien que l'on pourrait penser que l'utilisation d'*images* pour mémoriser des commandes (p.ex. des icônes) améliore significativement ce processus [109], des études semblent montrer le contraire [148] (voir Chapitre 4). Une étude en particulier par Bradshaw et al. [19] suggère que l'utilisation d'encodages élaborés en mémoire (p.ex. des concepts à l'aide de la mémoire *sémantique*) est plus efficace que l'utilisation d'images car celles-ci utilisent un niveau d'encodage moins profond. Pour encourager des utilisateurs à utiliser ce type d'encodage, nous proposons dans le Chapitre 4 d'instruire des utilisateurs sur la façon dont ils devraient apprendre des commandes, et montrons que de simples instructions suffisent à nettement améliorer leurs taux de rappel. Ce résultat suggère que guider des utilisateurs vers des stratégies de mémorisation adéquates est une alternative intéressante à développer plus en profondeur dans le domaine de l'IHM.

Par les mouvements qu'ils imposent, les raccourcis gestuels permettent dans une certaine mesure de tirer avantage de la mémoire sémantique. Les formes ou les directions qui les définissent peuvent être associés à des concepts permettant de se souvenir plus facilement des commandes qui leurs sont attribuées (p.ex. un geste vers la gauche ou la droite pour annuler ou refaire une action). De plus le mouvement produit par un geste peut ressembler à une action du monde réel comme pincer ou étirer pour réduire ou agrandir le niveau de zoom sur une application de cartographie. Les connaissances accumulées dans la vie courante en utilisant des outils peuvent ainsi être transférées pour effectuer des gestes qui sembleraient "naturels".

2.3.3 Méthodes mnémoniques

Les utilisateurs peuvent utiliser des méthodes mnémoniques pour faciliter l'apprentissage de commandes. Plusieurs de ces méthodes ont été évaluées dans le domaine de la psychologie et ont montré des bénéfices remarquables. L'utilisation de mots-clés qui servent d'*amorces* pour se rappeler de mots cibles est une méthode très répandue [7, 108] mais difficilement utilisable pour l'apprentissage de commandes. Cette méthode demanderait aux utilisateurs un effort considérable pour créer des associations entre les noms des commandes et des mots clés, ce qui ralentirait leur tâche principale. La méthode des loci [167] quant à elle propose d'utiliser des références spatiales tirées d'un lieu connu par l'utilisateur (p.ex. une représentation mentale de son logement) en guise d'amorces. Cette méthode est largement utilisée pour se rappeler de très grandes quantités d'informations comme les décimales de π [118].

Ces méthodes mnémoniques peuvent aider significativement des utilisateurs à mémoriser des commandes, mais demandent un entraînement non négligeable. Pour éviter à l'utilisateur de faire des efforts considérables en devant visualiser un environnement mentalement dans le cas de la méthode des loci, l'environnement physique entourant l'utilisateur peut être mis à profit [114]. Non seulement l'effort mental est atténué, mais l'utilisateur peut ainsi s'aider de repères spatiaux pour faciliter la sélection de commandes. Comme proposé au Chapitre 4, le corps de l'utilisateur peut aussi être exploité pour placer des commandes à différentes parties de celui-ci. Le corps peut ainsi servir d'environnement pour la méthode des loci. Une expérience décrite dans le Chapitre 4 montre que les participants doivent tout de même faire un effort non négligeable pour se souvenir des commandes dans ce cas de figure.

Malgré les bénéfices qu'apportent de telles méthodes, elles peuvent être inconnues des utilisateurs. Une étude de Raugh et al. [117] a montré qu'un groupe d'utilisateurs à qui il était demandé d'utiliser des moyens mnémotechniques pour apprendre un second langage arrivait à de meilleurs taux de rappel qu'un groupe témoins. Nous avons observé ce même résultat au cours d'une étude décrite dans le Chapitre 4. Ce résultat indique que des utilisateurs ont besoin d'être guidés pour apprendre efficacement un ensemble de commandes, car tous ne semblent pas avoir les moyens de le faire spontanément. Or, guider des utilisateurs dans un contexte réel plutôt qu'expérimental est une problématique intéressante qui mériterait des études approfondies.

MÉMORISATION DE GESTES POSITIONNELS ET DIRECTIONNELS

Nous présentons dans ce chapitre la première étude de la thèse. Cette étude compare l'apprentissage de *positions* ou de *directions* pour sélectionner des commandes. Ces deux modalités sont largement utilisées dans les interactions conventionnelles actuelles ; les menus linéaires associent des commandes à des *positions* et des gestes tels que les *Marking menus* [83] les associent à des *directions*. Plusieurs études ont montré l'intérêt d'utiliser des positions consistantes dans le temps pour favoriser la mémoire *spatiale* [131, 133], or il n'est pas clair si ce même type de mémoire est favorisé aussi par l'utilisation de *directions*.

Le contenu de ce chapitre est très inspiré de deux articles précédemment publiés à IHM'18 et ISS'18 [51, 53]

3.1 CONTEXTE

Pour utiliser les commandes proposées par une application, un utilisateur novice doit parcourir son interface en utilisant un mécanisme de *reconnaissance* visuelle. La position d'une commande dans un menu est donc d'une importance capitale pour pouvoir la mémoriser. Il a également été montré qu'une disposition hiérarchique des commandes facilitait leur mémorisation [18]. Une autre approche consiste à afficher toutes les commandes d'une application en même temps afin de faciliter l'exploitation de la mémoire *spatiale* [131, 132]. Cette stratégie semble permettre à un utilisateur de mémoriser les positions des commandes sur le long terme [120]. Des repères spatiaux peuvent aussi être ajoutés afin de faciliter l'apprentissage et d'obtenir de meilleures performances [149].

L'interaction gestuelle est une autre voie pour permettre aux utilisateurs d'activer rapidement des commandes. Mais ceci suppose que les utilisateurs soient capables de mémoriser facilement et durablement les associations entre les gestes et les commandes. La conception de gestes est un sujet qui a été très étudié dans la littérature [10, 83, 101] mais la question de l'apprentissage a longtemps été négligée, la plupart des études mettant plutôt l'accent sur la performance. Cette question a cependant connu un regain d'intérêt depuis quelques années [101, 129, 172].

Une méthode introduite par les *Marking menus* [83] consiste à faire répéter les gestes pour les apprendre de façon incidente. Un *mode no-*

vice fournit à l'utilisateur un guide visuel qui montre les gestes à effectuer [14, 83]. Les gestes étant similaires en mode *novice* et en mode *expert* (i.e. sans guide visuel), l'utilisateur apprend ce dernier par répétition du mode *novice* [7, 47, 83]. Cependant, à notre connaissance, aucune étude n'a précisément étudié si l'apprentissage de *positions spatiales* présenterait les mêmes caractéristiques que l'apprentissage de *directions* et donc, si l'une de ces techniques présenterait un avantage sur l'autre. Nous présentons dans ce chapitre une étude qui effectue justement cette comparaison.

L'apprentissage de positions spatiales repose, par définition, sur la *mémoire spatiale*, dont maintes études ont montré l'efficacité [40, 65, 96]. Le placement des commandes (et leurs positions relatives) est donc particulièrement important dans ce cas de figure [39]. Il est à ce jour incertain si l'apprentissage de *directions* repose autant sur la *mémoire spatiale*, ou si d'autres types de mémorisation entrent en jeu. De plus, dans les deux cas, les mouvements induits par les actions de sélection sont également susceptibles d'exploiter la *mémoire procédurale* [134] ainsi que la *mémoire sémantique* [147]. Les gestes peuvent en effet être associés à des concepts (par exemple, plus ou moins, ou bien ou mal, à haut/bas) ou des actions de la vie courante (tourner une page vers la gauche vs. vers la droite).

L'étude utilisateur présentée dans ce chapitre s'est déroulée sur trois sessions sur une période d'une à deux semaines. Les participants avaient à mémoriser un ensemble de 16 commandes (sur un total de 32 commandes possibles), placées de manière hiérarchique dans des menus contenant 8 éléments, et ce pour chacune des deux modalités (*positions* ou *directions*).

Les résultats indiquent des performances élevées dans les deux cas, mais aucune différence significative relative aux taux de rappel n'a pu être observée entre les deux modalités. Cependant, nous avons constaté un certain nombre de différences intéressantes, détaillées dans la suite de ce chapitre, et en particulier des résultats indiquant que les *positions* semblent demander moins d'attention aux participants et leur permettre d'apprendre les commandes plus rapidement. Les avis subjectifs des utilisateurs, recueillis dans un questionnaire, vont également dans le même sens. Notre étude montre enfin que les participants adoptent des stratégies similaires, comme rapporté dans le Chapitre 4.

Nous présentons dans un premier temps les techniques d'interaction utilisées lors de notre étude utilisateurs, puis la description de celles-ci. Nous discutons ensuite des résultats obtenus, et proposons des améliorations à apporter aux interfaces graphiques afin de favoriser l'utilisation de moyens mnémoniques par les utilisateurs.

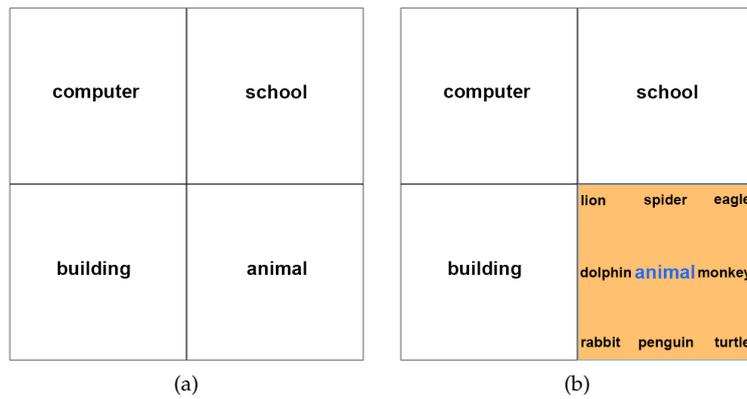


FIGURE 3.1 – Représentation des menus et des commandes dans le cadre de sélections par du pointage en mode *novice* (le texte est grossi sur les illustrations pour être lisible). Chacun des quatre menus est représenté par une zone d'interaction (a). Quand un menu est sélectionné (ici le menu "animal"), les huit commandes qu'il contient sont affichées (b).

3.2 DESCRIPTION DES TECHNIQUES

3.2.1 Pointage

Habituellement, un utilisateur peut sélectionner des commandes en pointant sur des icônes dans des barres d'outils ou en parcourant des menus linéaires. Pour mieux mettre à profit la mémoire *spatiale*, nous proposons une technique d'interaction inspirée de [66, 131] qui associe à chaque commande une position unique et consistante dans le temps. Un menu est représenté par une zone rectangulaire (Figure 3.1-a) dans laquelle sont placées les commandes qu'il contient. Pour aider l'utilisateur à mémoriser, les commandes sont placées à côté de repères spatiaux [149] (c.à-d. les coins et les bords, Figure 3.1-b). Pour sélectionner une commande, l'utilisateur doit sélectionner un menu en cliquant (c.à-d. appuyer et relâcher le doigt) à l'intérieur de sa zone d'interaction, puis cliquer sur la commande ciblée.

Pour visualiser les commandes d'un menu, l'utilisateur doit avoir recours au mode *novice*. Lorsque celui-ci est activé, les noms des menus apparaissent constamment au centre de leurs zones d'interaction (Figure 3.1-a). Quand un menu est sélectionné, la zone est peinte en orange et les commandes qu'il contient sont affichées le long des bords de sa zone (Figure 3.1-b). Une fois les positions des commandes connues, l'utilisateur n'a plus besoin de les voir affichées et peut utiliser le mode *expert*. Il peut alors sélectionner un menu de la même façon qu'en mode *novice*, et cliquer à une position particulière de ce menu pour sélectionner une commande (la commande la plus proche est sélectionnée pour éviter les erreurs de pointage). Le mode *novice* se déclenche en restant appuyé pendant un délai de 300 millisecondes

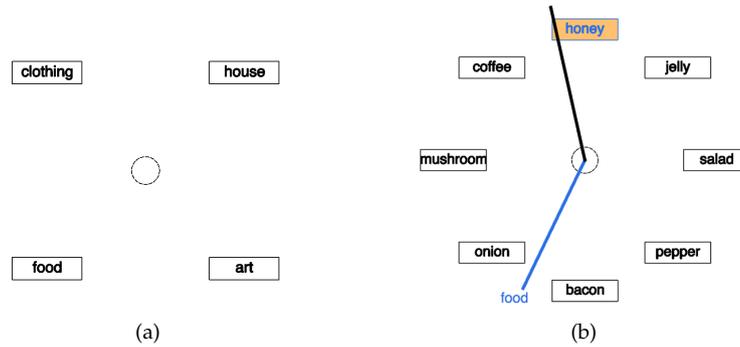


FIGURE 3.2 – Représentation des menus et des commandes dans le cadre de sélections par des gestes *directionnels* en mode *novice*. Le geste de l'utilisateur est représenté par un trait noir, et un trait bleu représente la sélection valide d'un menu (b).

sur un menu. Pour annuler la sélection d'un menu, l'utilisateur peut cliquer en dehors de sa zone d'interaction.

3.2.2 Gestes directionnels

Pour effectuer des gestes directionnels, nous avons développé une technique d'interaction fortement inspirée des *Simple-mark menus* [170]. Cette variante des *Marking menus* [83] a comme avantage de minimiser les erreurs de sélection [170]. De plus elle utilise un mécanisme de sélection en deux temps, la première pour le menu et la deuxième pour la commande, qui semble mieux adapté que les *Marking menus* pour la comparaison avec les gestes positionnels décrits ci-dessus.

Le mode *novice* se déclenche en restant appuyé pendant 300 millisecondes avant de commencer un geste, ce qui révèle les menus (Figure 3.2-a). L'utilisateur peut alors effectuer un geste (représenté par un trait noir, Figure 3.2-b) dans la direction d'un menu pour le sélectionner. Quand un menu est sélectionné, un trait bleu indique le geste utilisé pour le sélectionner (Figure 3.2-b). Effectuer un deuxième geste directionnel sélectionne une commande dans ce menu (Figure 3.2-b). En mode *expert* (c.à-d. les commandes sont invisibles), seuls les traits indiquant les gestes de l'utilisateur sont affichés. Pour annuler la sélection d'un menu, l'utilisateur peut effectuer un geste dont la longueur ne dépasse pas la limite indiquée par le cercle centrale sur la Figure 3.2.

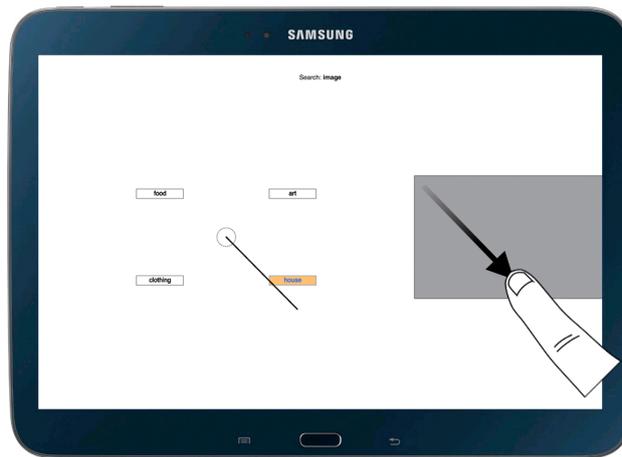


FIGURE 3.3 – Exemple d’un geste effectué par l’utilisateur sur la zone d’interaction dédiée pour éviter l’occultation des commandes.

3.2.3 Dispositif

Nous avons développé ces techniques sur interface mobile pour forcer une interaction directe (c.à-d. pas d’utilisation de dispositif de pointage relatif comme une souris). Ce contexte permet de différencier plus nettement les gestes positionnels des gestes directionnels, qui sont très similaires quand ils sont effectués à l’aide d’une souris ou d’un pavé tactile. Cependant, ce type de contexte est sujet à l’occultation de l’information quand la main de l’utilisateur est au-dessus de l’écran. Ce problème est très important dans le cas des gestes directionnels car l’utilisateur interagit en continu et a donc plus de chances d’occulter les informations affichées sur l’écran. Pour palier à ce problème, l’utilisateur effectue les gestes directionnels dans une zone dédiée sur le côté du dispositif (Figure 3.3). Cette zone est placée à gauche ou à droite du dispositif suivant la main dominante de l’utilisateur.

3.3 ETUDE UTILISATEUR

Nous présentons dans cette section une étude comparant la mémorisation d’ensembles de commandes par le biais des deux techniques d’interaction décrites précédemment (*Positions* et *Directions*, facteur TECH). Notre hypothèse principale de travail est que comme les *Positions* sont susceptibles de tirer davantage profit de la *mémoire spatiale* elles devraient permettre d’obtenir de meilleurs résultats que les *Directions*.

Participants. Nous avons analysé le comportement de 16 participants (dont 6 femmes) âgés de 23 à 40 ans (moyenne = 28 ans) au cours de l’étude.

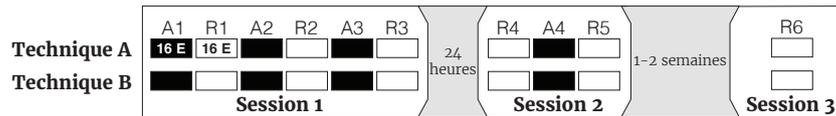


FIGURE 3.4 – Protocole expérimental de l'étude : les trois sessions se déroulent sur une à deux semaines avec des phases d'apprentissage (A) et de rappel (R) composées de 16 essais chacune.

Dispositif. L'expérience s'est déroulée sur une tablette Samsung Galaxy Tab Pro 10.1 avec un écran mesurant 13.6×21.8 cm.

Sessions d'évaluation. L'expérience est découpée en trois sessions étalées sur une à deux semaines (moyenne = 9.33 ± 2.79 jours). Chaque session est composée de phases d'apprentissage et de phases de rappel (Figure 3.4). La première session est composée de 3 paires de phase d'apprentissage et de rappel pour évaluer la mémoire à *moyen terme* (A1-R1, A2-R2, A3-R3). La deuxième session, un jour après, commence par une phase de rappel (R4) pour évaluer la rétention d'information des utilisateurs, suivie par une paire (A4-R5) pour renforcer leurs connaissances. Enfin, une troisième session composée d'une seule phase de rappel (R6), une à deux semaines plus tard permet l'évaluation de la mémoire à long terme (seul un participant n'a pas pu faire cette dernière session).

Pendant les phases d'*apprentissage*, les participants doivent mémoriser la façon dont ils sélectionnent les commandes. Ces phases commencent en mode *expert* (les commandes n'apparaissent pas) en laissant la possibilité aux utilisateurs de déclencher le mode *novice* après un délai d'une seconde. Nous utilisons un délai plus long que le délai de 300 millisecondes indiqué ci-dessus et proposé initialement dans [83], car nous voulons nous assurer que les participants ne le déclenchent pas par erreur. Ainsi les participants se rappelant de la sélection à effectuer n'ont pas besoin d'afficher les commandes, ce qui nous permet d'évaluer la fréquence d'utilisation du mode *novice*. Pendant les phases de *rappel*, seulement le mode *expert* est disponible, forçant les participants à se rappeler les sélections précédemment mémorisées.

Le participant doit appuyer sur un bouton au centre de l'écran pour commencer un essai. Le nom de la commande à sélectionner est alors affiché en haut de l'écran (Figure 3.3). Il est demandé aux participants de mémoriser le maximum de commandes possible. Pendant les essais en phases d'*apprentissage*, un retour sonore est joué après la sélection d'une commande pour indiquer la validité de celle-ci. Dans le cas d'une mauvaise sélection, le mode *novice* est déclenché automatiquement pour que le participant puisse sélectionner la bonne commande. Pendant les phases de *rappel*, le participant ne peut sélectionner qu'une seule commande et aucun son n'est joué à la sélection.

A la fin de chaque phase de rappel, les taux de rappels obtenus précédemment sont révélés aux participants pour les informer de leurs performances.

Protocole expérimental. Nous utilisons un protocole intra-participants pour comparer les deux techniques d'interaction. Toutes les phases d'une session sont effectuées les unes à la suite des autres en utilisant une technique d'interaction, puis la suivante (Figure 3.4). Avant de commencer les phases de la première session avec une technique, une phase de familiarisation composée de 8 essais utilisant un vocabulaire différent est effectuée par les participants afin qu'ils soient suffisamment accoutumés à la technique. Pour éviter un effet d'ordre entre les techniques, l'ordre de celles-ci est contrebalancé d'un participant à l'autre.

Catégories. Deux ensembles de quatre catégories de commandes ont été créés pour l'étude (Figure 3.5). Chaque ensemble est contrebalancé entre les techniques pour éviter un biais sur les performances des techniques qui soit lié à l'un des ensembles. Ces catégories étaient composées de 8 commandes chacune. Pour créer les catégories, nous avons choisis des mots fréquents de l'anglais¹, ne partageant pas les mêmes initiales. Pour chaque phase, la moitié des mots les plus fréquents de chaque catégorie doit être mémorisée. La position des catégories pour chaque technique est contrebalancée entre les participants.

Positions des commandes. Comme les participants n'ont à mémoriser que la moitié de chaque catégorie, nous utilisons des schémas particuliers pour positionner les commandes à mémoriser. Comme montré sur la Figure 3.6, les schémas utilisés sont complémentaires deux à deux. L'intérêt de ces schémas est de faire varier la proximité des commandes ciblées pour empêcher un effet non contrôlé de leurs positions sur les taux de rappel et d'évaluer l'avantage de cette proximité. Le reste des positions est utilisé pour afficher des commandes représentant des *distracteurs*. Chaque ligne de la Figure 3.6 représente

1. liste de mots anglais fréquents
https://en.wiktionary.org/wiki/Wiktionary:Frequency_lists#English

ANIMALS	rabbit, eagle, lion, monkey penguin, dolphin, spider, turtle	ART	color, image, design, model painting, brightness, sculpture, realism
BUILDING	station, castle, hotel, prison mansion, garage, temple, villa	COMPUTER	command, format, data, network hardware, login, browser, keyboard
CLOTHING	costume, fashion, pocket, jersey garment, turban, sweater, hangbag	HOUSE	table, garden, mirror, bedroom sofa, pillow, carpet, laundry
FOOD	coffee, honey, pepper, bacon jelly, salad, onion, mushroom	SCHOOL	answer, lesson, teacher, student textbook, blackboard, exam, homework

FIGURE 3.5 – Les deux ensembles de catégories de commandes utilisés au cours de l'étude. Les commandes en gras devaient être mémorisées par les participants.

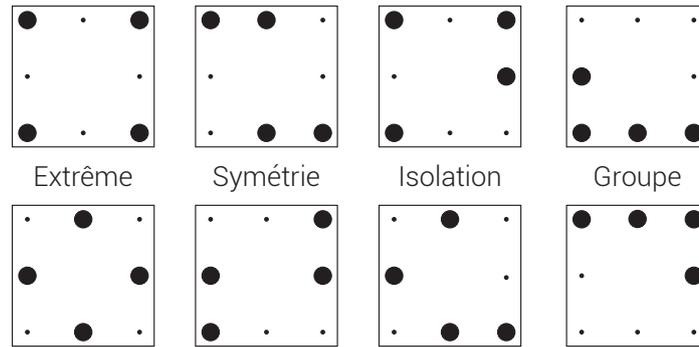


FIGURE 3.6 – Positions des commandes à mémoriser dans les catégories. Chaque ligne était associée à l’une ou l’autre technique pour un participant donné.

un groupe de schémas associé à une des deux techniques pour un participant donné.

Temps d’apprentissage. Le temps d’apprentissage ayant un effet important sur la mémorisation [7], nous avons décidé de le limiter pour tous les participants afin d’éviter des différences trop importantes. Pour ce faire, après le déclenchement du mode *novice* dans les phases d’apprentissage, ce mode ne peut pas être désactivé et les commandes disparaissent petit à petit pendant un délai de 10 secondes jusqu’à devenir invisibles.

3.3.1 Résultats

En comparant les résultats obtenus par tous les participants, il s’est avéré que les résultats du participant 11 étaient anormalement différents (plus de 1.5 fois l’écart interquartile) sur les phases R1, R4, et R5, ainsi que très différents du reste des participants sur la phase R6. Nous ne considérons donc pas les résultats obtenus par ce participant dans les analyses présentées ci-dessous. Pour comparer deux

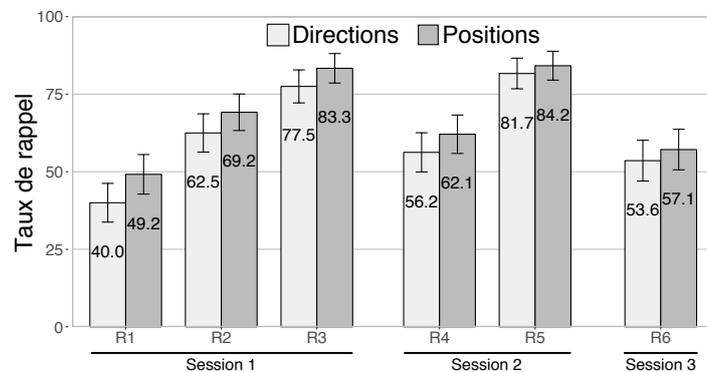


FIGURE 3.7 – Taux de rappel par TECH au cours des trois sessions.

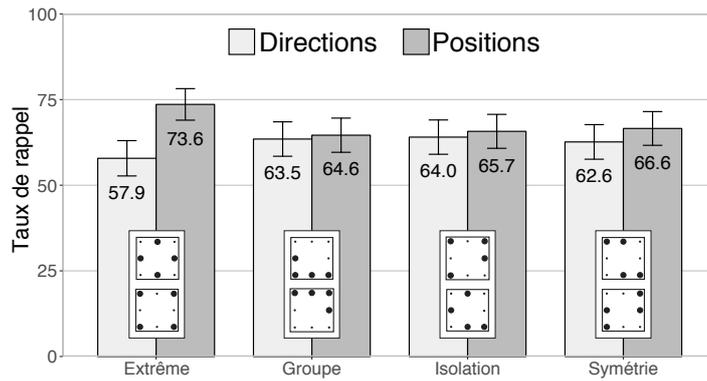


FIGURE 3.8 – Taux de rappel obtenus en moyenne sur toutes les phases pour chaque schéma de positions de commandes par rapport à la TECH utilisée.

ensembles de données nous utilisons dans ce qui suit des tests de rang signés de Wilcoxon [163]. Les intervalles de confiance sur les graphes représentent un taux de 95%.

Taux de rappel. Les taux de rappels obtenus à l'aide des TECH sont représentés sur la Figure 3.7. Les performances sont assez élevées à la fin de la première session (R3) avec des taux de 77,5% pour les *Directions* et de 83,3% pour les *Positions*. Ils diminuent sensiblement après 24 heures (R4 : 56,2% vs. 62,1%) mais restent ensuite assez stables (R6 : 53,6% vs. 57,1%) après une période d'une à deux semaines. Les différences ne sont cependant pas significatives ($p's > 0.1$ pour toutes les phases), probablement du fait de la variabilité inter-participants.

Concernant les schémas utilisés pour positionner les commandes (Figure 3.8), dans le cas des *Positions*, les positions *extrêmes* (i.e., coins et bords) mènent à des performances nettement supérieures (amélioration de 27.1%, $p < 0.001$). Ce résultat suggère d'utiliser des repères spatiaux éloignés et réguliers pour aider les utilisateurs à mémoriser des commandes.

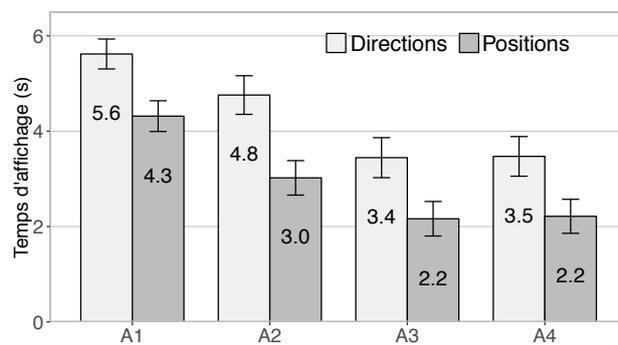


FIGURE 3.9 – Temps d'affichage moyens des commandes lors des phases d'apprentissage pour chaque TECH.

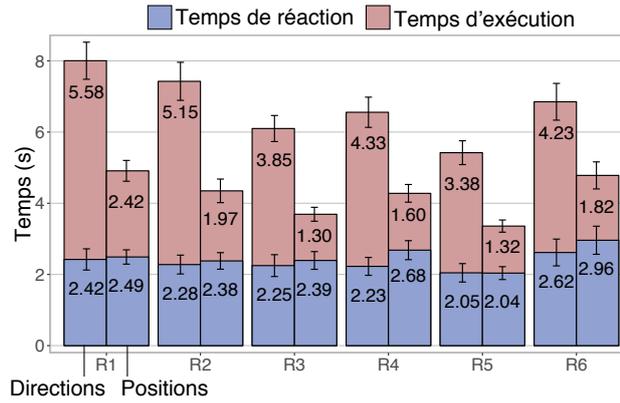


FIGURE 3.10 – Temps de réaction et d’exécution moyens (différence entre le premier toucher et la fin de la tâche) lors des phases de rappel pour chaque TECH.

Temps d’apprentissage et d’exécution. En comparant les temps d’affichage moyens des commandes lors des phases d’apprentissage pour chaque TECH, les *Positions* demandent un apprentissage plus court avec une différence variant entre 1.7s et 1.25s ($p's < 0.001$, Figure 3.9). Ce résultat semble indiquer que l’apprentissage des commandes se fait plus rapidement en encodant les *positions spatiales* en mémoire. Si on regarde maintenant les temps de réaction et d’exécution des deux TECH pendant les phases de rappel (Figure 3.10), les participants réagissent aussi vite pour les deux TECH ($\approx 2.4s$), mais les *Positions* permettent des sélections beaucoup plus rapides (différence entre 3.06s et 2.05s, $p's < 0.001$). Cette différence peut être interprétée de deux manières : les gestes de pointage sont plus rapides ou les participants accèdent plus rapidement à la position des commandes en mémoire.

Mode expert. Le choix était laissé aux participants d’utiliser ou non le mode *novice* pendant les phases d’apprentissage. Une comparaison du taux de déclenchement du mode *novice* pour chaque TECH montre que les participants y avaient moins recours en utilisant les *Positions* que les *Directions* (72.5% d’activation contre 83.8% pour A2, 53.3% vs. 64.2% pour A3, et 55.8% vs. 66.7% pour A4; $p's < 0.01$). Ceci suggère que l’utilisation des *Positions* nécessite moins de répétitions pour encoder l’information en mémoire que les *Directions*.

Questionnaire. A la fin de la première session, les participants devaient remplir un formulaire qui repose sur le modèle du NASA TLX [71]. Les échelles de Likert contenues dans ce questionnaire étaient paramétrées de 1 (très négatif) à 7 (très positif). Leurs résultats sont représentés sur la Figure 3.11. En plus de ces échelles, les participants devaient indiquer s’ils avaient une préférence pour une des deux TECH et expliciter les stratégies élaborées au cours de l’expérience pour mémoriser. Les préférences étaient mitigées mais en faveur des *Positions*, avec 9 participants préférant les utiliser et 5 pour les *Directions* (un participant ne préférant aucune des deux techniques). L’analyse des

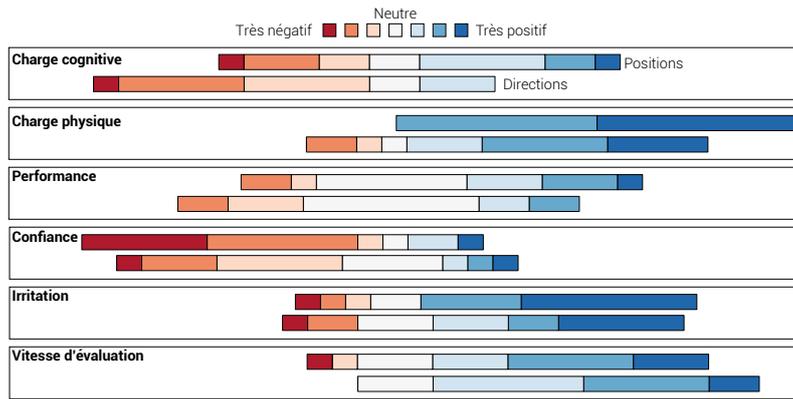


FIGURE 3.11 – Réponses au questionnaire soumis aux participants.

résultats obtenus à l'aide des échelles de Likert suggère un avantage des *Positions* au niveau des charges cognitive ($p = 0.014$) et physique ($p = 0.014$), ainsi qu'une tendance pour leur confiance en leurs capacités de mémorisation ($p = 0.085$). Cette meilleure appréciation des *Positions* en matière d'efforts engendrés suggère que cette modalité est plus simple à manipuler que les *Directions*. Ce résultat explique en partie pourquoi les *Directions* amènent à des temps de complétion plus importants.

Stratégies. Nous avons catégorisé les stratégies décrites par les participants au cours du questionnaire et avons trouvé des similitudes. Tout d'abord, deux tiers des participants (66.6%) ont décidé de grouper plusieurs commandes par rapport à leurs positions, ou leur signification (p.ex. "the teacher is asking a student for an answer" P15). Cette première observation indique l'importance du positionnement des commandes dans une interface ainsi que leurs positions relatives [30]. Les positions des commandes sont d'autant plus importantes que 26.6% des participants ont rapporté mémoriser les schémas formés par ces positions, sans avoir été informé de leur existence. Enfin, plus de la moitié des participants (60%) ont rapporté mémoriser les commandes en utilisant leur signification (p.ex. "l'aigle est en haut parce qu'il vole" P1 ou "bacon descend dans le ventre, donc en bas" P8).

3.4 DISCUSSION ET CONCLUSION

3.4.1 Discussion

Taux de rappel. Tout d'abord, les performances en terme de mémorisation sont assez élevées : 77,5% pour les *Directions* et 83,3% pour les *Positions* en fin de première session et plus de la moitié des commandes étaient retenues lors des phases de rétention R₄ (24h après)

et R6 (1 à 2 semaines après) avec des taux de 56.2% et 53.6% pour les *directions* et de 62.1% et 57.1% pour les *positions*. Il est intéressant de constater que dans les deux cas les performances restent assez stables entre les deux phases de rétention. Du fait des variabilités individuelles ces différences ne sont pas significatives ($p's > 0.1$), sauf pour R1 où elles le sont presque ($p = 0.06$). On peut donc pour l'instant seulement conclure que les performances en terme de mémorisation ne sont pas différentes.

Un point intéressant à souligner est que les stratégies utilisées pour mémoriser étaient souvent similaires dans les deux cas (33.3% des participants l'ont explicité), ce qui contribue vraisemblablement à la similarité des performances. Les avantages attribués à la mémoire *spatiale* semblent avoir également été mis à profit pour les *directions* si l'on en juge par ces stratégies (groupement de commandes, mémorisation des schémas des positions).

Repères spatiaux. En utilisant plusieurs schémas de positions de commandes (Figure 3.6), nous avons observé que les commandes placées dans les coins et sur les côtés obtenaient de meilleurs taux de rappel (amélioration de 27.1%, $p < 0.001$) pour les *positions* (voir le schéma "extrême"). Nous avons vérifié que ce résultat n'était pas dû à l'apprentissage d'une catégorie mieux qu'une autre. Il indique donc qu'un schéma régulier utilisant des repères spatiaux distincts peut aider l'utilisateur dans sa tâche de mémorisation, comme semblent d'ailleurs l'indiquer d'autres études [30, 114, 149]. Ainsi, les moins bons taux de rappel obtenus avec les *directions* peuvent peut-être s'expliquer par le manque de repères spatiaux explicites inhérent à ce type de technique.

Avantages des Positions. En comparant pour chaque condition les temps d'apprentissage et d'exécution, nous avons observé qu'utiliser des *positions* est plus rapide que des *directions* sur ces deux aspects (respectivement $\approx 1.5s$ et $\approx 2.6s$). Ce résultat est important car il suggère que l'encodage en mémoire des *positions spatiales* et que la *récupération* de cette information se font plus rapidement. Vient s'ajouter à ce résultat l'utilisation du mode *novice* qui était plus importante dans toutes les phases d'apprentissage en utilisant des *directions*. Les participants avaient donc besoin de voir les commandes moins souvent en mémorisant des *positions* que des *directions*. Enfin, les résultats du questionnaire suggèrent que les participants avaient besoin de fournir moins d'efforts pour mémoriser des *positions*. L'ensemble de ces observations suggère un bénéfice en faveur de l'apprentissage de *positions* relativement aux *directions*.

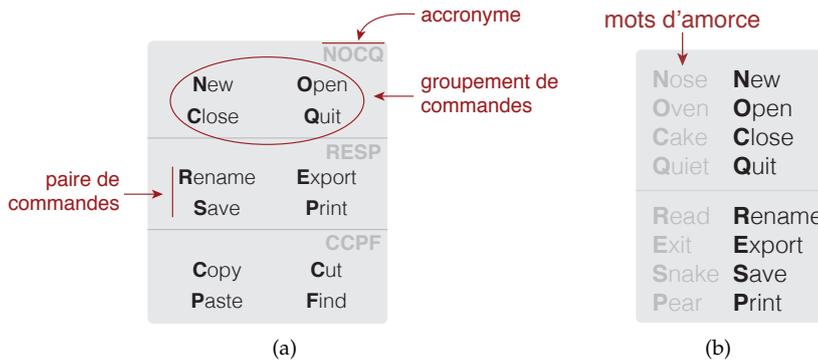


FIGURE 3.12 – Suggestions d’améliorations pour des menus linéaires dans le but d’aider les utilisateurs à mémoriser des commandes. (a) *Groupement de commandes* et utilisation d’*acronymes* pour classer les groupes. (b) Utilisation de mots d’*amorce* concrets pour simplifier la mémorisation de commandes abstraites [108].

3.4.2 Pistes de recherche et suggestions

Groupement de Commandes. Nous avons observé que 66.6% des participants formaient des groupes de commandes pour faciliter leur mémorisation. Cette méthode est connue [99] et a été observée dans d’autres études [16, 114] (voir Chapitre 4). Il est intéressant de remarquer que les participants ont pour la plupart utilisé cette méthode, et ce sans qu’on ne donne d’indications suggérant de le faire. Pour permettre à tous les participants d’en profiter, les interfaces graphiques pourraient mettre en évidence de petits groupes de commandes plutôt que de grandes catégories (Figure 3.12-a). Elles pourraient ainsi être représentées par paires, ou par groupe de 4 comme suggéré pour des tâches de mémorisation de chiffres [7, 99].

Sémantique. Les commandes utilisées au cours de notre étude faisaient référence, dans l’ensemble, à des concepts concrets (p.ex. des animaux, des végétaux). Ces concepts ont favorisé l’utilisation de la mémoire sémantique [147], comme l’ont rapporté 60% des participants. Cependant, quelques participants ont dit avoir eu plus de mal à mémoriser des concepts plus abstraits comme les catégories *computer* et *art* (ce qui n’est pas vérifié par nos résultats). Comme les commandes d’applications font en général référence à des concepts abstraits, une solution serait de faire apprendre ces commandes à des utilisateurs à l’aide de concepts plus concrets en utilisant par exemple des *mots d’amorce* [108] (Figure 3.12-b). Une autre solution serait d’aider les utilisateurs avec des images (p.ex. des icônes), mais elles peuvent aussi paraître abstraites pour les utilisateurs, et cette approche s’est révélée plusieurs fois inefficace [149] (voir Chapitre 4).

Placement des Commandes. Pour se rappeler des commandes, les participants utilisaient leurs positions relatives à l’intérieur de la catégo-

rie à laquelle elles appartenaient, parfois en prenant compte de leur signification (p.ex. "the eagle is up because it flies" P1, ou "answer is up because it is good" P7). Nous avons par exemple observé que les participants associaient souvent le *haut* et le *bas* aux concepts *bien/fort* et *mauvais/faible*. Ainsi, la signification et le positionnement d'une commande pourraient être liés, particulièrement quand les commandes évoquent un concept ou une direction, comme par exemple, les commandes *undo/redo* qui évoquent le passé ou le futur, et la gauche ou la droite.

3.4.3 Conclusion

Nous avons comparé dans ce chapitre deux types d'interactions pour la mémorisation de commandes respectivement basées sur l'utilisation de gestes *positionnels* (pointage) ou *directionnels*. Le but de cette étude était d'évaluer si ces deux types de gestes très courants, dont l'apprentissage ne fait pas nécessairement exactement appel aux mêmes types de mémoire, présenteraient un avantage, ou des différences remarquables, l'un par rapport à l'autre.

Une étude effectuée en trois sessions sur un intervalle de une à deux semaines a montré, pour le *pointage*, un avantage en ce qui concerne la rapidité d'*apprentissage*, la rapidité de *rappel* et l'*effort* physique et cognitif induit. Les performances de mémorisation sont quant à elles comparables : aucune des deux modalités n'a mené à de meilleurs taux de rappel que l'autre.

L'analyse du questionnaire rempli par les participants a permis de mettre en évidence l'utilisation spontanée de plusieurs stratégies comme le *groupement* de commandes ou l'utilisation de la *sémantique* pour faciliter la mémorisation. Ces stratégies semblent indiquer une utilisation efficace de la mémoire spatiale pour les deux types de gestes.

Nous avons également proposé quelques pistes pour améliorer la mémorisation avec les interfaces graphiques actuelles, comme l'adaptation du placement des commandes et l'association à des concepts concrets plus faciles à mémoriser. Ces pistes constituent la base de travaux futurs dont nous discutons dans la conclusion générale de cette thèse.

IMPACT DE L'INTERACTION CORPORELLE ET DE L'UTILISATION D'AIDES SÉMANTIQUES SUR LA MÉMORISATION DE COMMANDES

Pour faire suite à la première étude de la thèse présentée dans le Chapitre 3, nous étudions dans ce chapitre plus en détails l'utilisation de *positions* ou de *directions* dans des contextes mobiles, comme par exemple, lorsque l'utilisateur interagit avec un *mur d'écran* ou certaines applications de *réalité virtuelle*. Afin de ne pas gêner la mobilité de l'utilisateur, les gestes peuvent être effectués "en l'air" devant lui, ou bien sur son propre corps. Un avantage important de l'interaction corporelle est que l'utilisateur peut interagir à l'aveugle grâce à la *proprioception*. Nous présentons une nouvelle technique d'interaction appelée BodyLocs qui permet à l'utilisateur de sélectionner des *positions* sur son corps pour déclencher des commandes. Pour évaluer l'intérêt de cette approche en matière de mémorisation de commandes, nous la comparons à des gestes *directionnels* "en l'air".

Le contenu de ce chapitre est très inspiré d'un article précédemment publié à AVI'18 [52]

Comme utiliser des repères spatiaux améliore les performances de mémorisation lorsque l'on effectue des tâches de pointage [148] (voir Chapitre 3), nous souhaitons comprendre si le corps de l'utilisateur peut aider de la même manière. En particulier, le corps peut servir de support physique à la méthode des locs (présentée dans le Chapitre 2) et ainsi simplifier son utilisation par des utilisateurs novices. Le corps est alors vu comme un "environnement" où l'on place des commandes, comme suggéré dans d'autres études [4, 16, 60]. L'utilisateur peut ainsi associer des commandes avec différentes parties du corps, si possible en y associant des histoires et des images marquantes [22, 167] pour faciliter leur mémorisation [16]. Chaque partie du corps étant utilisée pour des tâches différentes dans la vie courante, leurs différences sont susceptibles de favoriser la création d'histoires (mémoire *sémantique*).

4.1 INTRODUCTION

Des études antérieures ont montré que la mémoire spatiale et les aides sémantiques peuvent aider les utilisateurs à apprendre et mémoriser des commandes [114, 117, 147]. Ces aides peuvent rendre plus facile et plus agréable l'apprentissage de commandes, tout en permettant aux utilisateurs d'interagir de manière plus efficace et plus fluide. Utiliser des repères spatiaux présents autour d'un utili-

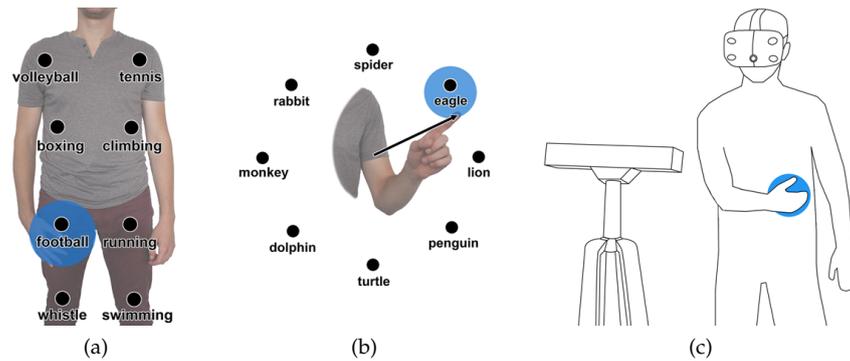


FIGURE 4.1 – (a) En utilisant *BodyLoc*, l'utilisateur sélectionne une commande en touchant une zone de son corps; (b) en utilisant des *Marking menus* "en l'air", l'utilisateur sélectionne une commande en effectuant un geste directionnel devant lui; (c) système de réalité virtuelle couplé avec une Kinect pour détecter les mouvements et le corps de l'utilisateur

sateur peut, par exemple, aider à la création de techniques d'interaction adéquates à des contextes mobiles [114]. De telles techniques seraient particulièrement utiles pour l'interaction mobile ou la réalité virtuelle, qui sont des contextes ne proposant généralement aucun mode expert.

Le corps est doté de repères naturels qui facilitent l'utilisation de la mémoire spatiale et fournissent des aides sémantiques pour aider à mémoriser des commandes (par exemple des grains de beauté ou des taches de naissance [16]) lorsque l'utilisateur interagit sur celui-ci. Dans ce chapitre, nous rapportons la première étude qui, à notre connaissance, compare une technique d'interaction sur le corps, *BodyLoc* (Figure 4.1-a), à une technique plus conventionnelle, en l'occurrence une variation des *Marking menus* "en l'air" [83, 170] (Figure 4.1-b). Tandis que les *Marking menus* utilisent des gestes directionnels, *BodyLoc* utilise des gestes *positionnels* se reposant sur le corps comme surface d'interaction, ce qui peut aider à la rétention d'information pour les raisons mentionnées ci-dessus. Cette étude a été réalisée dans un environnement de réalité virtuelle (Figure 4.1-c), avec pour but de fournir des techniques expertes dans ce contexte, car elles ne nécessitent pas que l'utilisateur voit ses mains lorsqu'il interagit en mode expert.

Dans une première expérience (24 participants), nous comparons l'apprentissage et la rétention d'information pour les deux techniques sur deux jours. Dans une seconde expérience (24 participants différents), nous augmentons les deux techniques avec des *aides sémantiques*. Ces aides sont inspirées des méthodes mnémotechniques telles que la méthode des loci [167] (voir Chapitre 2), qui exploite la mémoire spatiale, *l'imagerie visuelle* [81], et *l'encodage élaboré* de l'information en mémoire [19]. Cette méthode tire donc parti de plusieurs compo-

santes de la mémoire (mémoire spatiale, sémantique, des objets [7]) qui interagissent vraisemblablement entre elles, avec pour effet de renforcer la mémorisation [99, 109]. Sur la base de ces résultats, nous utilisons deux types d'aides sémantiques différents dans cette expérience : (1) la *création d'histoires* et (2) des *images d'arrière-plan*. Dans le premier cas, nous incitons les utilisateurs à créer des histoires pour renforcer l'encodage de l'information [19, 114, 117]. Dans le second cas, nous fournissons des images d'arrière-plan aux utilisateurs pour les aider à créer des histoires, et ainsi évaluer leur impact sur ce processus (Figure 4.1-d).

Nous présentons dans la suite de cette section les deux techniques utilisées, puis les deux expériences évaluant leur qualité en matière d'apprentissage. Nous détaillons ensuite les stratégies utilisées par les participants pour encoder les commandes en mémoire, et discutons les résultats obtenus.

4.2 CONTEXTE

4.2.1 *Méthode des loci et aides sémantiques*

Certaines études suggèrent que combiner plusieurs canaux d'entrée ou différents types de mémoire est susceptible de produire de meilleurs résultats que de se fier uniquement à la mémoire spatiale [7, 99, 109, 114]. Cette hypothèse est également renforcée par des études sur les méthodes mnémoniques, comme indiqué dans le Chapitre 2. Habituellement, ces techniques reposent sur une combinaison de stratégies, qui s'appuient sur plusieurs composantes de la mémoire [7, 117, 167].

La méthode des loci est une méthode mnémonique utilisée depuis l'antiquité pour mémoriser de vastes quantités d'informations [118, 167]. L'utilisateur d'une telle méthode associe des éléments à des repères spatiaux dans un environnement connu, tel que sa maison ou un bâtiment célèbre, pour les mémoriser. Un inconvénient de cette méthode est qu'elle nécessite de créer une image mentale de cet environnement, ce qui demande un entraînement important. Une approche intéressante est d'utiliser l'environnement physique de l'utilisateur, pour qu'il n'ait pas besoin de l'imaginer [114]. En partant du même principe, nous proposons d'utiliser le corps de l'utilisateur comme un "environnement" pour placer des commandes à des endroits précis.

La méthode des loci ne repose pas seulement sur la mémoire *spatiale* mais aussi sur des *images marquantes* et sur l'idée de créer des *histoires* pour améliorer la mémorisation. Les images peuvent être ou non liées à l'environnement, mais doivent être marquantes pour tirer

parti au mieux de la *mémoire des images* [7, 22, 167]. Les histoires fournissent une forme d'aide sémantique car elles s'appuient sur d'autres composantes de la mémoire [7, 109], et impliquent des niveaux plus profonds d'encodage que l'apprentissage incident et parfois visuel [19, 33].

Parce que la plupart des utilisateurs ne sont pas conscients de ces méthodes, il est peu probable qu'ils utilisent spontanément de telles stratégies. Cependant, certains utilisateurs peuvent intuitivement utiliser des stratégies ressemblantes (voir Chapitre 3). Afin d'évaluer dans quelle mesure ces aides sémantiques aident à la mémorisation, nous comparons deux groupes d'utilisateurs à qui sont fournis ou non des aides sémantiques. Ainsi, cette approche nous permet d'évaluer l'impact de ces aides sur la mémorisation de commandes.

4.2.2 Interaction Corporelle

Les systèmes interactifs sont généralement contrôlés par des actions effectuées en utilisant seulement les mains, sans tirer parti du corps entier. Certaines études se sont intéressées à l'interaction corporelle en définissant des zones sur le corps que l'utilisateur peut sélectionner pour déclencher des commandes [4, 60, 158], ou stocker des informations [29]. Ces approches, à l'exception de cette dernière, n'exigent pas que les utilisateurs tiennent un dispositif particulier pour interagir et permettent d'interagir à l'aveugle en exploitant la *proprioception*. Ce dernier point est particulièrement intéressant dans un contexte de réalité virtuelle où l'utilisateur porte un casque opaque, et ne voit pas son corps.

Comme suggéré précédemment, des repères spatiaux naturels sont exploitables sur le corps pour mémoriser des emplacements [16] (par exemple les phalanges [162] ou des tâches de naissance [16]). Des repères spatiaux artificiels peuvent également être attachés à la peau [161, 162], fournissant ainsi une marque tactile et visuelle. L'avant-bras est généralement considéré comme particulièrement approprié pour interagir [92] car il est facile d'accès.

Les interactions sur les épaules, les côtes, et les hanches semblent être les plus adéquates pour interagir sur le corps (en plus des avant-bras) [78, 158]. En s'aidant de repères spatiaux et de la proprioception, des utilisateurs peuvent également interagir avec des interfaces imaginaires (c.à-d. invisibles) [62, 69]. Enfin, il vaut la peine d'indiquer que la peau permet un retour tactile qui est utile [92] en interagissant à l'aveugle.

Malgré les avantages théoriques présentés ci-dessus, seulement quelques études ont étudié formellement les avantages de l'interaction corporelle pour mémoriser des commandes.

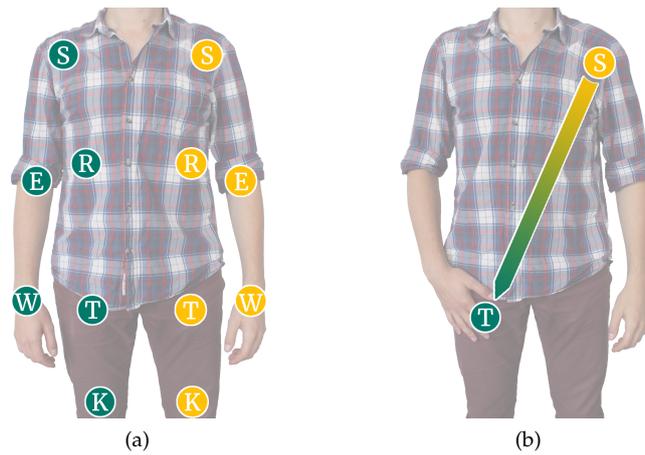


FIGURE 4.2 – (a) Emplacements des zones sur le corps (wrist, elbow, shoulder, ribs, thigh, et knee). (b) Exemple d'une sélection de commande : l'utilisateur sélectionne un menu avec un premier toucher sur une zone, puis la commande qu'il veut avec un deuxième.

4.3 TECHNIQUES D'INTERACTION ET ENVIRONNEMENT VIRTUEL

Nous comparons une variante des *Marking menus* à *BodyLoci* pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les *Marking menus* sont une technique bien connue qui fournit un mode expert efficace, ce qui en fait un bon candidat pour la comparaison. Deuxièmement, ce choix permet une comparaison équitable entre les techniques car elles reposent toutes deux sur des interactions gestuelles, proposent un mode novice et expert, et permettent l'apprentissage incident du mode expert (l'utilisateur effectue des gestes similaires dans les deux modes).

Cependant, tout en partageant quelques similitudes, ces techniques s'appuient sur deux types de gestes différents. Les *Marking menus* utilisent des gestes directionnels, qui peuvent être vus comme des gestes abstraits (ou arbitraires) [165, 168] dans le sens où ils n'impliquent pas d'analogies avec des actions physiques (contrairement, par exemple, aux gestes pincés pour zoomer). En revanche, comme expliqué ci-dessous, *BodyLoci* nécessite des gestes *positionnels* qui peuvent favoriser la mémorisation *spatiale* [4, 16, 60]. Les parties du corps peuvent aussi favoriser la mémoire *sémantique*, car elles ont des fonctions et des caractéristiques diverses (voir les exemples dans la section *stratégies de mémorisation*). Nous souhaitons, avec cette comparaison, voir si l'utilisation de gestes guidés par le *corps*, ou de gestes *abstraites* ferait une différence.

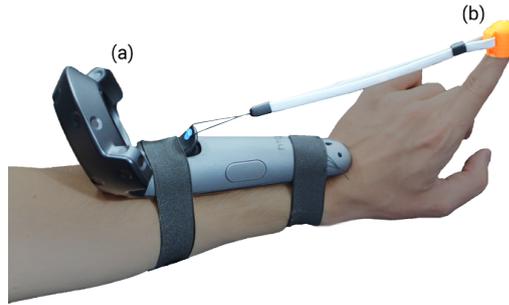


FIGURE 4.3 – Système utilisé pour sélectionner des positions sur le corps à l'aide d'un cliqué. Le contrôleur (a) est attaché au poignet de l'utilisateur et un "dé à coudre" en plastique imprimé en 3D (b) est fixé au bout de son doigt avec une ficelle attachée à la gâchette pour l'actionner.

4.3.1 *Système de réalité virtuelle*

Nous avons utilisé un système HTC Vive [152] au cours de nos expériences. Celui-ci capture en permanence la position du casque et de deux contrôleurs (un pour chaque main) qui permettent à l'utilisateur d'interagir avec le monde virtuel. Chaque contrôleur fournit des boutons (y compris une gâchette) et un pavé tactile circulaire. Nous avons également utilisé un Microsoft Kinect [98] pour capturer le corps de l'utilisateur.

4.3.2 *BodyLoc*

Sur la base d'études antérieures [78, 158], nous avons défini 12 positions sur le corps qui peuvent être sélectionnées (Figure 4.2). Comme une position assise facilite l'accès à certaines zones (p.ex. les genoux), et est susceptible de réduire la fatigue, nous avons mené notre étude dans cette situation. Pour proposer un grand nombre de raccourcis gestuels et privilégier la mémorisation [18], cette technique s'appuie sur des menus hiérarchiques. Une première sélection sélectionne un menu et une seconde sélection une commande à l'intérieur de celui-ci. Les deux sélections sont effectuées en déplaçant la main près de l'emplacement du corps désiré, et en activant un déclencheur dédié (décrit ci-dessous). Au maximum $12 \times 12 = 144$ commandes peuvent être déclenchées.

Validation de la Selection. Pour valider une sélection, nous avons développé une solution simple illustrée à la Figure 4.3. Le contrôleur HTC Vive est attaché à l'avant-bras de l'utilisateur et l'index est inséré dans une sorte de "dé à coudre" (construit à l'aide d'une imprimante 3D) qui est attaché à la gâchette du contrôleur. L'utilisateur peut ainsi activer le déclencheur en fléchissant le doigt. Cette solu-

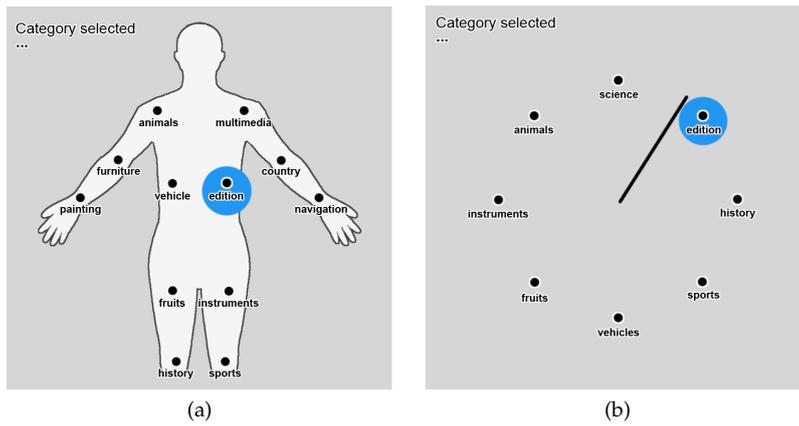


FIGURE 4.4 – Mode novice des deux techniques d'interaction (*BodyLoci-a*, *MarkingMenus-b*). Le menu "edition" est surligné avant que l'utilisateur le sélectionne. Un trait noir représente le mouvement de l'utilisateur.

tion peu coûteuse permet de poser la main sur le corps (ce qui est susceptible d'améliorer la précision [92] ainsi que la mémorisation) et évite de demander à l'utilisateur de tenir un dispositif dans la main. De courtes vibrations sont émises lorsque la main de l'utilisateur est proche d'une position qui peut être sélectionnée sur le corps. Cette fonctionnalité facilite l'interaction et évite les erreurs, car l'utilisateur sait si ses mouvements sont correctement détectés par le système.

Modes Novice et Expert. Les gestes *BodyLoci* peuvent être effectués dans deux modes. En mode novice, une fenêtre flottante affiche le contour d'un corps humain avec les 12 positions sur le corps (Figure 4.4-a). A chaque position est inscrit le nom du menu ou de la commande qui peut être déclenché. Lorsque l'utilisateur approche la main d'une position, celle-ci est mise en évidence par un cercle bleu (Figure 4.4-a). Cette position est sélectionnée en fléchissant le doigt, comme décrit ci-dessus. La première sélection ouvre un menu, et la deuxième déclenche une commande de celui-ci. Le menu est affiché de la même manière que la représentation initiale, avec les noms des commandes situés aux différentes positions que l'utilisateur peut sélectionner. Pour annuler une sélection, l'utilisateur doit lever ses bras pour former un T pendant une seconde.

Le mode novice est déclenché si l'utilisateur reste proche d'une des 12 positions pendant un délai d'au moins une seconde. Sinon, aucune représentation visuelle n'est affichée (mode expert), mais l'utilisateur peut cependant sélectionner les positions et déclencher des commandes.

4.3.3 *Marking Menus "en l'air"*

Nous avons adapté les *Marking menus* pour des interactions "en l'air" : l'utilisateur doit simplement effectuer un geste directionnel devant lui, en déplaçant son bras vers une des huit directions proposées (horizontalement, verticalement ou en diagonale) pour sélectionner l'élément souhaité. Un geste est relatif et peut être exécuté n'importe où, sans avoir besoin de le démarrer à partir d'une position centrale.

Comme avec *BodyLoc*, nous avons utilisé des menus à deux niveaux pour avoir un nombre suffisant de gestes. Au lieu d'utiliser une marque composée d'une succession de sélections [83] nous avons utilisé des marques successives comme au Chapitre 3 [170] : une pour sélectionner un menu et une pour sélectionner une commande de ce menu. Nous avons utilisé des marques droites successives plutôt que des marques "en zigzag" car ce dernier cas semble moins précis dans un contexte d'interaction en 2D [170] et peut être encore plus difficile à effectuer avec précision "en l'air".

Pour effectuer un geste, l'utilisateur doit tenir le contrôleur Vive dans sa main et appuyer sur la gâchette tout en effectuant le geste. Le menu ou la commande désigné est sélectionné lorsque que l'utilisateur relâche la gâchette. Comme avec *BodyLoc*, l'utilisateur peut effectuer le geste rapidement (mode expert) ou attendre un délai d'une seconde pour que le menu apparaisse dans une fenêtre flottante (mode novice), comme le montre la Figure 4.4-b. Le menu ou la commande qui sera sélectionné lorsque la gâchette est relâchée est surligné avec un cercle bleu, et un trait noir est tracé depuis le centre géométrique de la fenêtre flottante pour représenter le mouvement de l'utilisateur. Comme précédemment, le contrôleur émet de courtes vibrations lorsqu'un menu ou une commande peut être sélectionné.

4.4 COMPARAISON DES TECHNIQUES

Notre but dans cette première expérience est de comparer les bénéfices offerts pour la mémorisation de commandes par l'utilisation de positions spatiales sur le corps et de gestes directionnels "en l'air". Nous comparons donc les deux techniques décrites ci-dessus (*BodyLoc* et *MarkingMenus* - facteur TECH). Puisque le corps fournit des repères spatiaux comportant une dimension sémantique, nous supposons que *BodyLoc* amène à de meilleures performances de mémorisation que *MarkingMenus* (H1).

Participants et appareils. Nous avons recruté 24 participants dans nos universités locales. Nos participants étaient âgés de 21 à 41 ans (27 en moyenne) dont 11 femmes. Nous avons réalisé l'expérience en utili-

sant le moteur de jeu Unity [151] avec le système de RV décrit ci-dessus.

Conception et procédure. Nous utilisons un protocole expérimental intra-participants avec comme facteur indépendant $TECH$. Nous faisons varier $TECH$ par blocs en contrebalançant l'ordre de présentation : la moitié des participants commence avec *BodyLocis* et l'autre moitié commence avec *MarkingMenus*.

Comme proposé dans les études précédentes [6, 102, 120, 157], nous utilisons deux sessions séparées par un intervalle de 24 heures (Figure 4.5). La première session est destinée à évaluer la mémoire à moyen terme, et la deuxième la mémoire à long terme. Les sessions sont faites de blocs d'*apprentissage* et de *rappel*. Dans les blocs d'*apprentissage*, les participants peuvent déclencher le mode novice pour apprendre les emplacements des commandes, ou les exécuter plus rapidement en utilisant le mode expert s'ils se souviennent de ces emplacements. Dans les blocs de *rappel*, seul le mode expert est disponible, et on indique seulement aux participants si leur sélection est correcte ou non. La première session consiste en trois paires consécutives de blocs *apprentissage* et *rappel* (nommés $A_1, R_1, A_2, R_2, A_3, R_3$) pour chaque technique (Figure 4.5). La deuxième session est composée d'un bloc de *rappel*, d'un bloc d'*apprentissage* et à nouveau d'un bloc de *rappel* (R_4, A_4, R_5). R_4 sert à évaluer la rétention d'informations après un intervalle de 24 heures, et R_5 avec quelle efficacité les utilisateurs réapprennent les commandes dans chaque condition (Figure 4.5).

Comme expliqué dans la section précédente, les commandes sont organisées dans une hiérarchie à deux niveaux. Comme le concept des *MarkingMenus* est limité à 8 items par niveau pour garder une bonne précision [83], nous supprimons les zones sur les bras de *BodyLocis* ("E" et "W" sur la figure 4.2) pour rendre équitable la comparaison entre les deux techniques.

Le premier niveau de la hiérarchie comprend 8 catégories (4 catégories effectivement utilisées et 4 catégories utilisées comme distracteurs). Chaque catégorie contient 8 éléments liés sémantiquement à cette catégorie (par exemple "pomme" et "orange" dans la catégo-

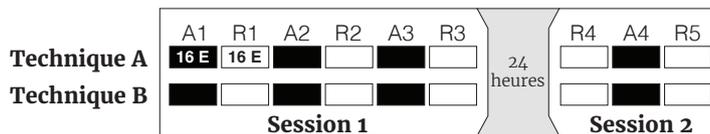


FIGURE 4.5 – Phases d'apprentissage (A) et de rappel (R) effectuées par les participants pour chaque technique sur deux sessions se déroulant sur 2 jours consécutifs. Chaque phase est composée de 16 essais.

ANIMALS	eagle, monkey, turtle, lion dolphin, spider, penguin, rabbit	MULTIMEDIA	eject, volume, play, record shuffle, mute, next, album
EDITION	cut, open, delete, save paste, align, new, find	PAINTING	canvas, line, palette, spray layers, brush, curve, ruler
FRUITS	apple, cherry, melon, orange lemon, kiwi, grape, peach	VEGETABLES	olive, mushroom, pumpkin, eggplant cabbage, artichoke, zucchini, broccoli
SPORTS	tennis, climbing, football, boxing volleyball, swimming, running, whistle	NAVIGATION	traffic, bus, car, orientation walk, direction, hotel, parking
DISTRACTORS	VEHICLES, INSTRUMENTS, HISTORY, SCIENCE	DISTRACTORS	HOUSE, LITERATURE, COUNTRY, GARMENT

FIGURE 4.6 – Les deux ensembles de catégories utilisés pendant les expériences qui consistent en quatre catégories avec des commandes cibles (en gras) et quatre catégories utilisées comme distracteurs.

rie "fruits") de sorte qu'aucune ambiguïté n'est possible lors de la recherche de la catégorie d'une commande. Deux ensembles équivalents de catégories ont été créés pour l'expérience (Figure 4.6).

Les positions des catégories et des commandes dans les catégories sont spécifiées avant l'expérience et sont les mêmes pour tous les participants. Les deux techniques (TECH) et les deux ensembles de catégories sont contrebalancés entre les participants. Pour chaque technique, les participants doivent apprendre la position de 16 commandes (4 commandes à mémoriser dans chacune des 4 catégories non-distracteurs).

Avant la première phase de chaque technique dans les deux sessions (c'est-à-dire A1 ou R4), les participants commencent avec un bloc d'entraînement pour s'y habituer. Pendant l'entraînement, les catégories et les commandes ont des noms abstraits tels que "menu1" et "item13". Le bloc d'entraînement dure jusqu'à ce que les participants se sentent prêts à continuer.

Pour commencer un essai, les participants doivent positionner leur main dominante sur une fenêtre flottante devant eux. Cette fenêtre disparaît ensuite et les participants peuvent voir la commande qu'ils

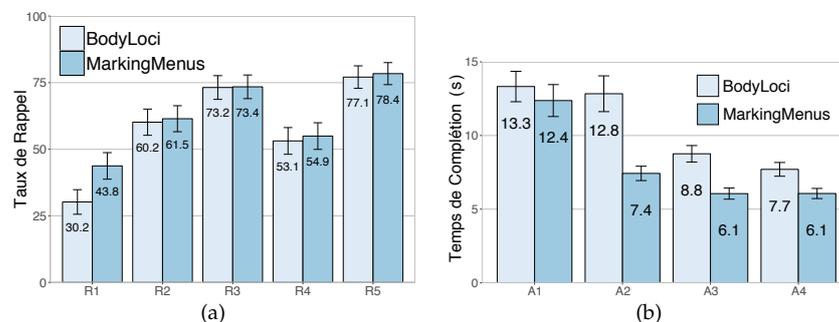


FIGURE 4.7 – Résultats de la première expérience par TECH : (a) taux de rappel pour chaque phase de rappel, (b) temps de complétion d'une tâche pour chaque phase d'apprentissage.

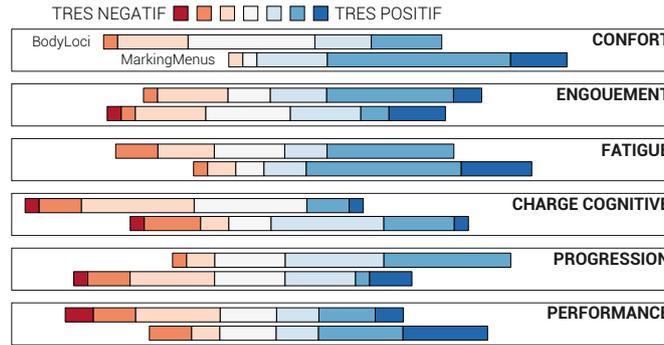


FIGURE 4.8 – Résultats du questionnaire rempli par les participants à l'issue de la première expérience.

doivent sélectionner. Lorsque la bonne catégorie est sélectionnée, un son est joué et le nom de cette catégorie est affiché dans le coin supérieur gauche de la fenêtre flottante où sont représentés les menus (Figure 4.4). Lorsqu'une commande est sélectionnée, un autre son est joué et l'arrière plan de la fenêtre flottante devient temporairement vert ou rouge pour indiquer si la sélection est correcte ou non.

La première session dure environ 1 heure et la deuxième session 30 minutes. La première session se termine avec un questionnaire et la deuxième session avec un entretien. Le but de cet entretien est de comprendre comment les participants mémorisent les commandes et quelles stratégies ils élaborent pour mémoriser.

4.4.1 Résultats

Pour analyser statistiquement les résultats obtenus, nous utilisons des tests t [143], reportons la taille de l'effet d de Cohen, et indiquons des intervalles de confiance à 95% sur nos graphiques. Nous comparons d'abord les taux de rappel pour les deux techniques. La Figure 4.7-a montre que *MarkingMenus* et *BodyLoci* produisent des performances comparables pour chaque phase, sauf dans la première phase où *MarkingMenus* est meilleur. La différence de performance est significative pour R1 ($p = 0.023$, $d = 0.57$), mais pas pour les phases R2 à R5 (tous p 's > 0.70). Ainsi, l'hypothèse (H1) n'est pas supportée par nos résultats.

Sauf pour la première phase d'apprentissage (A1, Figure 4.7-b), le temps moyen d'un essai dans les phases d'apprentissage est significativement plus élevé pour *BodyLoci* que *MarkingMenus* (tous p 's < 0.002 et $d > 0.72$, mais $p = 0.41$ pour A1). La différence est particulièrement importante pour la deuxième phase (A2) et ne peut pas être uniquement expliquée par un temps d'exécution plus long de *BodyLoci*¹.

1. Le temps d'exécution d'un geste est d'environ 4 s pour les *MarkingMenus* et 5 s pour *BodyLoci*, qui nécessite des mouvements plus amples.

Cependant, les deux résultats ont pu être affectés par le fait que les utilisateurs avaient besoin de temps pour maîtriser cette nouvelle technique non conventionnelle, surtout au début de l'expérience (par exemple, la différence de temps entre les techniques pour R1 est deux fois supérieure à cette même différence pour R5). En comparaison, les *MarkingMenus* sont plus proches des interfaces utilisateur conventionnelles, que les participants utilisent depuis des années. Cette explication est également appuyée par les entretiens des participants (voir ci-dessous).

Résultats subjectifs. À la fin de la première session, les participants ont été invités à remplir un questionnaire. Nous avons analysé ces résultats à l'aide de tests t non paramétriques. Tout d'abord, les participants devaient indiquer quelle technique ils préféraient (avec la possibilité de ne pas avoir de préférence). Globalement, 58,3% préféraient utiliser *MarkingMenus* et 20,8% *BodyLoc*. Cette différence est significative ($p = 0.04$), et la plupart des participants ont trouvé *MarkingMenus* facile à manipuler et plus proche des interactions classiques (c.à-d. du pointage).

Le reste du questionnaire était composé d'échelles de Likert à 7 niveaux avec des questions sur le *confort*, l'*engouement*, la *fatigue*, et la *charge cognitive* (Figure 4.8). Nous avons également demandé aux participants d'évaluer leur *performance* lors de la dernière phase de rappel et leur *progression* entre la première et dernière phase de rappel (Figure 4.8). Nous avons trouvé que les *MarkingMenus* étaient significativement plus *confortables* ($p < 0.01$), moins *fatiguants* ($p = 0.01$), et qu'ils semblaient mener à de meilleurs taux de rappel ($p = 0.02$).² Une tendance a été observée en faveur des *MarkingMenus* pour la *progression* ($p = 0.08$) et la *charge cognitive* ($p = 0.06$). Cette dernière tendance soutient l'hypothèse que la technique d'interaction sur le corps nécessite plus d'attention que les *MarkingMenus*, vraisemblablement parce que les participants n'étaient pas habitués à cette façon d'interagir.

Enfin, nous avons demandé aux participants s'ils utiliseraient *BodyLoc* sans les contraintes du système utilisé pendant l'expérience. Pour cette question, nous avons utilisé une échelle de Likert avec des niveaux allant de 1-"Complètement en désaccord" à 7-"Complètement d'accord". Les réponses étaient positives (médiane = 5,5) avec des justifications mixtes. Certains participants ont vu dans cette technique un moyen de se débarrasser des télécommandes ("c'est pratique et il n'y a pas besoin d'équipement spécial pour ça" p12), ou l'ont trouvé commode dans le cas où "les mains sont occupées [et] on peut activer une commande avec un avant-bras sur la poitrine" (p11). Un participant qui était en désaccord a précisé : "Je trouve contre-intuitif et difficile d'associer plusieurs fonctions pour chaque zone du corps" (p17).

2. nous utilisons ici des tests de Wilcoxon [163] non paramétriques.

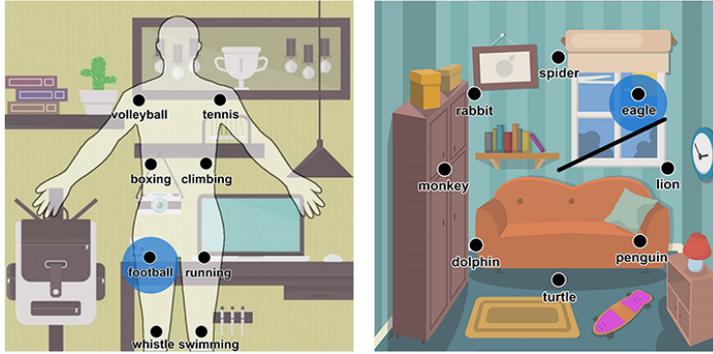


FIGURE 4.9 – Images d’arrière-plan utilisées au cours de la deuxième expérience dans la condition *Histoires+Images*.

4.5 IMPACT DES AIDES SÉMANTIQUES

Les utilisateurs peuvent mémoriser un grand nombre d’éléments relativement facilement sur le long terme [22, 93] lorsqu’ils disposent de stratégies adéquates (p.ex. des méthodes mnémotechniques). Puisque les utilisateurs peuvent être créatifs lorsqu’on leur demande explicitement de créer des histoires [34], mais qu’ils ne le font pas spontanément, nous proposons aux utilisateurs, au cours d’une deuxième expérience, de créer des moyens mnémotechniques. Cette deuxième expérience utilise le même protocole expérimental que la première. Nous nous concentrons particulièrement cette fois sur l’effet que des *aides sémantiques* peuvent apporter à la mémorisation de commandes. Il est important de souligner que, bien que nous n’ayons donné aucune indication aux participants de l’expérience précédente, dans cette expérience nous les informons explicitement que ces aides peuvent améliorer la mémorisation.

Nous utilisons deux types d’aides sémantiques, *Histoires* et *Histoires+Images* (facteur AIDES) :

1. *Histoires* : nous demandons aux participants de créer des histoires à partir des couples commande et position dont ils doivent se souvenir. Nous les aidons avec des exemples tels que "si *fusée* est la commande en haut des *MarkingMenus*, imaginez que vous la lancez" ou "si la commande *camera* est sur votre épaule, imaginez que vous filmez une vidéo avec".
2. *Histoires+Images* : nous utilisons les mêmes instructions qu’avec le groupe *Histoires* et ajoutons une *image d’arrière-plan* aux représentations graphiques des menus en mode novice (Figure 4.9) afin d’aider les utilisateurs à créer ces histoires en leur proposant des images marquantes [22].

Nous faisons l’hypothèse que les participants de cette expérience (contexte *Aides*) vont arriver à des meilleurs taux de rappel que les participants de la première expérience (contexte *Base*) (H2), et aussi

que les participants aidés avec des images (*Histoires+Images*) arrivent à de meilleurs résultats que ceux qui sont seulement chargés de créer des histoires (*Histoires*) (H₃).

Conception et procédure. Nous faisons varier TECH par blocs entre les participants, contrebalançant l'ordre de présentation comme dans la première expérience en faisant de AIDES un facteur inter-sujet pour éviter un transfert de *Histoires+Images* à *Histoires*.

En d'autres termes, nous reproduisons la première expérience avec la moitié des participants faisant partie du groupe *Histoires*, et l'autre moitié du groupe *Histoires+Images*. Nous utilisons la même procédure que dans la première expérience et les séances durent le même temps.

4.5.1 Résultats

Afin de comparer les conditions de notre protocole inter-sujets, nous effectuons des tests t non appariés. La figure 4.10-a montre les taux de rappel des groupes *Histoires* et *Histoires+Images*. Nous pouvons observer qu'ils sont très proches dans toutes les phases (pas de différences significatives, $p's > 0.48$). C'est aussi le cas pour chaque technique prise seule ($p's > 0.20$, la plupart d'entre elles étant grandes). En d'autres termes, nous n'avons aucune interaction entre AIDES et TECH. En ce qui concerne les temps de complétion des tâches en phase d'apprentissage (voir Figure 4.10-b), ils sont également très proches sauf pour A1 ($p = 0.026$, $d = 0.97$; $p's > 0,6$ pour A2-A4). Cette différence suggère que l'utilisation d'*images* aide à initier la création d'histoires. Ainsi, globalement, nos résultats ne supportent pas (H₃) : les *images d'arrière-plan* (utilisées en plus des *histoires*) peuvent aider au début du processus de mémorisation, mais ne semblent pas améliorer significativement la mémorisation par la suite.

Comme *Histoires* et *Histoires+Images* conduisent à des résultats très similaires, nous comparons maintenant la première et la seconde ex-

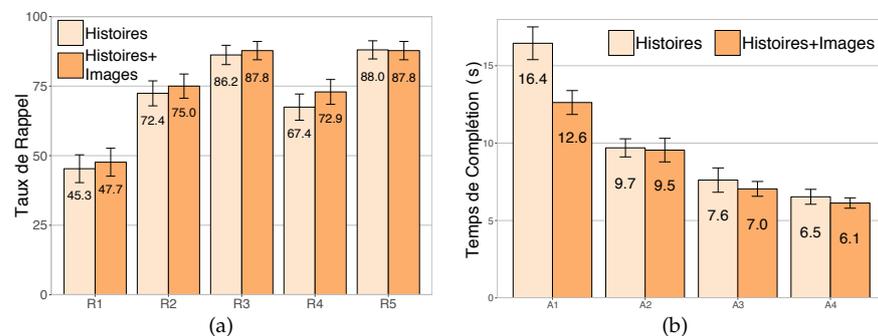


FIGURE 4.10 – Résultats de la deuxième expérience par AIDES : (a) taux de rappel pour chaque phase de rappel, (b) temps de complétion des tâches pour chaque phase d'apprentissage.

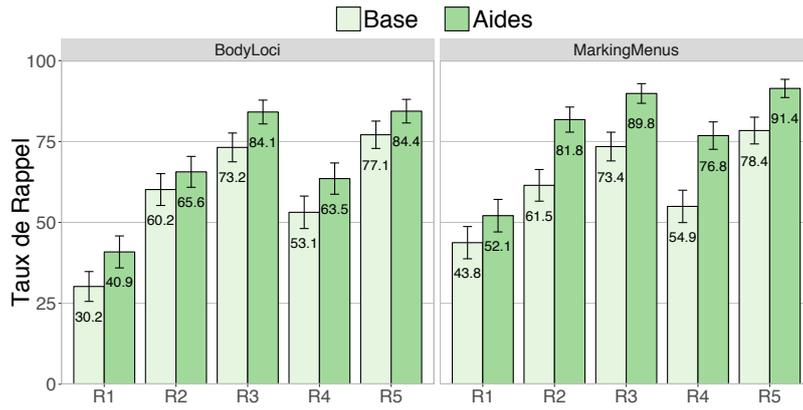


FIGURE 4.11 – Comparaison des taux de rappel obtenus à l’aide des TECH au cours des deux expériences (*Base* et *Aides*).

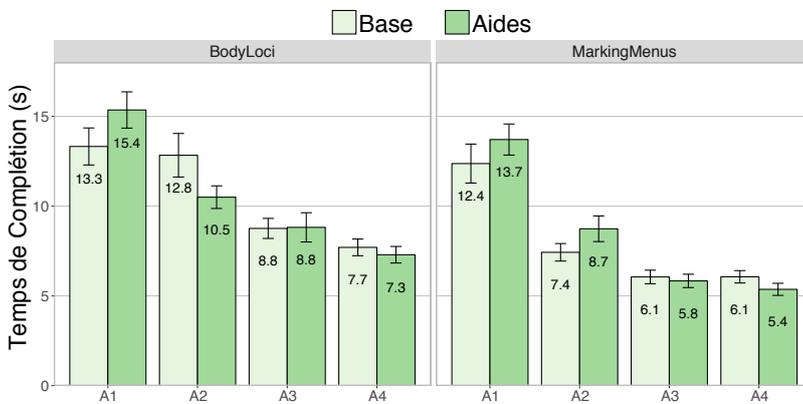


FIGURE 4.12 – Comparaison des temps moyens de complétion de tâche dans les phases d’apprentissage pour chaque TECH dans les deux expériences (*Base* et *Aides*).

périence (à savoir, *Base* vs *Aides*, deux groupes de 24 participants). La Figure 4.11 et la Figure 4.12 montrent les résultats par TECH. Premièrement, le taux de rappel global est significativement plus élevé pour *Aides* que pour *Base* pour toutes les phases, à part R1 (de R1 à R5 : $p = 0.116$; $p = 0.027$, $d = 0.66$; $p = 0.014$, $d = 0.74$; $p = 0.015$, $d = 0.73$; $p = 0.025$, $d = 0.67$). De plus, il n’y a pas de différences significatives dans le temps de complétion des tâches pour les phases d’apprentissage, même en comparant par TECH (p 's > 0.19). Nos résultats supportent donc (H2).

Plus précisément, comme on peut le voir sur la figure 4.11, il y a une interaction avec TECH sur le taux de rappel : les différences entre *Aides* et *Base* sont plus importantes pour *MarkingMenus* que pour *BodyLoc*. En fait, les différences ne sont pas significatives pour *BodyLoc* et ne montrent que des tendances pour R1 et R3 ($p = 0.097$, $p = 0.423$, $p = 0.076$, $p = 0.184$, $p = 0.145$). En revanche, toutes les différences sont significatives et grandes pour *MarkingMenus* sauf pour R1 ($p = 0.328$;

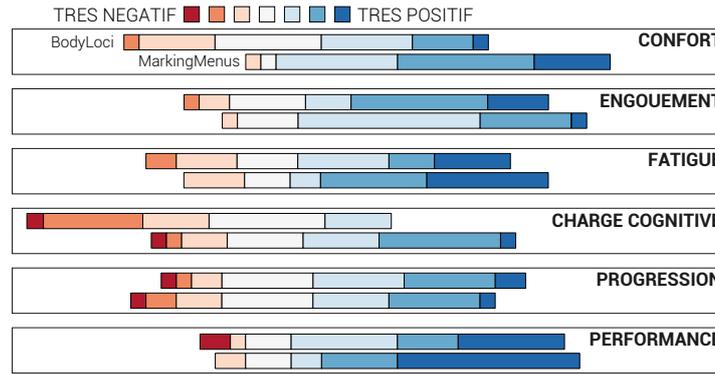


FIGURE 4.13 – Résultats du questionnaire rempli par les participants à l'issue de la deuxième expérience.

$p = 0.006$, $d = 0.83$; $p = 0.014$, $d = 0.74$; $p = 0.002$, $d = 0.94$; $p = 0.011$, $d = 0.77$). On peut par exemple souligner une amélioration de 18,3% pour R3 et de 28,5% pour la phase de rétention R4. Ainsi, inciter les utilisateurs à créer des *histoires* améliore considérablement la mémorisation avec les *MarkingMenus*, et des tendances suggèrent que *BodyLoci* bénéficie également de cette aide mnémotechnique.

Participants et appareils. Nous avons recruté 24 nouveaux participants dans nos universités. Nous avons une population âgée de 20 à 49 ans (27 en moyenne) comptant 7 femmes. Nous avons utilisé le même dispositif expérimental que dans la première expérience.

En accord avec le résultat précédent, les *MarkingMenus* ont obtenu de meilleurs résultats que *BodyLoci* dans cette seconde expérience (Figure 4.11). Les différences sont significatives pour R2 ($p = 0.009$, $d = 0.73$) et, chose intéressante, pour R4, la phase de rétention ($p = 0.012$, $d = 0.60$) et R5 ($p = 0.027$, $d = 0.51$), mais pas pour R3 ($p = 0.160$). En ce qui concerne les temps de complétion des tâches en phase d'apprentissage, les participants ont pris beaucoup plus de temps avec *BodyLoci* qu'avec *MarkingMenus* (tous p 's < 0.001), avec des différences de 2 s dans toutes les phases (voir les barres "sémantique" dans la figure 4.12). Cette différence dans le temps est similaire à ce qui a été observé dans la première expérience et peut vraisemblablement s'expliquer par la même raison (comme la seconde expérience impliquait des participants différents, ils avaient besoin de temps pour maîtriser *BodyLoci*).

Résultats subjectifs. Pour cette étude, 58,3% des participants préféraient utiliser *MarkingMenus*, et 33,3% *BodyLoci* ($p = 0,21$) (au lieu de 58,3% contre 20,8% dans l'expérience précédente). Les résultats sont représentés sur la figure 4.13. Les *MarkingMenus* ont de nouveau été préférés sur plusieurs aspects (*confort* $p < 0.01$; *charge cognitive* $p < 0.01$). Les différences pour les autres aspects ont révélé certaines tendances en accord avec l'expérience précédente (*fatigue* $p = 0.08$,

performance $p = 0.09$, *progression* $p = 0.09$). Cependant, les participants ont mieux apprécié *BodyLoc*i que dans l'expérience précédente, bien qu'ils aient été plus efficaces avec les *MarkingMenus* (ce qui n'était pas le cas dans l'expérience précédente). Il est possible que les aides sémantiques aient rendu l'utilisation de *BodyLoc*i plus agréable.

Nous avons également demandé aux participants s'ils aimeraient utiliser *BodyLoc*i. La plupart des participants ont montré de l'intérêt envers cette technique (médiane=5,5 sur une échelle de Likert à 7 niveaux), mais d'autres ont eu des sentiments mitigés. Par exemple, un participant a rapporté "je trouve cette façon de mémoriser intuitive" (p2), mais un autre a dit "je ne me vois pas utiliser cette technique en dehors d'un contexte de jeu vidéo" (P14).

4.6 DISCUSSION ET CONCLUSION

4.6.1 Stratégies de mémorisation

À la fin de chaque expérience, nous avons interrogé les participants sur les stratégies qu'ils ont élaborées. Plus précisément, nous leur avons posé les questions suivantes : (1) *quelles stratégies avez-vous utilisées pour mémoriser les commandes*, (2) *avez-vous changé de stratégies au cours de l'expérience* et (3) *avez-vous trouvé certaines commandes ou catégories plus faciles à mémoriser que d'autres*. Les résultats (résumés dans le tableau 4.1) montrent des tendances similaires entre les participants et ne semblent pas dépendre des techniques d'interaction (pas de différences claires trouvées). Nous listons les principales stratégies ci-dessous.

Groupement de Commandes. Plus de deux tiers des participants (67 % pour Exp. 1 ; 71 % pour Exp. 2) ont créé des groupes de commandes, qui pouvaient inclure un couple de commandes (par exemple "l'aigle vole au-dessus du singe" Exp1-P2) ou toutes les commandes composant une catégorie (par exemple "les positions des commandes formaient un schéma et je répétais leurs noms en séquence pour me les rappeler" Exp1-P7).

Imagerie Mentale. Plus de la moitié des participants (58% ; 58%) ont appris les commandes en les visualisant (par exemple "j'imaginai le lion m'attaquer les côtes" Exp2-P15) ou en mémorisant les schémas des positions des commandes affichées sur l'interface (comme observé dans le Chapitre 3). D'un autre côté, 29% ont signalé avoir des difficultés à mémoriser des commandes abstraites, principalement dans la catégorie "Edition". Cela variait selon les participants car ils étaient plus ou moins familiers avec les différentes commandes, en fonction de leurs antécédents.

TABLEAU 4.1 – Stratégies de mémorisation adoptées par les participants au cours des deux expériences (e1, e2).

Stratégie	Définition	Exemple	Participant (e1, e2)
Groupement	<i>Création de groupe de commandes [99]</i>	"l'aigle vole au-dessus du singe" (e1-p2)	69% (67%, 71%)
Imagerie Mentale	<i>Utilisation d'images mentales pour se souvenir des commandes [81]</i>	"je peins avec la palette dans ma main gauche" (e2-p13)	58% (58%, 58%)
Mémorisation Gestuelle	<i>Mémorisation des gestes effectués pour déclencher les commandes</i>	"je coupe quelque chose pour atteindre la commande" (e1-p17)	40% (33%, 46%)
Positions Remarquables	<i>S'appuyer sur des positions/directions similaires ou opposées à la catégorie</i>	"deux fois dans la même direction pour sélectionner sport et boxe" (e1-p12)	35% (33%, 38%)

Mémorisation Gestuelle. Avec moins de cohérence, 40% des participants (33% ; 46%) se souvenaient des *gestes* effectués pour mémoriser les catégories et les commandes. Certains d'entre eux trouvaient que les gestes leur venaient à l'esprit «automatiquement» lorsqu'il leur était demandé de sélectionner certaines commandes. Les gestes demandant plus d'efforts semblaient être mieux mémorisés (par exemple "*play* était particulièrement ennuyeux car je devais faire beaucoup d'efforts pour l'atteindre" Exp1-P2), comme remarqué dans des travaux précédents (par exemple [31]).

Positions Remarquables. La position des commandes était une autre caractéristique importante : 35% des participants (33% ; 38%) ont dit qu'une commande était plus facile à se rappeler si elle était à la même position que sa catégorie (ou vers la direction opposée avec *MarkingMenus*). En outre, environ 17% des participants (4% ; 29%) regroupaient des commandes sémantiquement indépendantes, mais situées à proximité (par exemple, "le *singe* est sur le sac en train de jouer avec des *oranges*" Exp2-P19).

Enfin, nous avons demandé aux participants de décrire comment ils ont utilisé les images d'arrière-plan. Parmi les 12 participants à qui elles étaient fournies, 7 d'entre eux ont déclaré les avoir utilisées avec les *MarkingMenus*, mais seulement 2 avec *BodyLocis*. Certains participants n'ont pas prêté attention aux images ou les ont perçues comme un arrière-plan décoratif (malgré nos instructions). Les autres participants ont pris en compte la couleur ("le *singe* a la même couleur que le *placard*" Exp2-P1) ou la forme ("le *cactus* a la forme d'un *spray*" Exp2-P15). Une autre stratégie courante consistait à relier sémantiquement les commandes et les images d'arrière plan (p.ex. "*ouvrir la fenêtre*" Ex2-P1 et "le *champignon* pousse dans la *forêt* à l'extérieur" Exp2-P8).

4.6.2 Discussion

Notre étude compare d'une part deux types de gestes pour mémoriser des commandes, et d'autre part l'impact qu'ont différents types d'aides sémantiques. Les gestes évalués sont soit positionnels en utilisant le corps de l'utilisateur comme surface d'interaction, soit directionnels "en l'air". Dans l'ensemble, cette étude fournit des résultats comparatifs impliquant des interactions corporelles et des aides sémantiques, ce qui est rare ou même absent de la littérature. Le résultat le plus intéressant de cette étude est qu'une instruction simple incitant les utilisateurs à créer des *histoires* a considérablement amélioré leurs taux de rappel : jusqu'à 13,1% pour BodyLoci et 28,5% pour les *Marking menus*. Ce résultat suggère que fournir des indices pour guider les utilisateurs à mémoriser des gestes lorsqu'ils utilisent une interface utilisateur pourrait les aider à mémoriser sur le long terme. Cependant, la façon dont ces indices peuvent être fournis dans un cas d'utilisation réel (p.ex. notifications textuelles) est une question complexe qui mériterait des études approfondies.

Un autre résultat remarquable est l'efficacité des *Marking menus* et le fait qu'ils aient davantage bénéficié des aides sémantiques que BodyLoci. Alors que les *Marking menus* sont souvent présentés comme très efficaces, peu d'études ont réellement évalué leur performance en matière de *mémorisation* (à notre connaissance [9, 114], mais dans des cas spécifiques). Cette étude confirme leur efficacité (par exemple 73,4% sans aides et 89,8% avec aides sémantiques après seulement 3 phases d'apprentissage). L'avantage supplémentaire des aides sémantiques suggère que cette technique reposant sur des gestes "abstraits" bénéficie fortement de l'association avec des concepts concrets (par exemple l'*imagerie mentale* [81, 108] a été utilisée par 40% des participants).

BodyLoci a obtenu des performances similaires à celles des *Marking menus* sans aides, ce qui montre également l'efficacité de cette technique. Cependant, contrairement à notre hypothèse H₁, elle ne les surpasse pas. Comme indiqué précédemment, BodyLoci a sans doute été entravé par sa nouveauté. Il a fallu plus d'efforts aux participants pour effectuer des sélections que pour les *Marking menus*, particulièrement au début de chaque expérience, car les utilisateurs devaient maîtriser cette façon non conventionnelle d'interagir. Cela peut aussi expliquer pourquoi les participants préféraient généralement les *Marking menus* (bien qu'ils aient aussi principalement dit qu'ils aimeraient utiliser BodyLoci). Cependant, les résultats peuvent être différents sur le long terme. Les *Marking menus* sont assez similaires aux interfaces utilisateur communes, que les participants utilisent depuis des années. Il serait donc intéressant de mener une étude plus longue pour

évaluer les performances de BodyLocI contrôlé par des utilisateurs experts.

Le fait que les aides sémantiques aient moins d'effet avec BodyLocI qu'avec les *Marking menus* peut s'expliquer par la raison précédente : en raison d'une charge cognitive plus élevée, l'utilisation efficace de ces aides peut avoir été plus difficile pour les utilisateurs (par exemple, certains utilisateurs n'ont même pas remarqué les images de fond, en particulier lors de l'utilisation de BodyLocI). Une autre explication possible est que ces aides peuvent être partiellement redondantes lors de l'utilisation de BodyLocI car les parties du corps évoquent des informations sémantiques que les utilisateurs peuvent utiliser spontanément, contrairement aux *Marking menus* qui reposent sur des gestes abstraits.

Enfin, l'ajout d'images d'arrière-plan n'a pas apporté d'améliorations notables, peut-être parce que les participants utilisaient déjà l'imagerie mentale ou se concentraient sur la tâche de sélection des commandes. En conséquence, ils peuvent avoir été surchargés d'informations [48, 100], ou simplement avoir considéré les images comme une décoration (comme mentionné lors des entretiens), un problème connu sous le nom d'*attention sélective* [23, 87].

4.6.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la première étude de mémorisation à notre connaissance qui compare une technique d'interaction corporelle à une technique conventionnelle. Une première expérience impliquant 24 participants a montré l'efficacité des deux techniques, c'est à dire l'utilisation de gestes *positionnels* ou *directionnels*, sur la mémorisation de commandes. Alors que l'interaction corporelle est soupçonnée favoriser spécifiquement la mémorisation, les deux techniques ont mené à des résultats comparables.

Une seconde expérience basée sur le même protocole expérimental a permis d'évaluer différents types d'aides sémantiques (créer des histoires tout en mémorisant des commandes, avec ou sans images en arrière-plan). La comparaison des taux de rappel pour 24 autres participants n'a montré aucune amélioration en fournissant aux utilisateurs des images d'arrière-plan pour créer les histoires. Cependant, la comparaison des deux expériences a montré que suggérer aux utilisateurs de créer des histoires améliore considérablement leurs performances. Ce bénéfice est particulièrement important pour la phase de rétention (24 heures après l'apprentissage) en utilisant les *Marking menus*, avec une amélioration de 28,5%.

Les résultats des entretiens menés après chaque expérience nous ont permis de classer les stratégies de mémorisation élaborées par les

participants (groupement de commandes, imagerie visuelle, mémorisation gestuelle, etc.). Nous espérons que l'explicitation de ces stratégies peut fournir des lignes directrices pour concevoir des techniques qui facilitent la création de moyens mnémoniques, un défi intéressant pour les travaux futurs.

À l'avenir, nous aimerions mieux comprendre le potentiel de BodyLoci. Premièrement, nous avons effectué nos évaluations auprès d'utilisateurs novices, l'influence de l'expertise de l'utilisateur sur les résultats obtenus est donc encore floue. Deuxièmement, la mémoire procédurale [134] est théoriquement impliquée lors de l'exécution de gestes, ce qui pourrait expliquer le rappel "automatique" de certains gestes rapportés par quelques participants. Cependant, de plus longues évaluations sont nécessaires pour évaluer son impact réel sur le processus de mémorisation. Notre étude était une première étape dans la comparaison de l'interaction corporelle à d'autres techniques d'interaction, mais le potentiel de cette approche en matière de mémorisation nécessite des études plus approfondies.

Nous avons abordé dans cette première partie des questions relatives à la *mémorisation de commandes*. Nous avons dans un premier temps élaboré une revue de la littérature (Chapitre 2), puis nous sommes intéressés dans les deux chapitres suivants (Chapitre 3-4) à l'apprentissage de gestes, et particulièrement aux gestes *positionnels* (c.à-d. pointage) et *directionnels*. Nous synthétisons ci-dessous les contributions de ces chapitres.

Etat de l'art. La revue de la littérature exposée dans le Chapitre 2 présente différents raccourcis pour déclencher des commandes rapidement, ainsi que les composantes de la mémoire impliquées dans cet apprentissage. Un point important soulevé par cette revue est que jusqu'à présent, relativement peu d'études en IHM se sont intéressées à l'apprentissage de raccourcis. Ces études font défaut car cet apprentissage est nécessaire pour pouvoir utiliser un système interactif de façon experte, c'est à dire se rappeler des actions passées pour les effectuer plus rapidement.

Modalités d'Interaction. Nous avons présenté dans les Chapitres 3 et 4 deux études comparant l'apprentissage de *positions* et de *directions* pour mémoriser des commandes dans deux contextes différents. Sur interface mobile, les deux modalités ont amené à des taux de rappel élevés et comparables ($\approx 83\%$ à la fin du deuxième jour), bien que les *positions* aient montré des avantages non-négligeables sur l'effort cognitif et la rapidité d'apprentissage. Dans un contexte de sélection de commandes en 3D, la comparaison de gestes *positionnels* sur le corps de l'utilisateur et de gestes *directionnels* devant lui a de nouveau montré que ces modalités amènent à des taux de rappel élevés et comparables ($\approx 78\%$ à la fin du deuxième jour), mais cette fois les gestes *directionnels* demandaient moins d'efforts que les gestes *positionnels* sur le corps. Cette différence peut s'expliquer par le fait qu'utiliser le corps comme surface d'interaction pour sélectionner des *positions* est une méthode moins conventionnelle que les utilisateurs ont eu du mal à maîtriser de premier abord.

Une conclusion importante que l'on peut tirer des deux études réalisées, est qu'utiliser des gestes *positionnels* ou des gestes *directionnels* permet d'atteindre des performances élevées en matière de mémorisation. Nous n'avons pas observé de différences concernant les taux de rappel entre ces deux modalités au cours de nos études, sauf lorsque des *aides sémantiques* étaient utilisées. Ceci montre leur intérêt pour la sélection de commandes, d'autant plus qu'elles permettent des interactions relativement simples, comme le montre nos études impliquant des utilisateurs novices qui n'ont pas eu de mal à les maîtriser. Pour faciliter la mémorisation de commandes et proposer un grand

nombre de gestes simples, nous proposons de combiner ces modalités dans la deuxième partie de cette thèse pour concevoir des techniques d'interaction gestuelle efficaces.

Aides Sémantiques. Deux résultats principaux de la deuxième étude (Chapitre 4) sont à mettre en évidence. Tout d'abord, de simples instructions demandant aux utilisateurs de créer des histoires (c.à-d. des moyens mnémoniques) les ont aidé à améliorer leurs performances en matière de mémorisation (p.ex. améliorations maximales de 13.1% pour les *positions* et 28.3% pour les *directions*). Ceci indique que des utilisateurs novices bénéficient de ces moyens mnémoniques mais qu'ils ne les utilisent pas tous spontanément. Ensuite, malgré ce que l'on pourrait penser [109], utiliser des images pour aider les utilisateurs à créer des moyens mnémoniques ne s'est pas révélé être un moyen efficace dans notre étude. Ces deux résultats suggèrent que non seulement les utilisateurs ont juste besoin d'être avertis pour mieux mémoriser un ensemble de commandes, mais aussi qu'un surplus d'information visuelle risque de surcharger leur canal visuel et n'apportera donc pas d'aides supplémentaires. Une autre explication au manque d'efficacité des images est que celles-ci n'étaient peut-être pas assez *marquantes* pour être bien mémorisées par les utilisateurs.

Stratégies Elaborées. A partir d'entretiens réalisés au cours de ces études, nous avons pu recueillir les stratégies élaborées par les utilisateurs pour mémoriser des commandes. Une catégorisation de cet ensemble de stratégies a dévoilé que plusieurs d'entre elles sont des méthodes efficaces, dont certaines connues en psychologie [8, 99]. Ce qu'il est important de remarquer, est que les utilisateurs ont spontanément adopté ces stratégies, sans être guidés. En se basant sur ces moyens mnémoniques, nous avons proposé quelques améliorations à apporter aux interfaces graphiques actuelles pour faciliter la mémorisation de commandes. Les principaux axes que nous avons abordé sont le groupement de commandes (par paires ou par groupes plus grands, voir Chapitre 3), l'association de commandes abstraites à des concepts concrets (Chapitre 3), et l'utilisation d'instructions intelligentes (p.ex. sous forme de notifications textuelles) pour proposer aux utilisateurs de créer des moyens mnémotechniques (Chapitre 4). Des études plus poussées sont cependant nécessaires pour vérifier l'utilité de telles aides.

PARTIE II

TECHNIQUES D'INTERACTION ADAPTÉES À
L'ACTIVATION DE GRANDS ENSEMBLES DE COMMANDES

INTERACTIONS GESTUELLES ADAPTÉES AUX GRANDS ENSEMBLES DE COMMANDES

Les gestes offrent un moyen efficace de sélectionner des commandes rapidement pour contrôler un système interactif. Actuellement la plupart des systèmes utilisent des interactions et des contrôleurs qui leur sont propres ce qui contraint les utilisateurs à s'adapter à chacun d'entre eux. De plus, pour naviguer d'un système à l'autre, l'utilisateur a besoin d'avoir les bons contrôleurs à proximité, et de pouvoir les manipuler facilement (c.à-d. ne pas avoir à en changer). Par exemple un utilisateur voulant utiliser une télévision, puis changer la température d'une maison intelligente, le tout en utilisant un système de réalité augmentée en parallèle, se retrouverait certainement dans ce cas là. Proposer un grand ensemble de gestes cohérents qui peuvent être effectués sur un seul dispositif interactif offre une solution à ce problème. L'utilisation d'un petit dispositif unique que l'utilisateur peut porter facilement, comme une montre intelligente sur son poignet (voir le Chapitre 7), a l'avantage de ne pas contraindre sa mobilité tout en lui permettant d'activer de grands ensembles de commandes.

Il existe un compromis avec la plupart des techniques d'interaction gestuelles entre le nombre de gestes possibles à effectuer avec précision, et le nombre de gestes proposés à l'utilisateur. Ce compromis est observable dans plusieurs études effectuées sur les *Marking menus* [83] ou ses variantes [169, 172], dans lesquelles la précision des utilisateurs diminue quand le nombre de sous menus augmente. Un moyen simple pour faciliter la tâche des utilisateurs est d'utiliser des guides non obstrusifs pour améliorer leur précision. Ces guides peuvent prendre plusieurs formes et être *passifs* ou *dynamiques*. Des marques visuelles ou tactiles comme le contour d'une surface d'interaction (p.ex. le contour d'un pavé tactile), sont des guides passifs sur lesquels peut se reposer l'utilisateur. Des vibrations peuvent être utilisées comme rétroactions et ainsi aider l'utilisateur dynamiquement en s'adaptant en temps réel à ses mouvements.

Nous présentons dans ce chapitre une seconde revue de la littérature focalisée cette fois sur les techniques d'interaction adaptées à un grand nombre de commandes. Dans un premier temps, nous nous intéressons aux caractéristiques de l'interaction gestuelle qui peuvent être utiles dans ce contexte. Nous discutons ensuite de plusieurs fa-

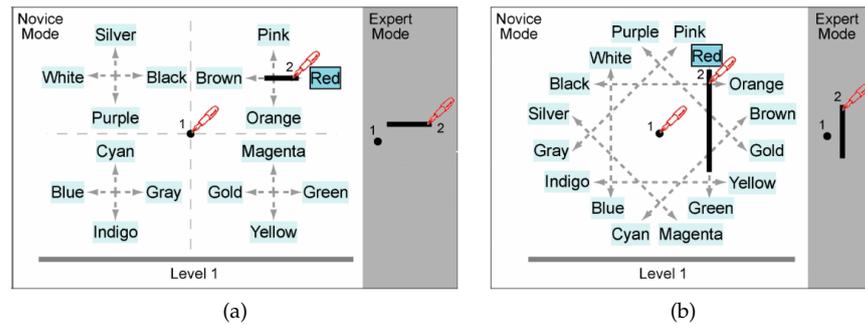


FIGURE 5.1 – Les *Zone* (a) et *Polygon* (b) menus différencient des gestes directionnels par leurs positions de départ (source [169]).

çons de guider des utilisateurs pour les aider à effectuer de grands ensembles de gestes.

5.1 INTERACTIONS GESTUELLES

Les raccourcis gestuels ont déjà été introduits dans le Chapitre 2. Dans cette section, nous nous intéressons particulièrement aux caractéristiques des gestes qui permettent l'activation d'un grand ensemble de commandes.

5.1.1 Caractéristiques des gestes

Gestes directionnels. La force d'un raccourci gestuel réside dans la facilité qu'ont les utilisateurs à l'effectuer, ce qui implique souvent la *vitesse d'exécution* et la *précision* avec laquelle les utilisateurs peuvent reproduire ce raccourci. Les *Marking menus* [83] sont des gestes efficaces car ils sont seulement définis par une direction, et peuvent être effectués rapidement. Leur conception permet de naviguer dans une hiérarchie de menus, mais limite la taille (c.à-d. la largeur) de chaque niveau à 8 items [83]. Leur efficacité en matière de performance a été montré par plusieurs études [83, 170]. Une caractéristique intéressante de ces gestes est qu'ils ne dépendent pas de leur *taille*, ce qui permet à un utilisateur de les reproduire sur des surfaces d'interaction de différentes tailles. De plus, d'après le ressenti des participants des études présentées dans les Chapitres 3 et 4, cette façon de sélectionner des commandes semble intuitive.

Combinaison de modalités. Comme nous l'avons vu dans la première partie de cette thèse, les *positions* et *directions* sont des modalités d'interaction efficaces pour mémoriser des commandes. Un atout intéressant de ces modalités est qu'elles peuvent être combinées pour définir un grand ensemble de gestes. C'est le cas avec les *Zone* et *Polygon* menus [169] (Figure 5.1) qui différencient des gestes *directionnels* selon

leurs *positions* de départ. Dans le cas des *Zones menus*, la surface d'interaction est ainsi découpée en plusieurs zones qui correspondent à des hiérarchies de menus différentes. Cette approche est d'autant plus intéressante qu'elle pourrait en théorie aider les utilisateurs à mieux mémoriser les gestes [97]. Cette même approche est utilisée par les gestes démarrant des contours d'une surface d'interaction [73, 82, 136], étudiés ci-dessous.

Gestes de franchissement. Les gestes de *franchissement* [168] (c.à-d. "crossing gestures") combinent aussi des positions et des directions en définissant des zones d'une interface graphique que l'utilisateur peut traverser avec un geste pour sélectionner des commandes [5, 135]. Ce mécanisme permet de manipuler des variables continues après être rentré dans un mode particulier [116] (p.ex. contrôler le son d'un ordinateur), ou de sélectionner plusieurs commandes en un seul mouvement continu [61]. Cependant ce type d'interaction, particulièrement dans ce dernier cas, demande à l'utilisateur de regarder le dispositif avec lequel il interagit pour traverser avec précision certaines zones. Ce besoin peut être un défaut si l'utilisateur a besoin de diriger son attention visuelle sur une autre tâche (p.ex. utilisation d'un mur d'écrans). Nous étudions ce problème dans le Chapitre 7.

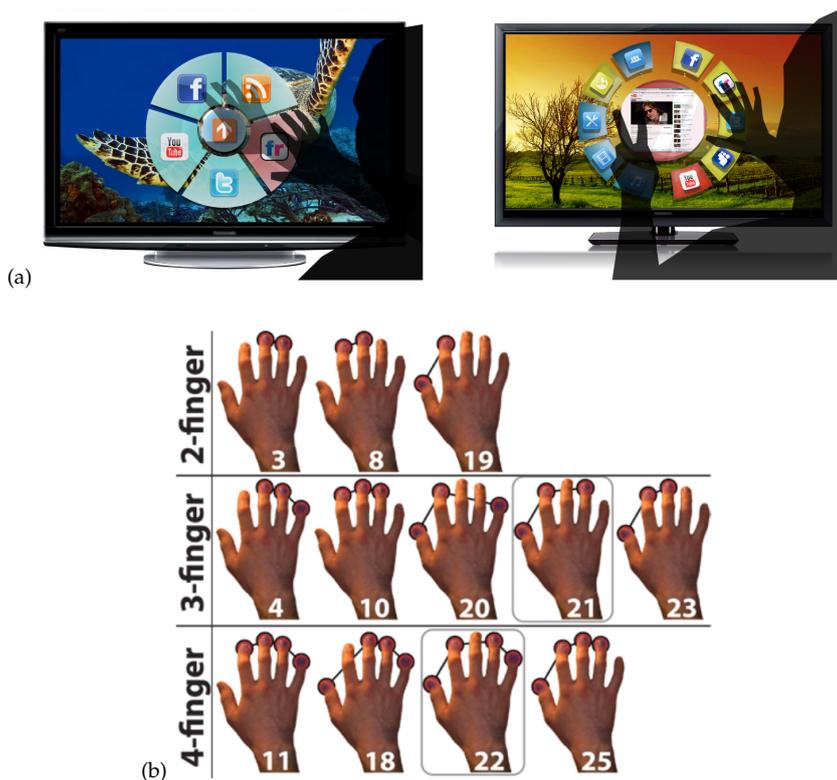


FIGURE 5.2 – (a) Raccourcis utilisant le nombre de doigts tendus de l'utilisateur pour activer une commande (source [11]). (b) Raccourcis définis par le type et le nombre de doigts en contact avec la surface d'interaction (source [54]).

Interaction multi-doigts. Pour l'instant nous n'avons fait qu'évoquer des gestes utilisant un seul pointeur (c.à-d. le curseur de la souris, ou le doigt de l'utilisateur). Or, en associant à chaque doigt un menu différent, l'utilisateur peut effectuer des gestes directionnels et parcourir plus rapidement une hiérarchie de commandes [88]. L'utilisateur peut aussi utiliser plusieurs doigts pour former une posture particulière et ainsi déclencher des raccourcis, ce qui peut aussi être vu comme un geste [11, 54, 157] (Figure 5.2). Enfin, l'interaction multi-doigts est particulièrement intéressante dans un contexte d'interaction directe, car les actions effectuées ressemblent à celles effectuées avec des objets tangibles (p.ex. manipuler des lentilles sur une carte [129]). Ce type d'interaction est maintenant popularisé avec les interfaces tactiles proposées sur les téléphones et montres intelligent(e)s, entre autre par les gestes de pincement (p.ex. zoomer dans une application multi-échelles). Cependant peu d'autres gestes multi-doigts sont couramment utilisés, malgré leur existence sur Macbook par exemple.

Gestes 3D. Pour tirer avantage du corps entier de l'utilisateur, et ne pas contraindre sa mobilité, des gestes peuvent être effectués "en l'air" ou sur le corps, ce qui peut améliorer la précision dans ce dernier cas [63, 92]. Suivant la technologie utilisée (p.ex. Microsoft Kinect), l'utilisateur n'a idéalement pas besoin de porter de dispositif pour interagir, et peut bouger aisément. Pour détecter des gestes "en l'air", il est possible d'utiliser un système de détection de la profondeur [11, 69] fixé devant ou au dessus de l'utilisateur, ou encore attaché directement à son corps [12]. Pour interagir sur le corps, des tatouages connectés peuvent être utilisés [161] ainsi que des circuits déformables [162]. Ces surfaces permettent des interactions tactiles, tout en donnant un retour tactile à l'utilisateur par leur forme et leur relief. Enfin, grâce à la proprioception, l'utilisateur peut interagir avec précision sans avoir besoin de regarder son corps [92] ce qui lui évite d'être distrait de sa tâche principale.

5.1.2 Nombre de gestes

Beaucoup de techniques d'interaction gestuelle ont été proposées en IHM [10], mais la plupart d'entre elles proposent relativement peu de gestes. Bien que ce nombre de gestes suffit souvent à l'utilisation d'une application, il devient vite contraignant si un utilisateur en utilise plusieurs, comme c'est le cas lorsqu'il interagit avec un ordinateur portable.

Hiérarchie. Afin de proposer un plus grand nombre de commandes, les techniques d'interaction gestuelle proposent souvent de naviguer en *profondeur* dans des hiérarchies de commandes [83, 170, 172]. Cette navigation peut parfois être accélérée ou facilitée en prenant en compte la *pression* appliquée par l'utilisateur en effectuant le geste

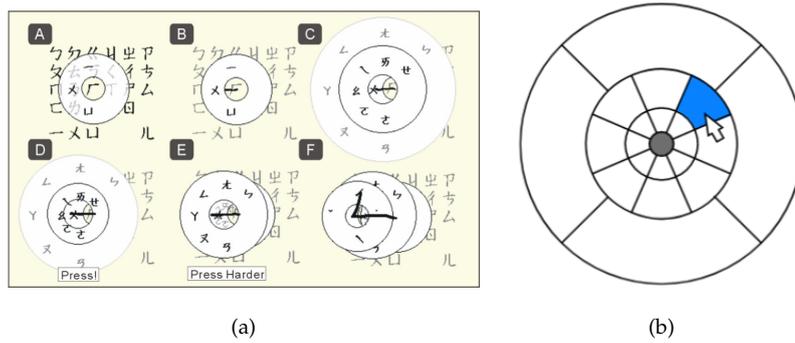


FIGURE 5.3 – (a) Les *Donuts* menus augmentent la *profondeur* des menus en utilisant la *pression* appliquée par l'utilisateur (source [86]). (b) Les *Dartboard* menus augmentent la *largeur* des menus en définissant des gestes à l'aide de *positions* (source [103]).

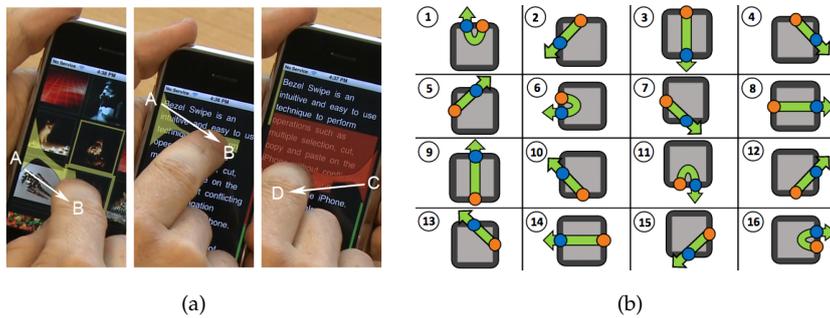


FIGURE 5.4 – Exemples de gestes utilisant les contours d'un téléphone (a) ou d'une montre sensible au toucher (b) comme délimitation. (a) Gestes *bezel swipe* démarrant des contours pour finir dans une zone particulière de la surface d'interaction (source [124]). (b) Gestes *Bezel to Bezel* commençant et finissant sur les contours d'une montre sensible au toucher (source [82]).

[72, 86] (Figure 5.3-a). Cependant, la *largeur* des menus reste limitée, comme c'est le cas pour les *Marking menus*, ce qui contraint les possibilités des designers d'interaction lorsqu'ils placent des commandes dans des menus. Pour alléger cette contrainte, plusieurs autres caractéristiques peuvent être utilisées [10]. Par exemple, la *position de départ* d'un geste [169] (Figure 5.1), la *courbure* du geste [9], ou la *taille* de ce geste [103] (Figure 5.3-b) permettent d'augmenter la *largeur* des menus. Cette dernière caractéristique reste négligée dans la littérature, malgré son fort potentiel (voir les Chapitres 6 et 7).

Petits Dispositifs. Les petits dispositifs (p.ex. des montres intelligentes) ne contraignent pas la mobilité de l'utilisateur et lui permettent souvent d'effectuer des gestes à l'aide d'une surface sensible au toucher. L'inconvénient d'une telle surface est qu'elle contraint l'utilisation de gestes par sa taille, ce qui empêche par exemple d'enchaîner plusieurs gestes directionnels pour parcourir une hiérarchie de commandes [83]. Ce problème est atténué en effectuant cette séquence de gestes en plusieurs mouvements [170], mais le nombre

de gestes réalisables reste limité. Les contours du dispositif interactif peuvent également être mis à profit pour commencer [73, 124] et finir des gestes [82] (Figure 5.4), dans le but d’augmenter le nombre de gestes disponibles.

Permettre d’effectuer un nombre important de gestes sur ce type de dispositifs offre la possibilité de contrôler un ou plusieurs systèmes complexes comme un mur d’écrans ou un système de réalité virtuelle en minimisant la gêne occasionnée par un contrôleur plus encombrant. Nous étudions particulièrement ces dispositifs au Chapitre 7.

5.2 GUIDAGE DE L’UTILISATEUR

Pour effectuer avec précision un grand ensemble de gestes, un utilisateur a besoin d’être guidé [103] (voir Chapitre 6). Plusieurs moyens peuvent être employés pour aider l’utilisateur à être précis quand il interagit, mais aussi pour l’aider à mémoriser [16, 148] (voir Chapitre 2). Plusieurs types de guides peuvent être utilisés comme des guides *passifs* ou *dynamiques*, ces derniers étant particulièrement intéressants pour indiquer à l’utilisateur si son mouvement est correct pendant qu’il l’effectue. Nous présentons dans cette section plusieurs types de guides et la façon dont ils ont été utilisés jusqu’à présent en IHM.

5.2.1 Guides passifs

Les guides *passifs* aident l’utilisateur visuellement ou tactilement pour effectuer correctement une action. Comme expliqué plus haut, ils peuvent être intégrés à un dispositif, comme par exemple les contours d’une montre ou d’un téléphone (Figure 5.4), ou être ajoutés à l’aide de matériaux bon marché (p.ex. du ruban adhésif [58] (Figure 5.6-c, ou du papier auto-collant dans le Chapitre 6). Les *guides passifs* sont d’autre part intéressants pour simplifier l’interac-



FIGURE 5.5 – Exemple de menu *caché* qui peut-être affiché avec un geste initié depuis le contour du dispositif (source [135]).

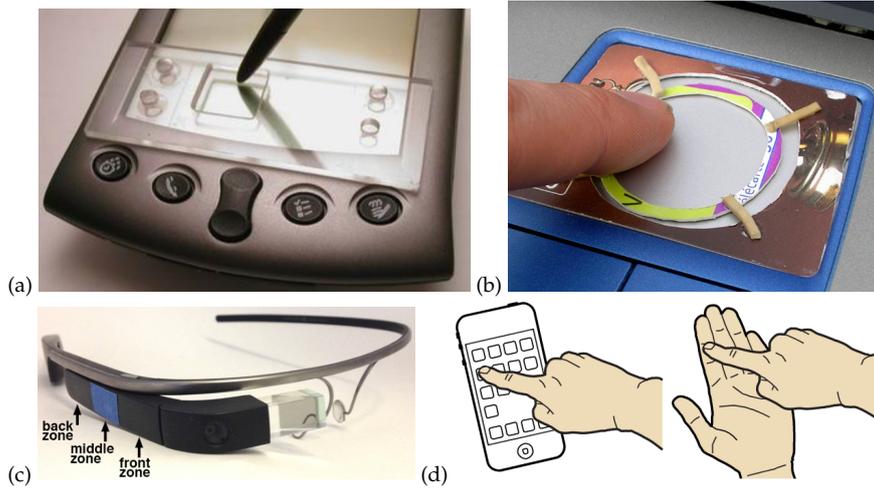


FIGURE 5.6 – Exemples de guides *passifs* facilitant les interactions effectués par l'utilisateur. (a) Une plaque de Plexiglas entoure une zone d'interaction permettant à l'utilisateur de sélectionner facilement les quatre coins de celle-ci (source [164]). (b) Un élastique augmente la surface d'un pavé tactile pour donner un retour physique à l'utilisateur (source [25]). (c) Un simple morceau de ruban adhésif permet de délimiter trois zones sur une branche de lunette (source [58]). (d) Des repères naturels sur la main de l'utilisateur peut l'aider à sélectionner des éléments invisibles (source [63]).

tion sans regarder le dispositif interactif en aidant les utilisateurs avec des repères tactiles et physiques [24, 49, 77].

Guides Visuels. Les contours d'une surface d'interaction peuvent être utilisés pour initier ou terminer un geste, ce qui permet de différencier les gestes initiés depuis l'intérieur ou l'extérieur de la surface [73, 82, 124] (Figure 5.4). Ce type d'interaction est par exemple devenu habituel pour afficher des panneaux déroulants sur les interfaces mobiles [135] (Figure 5.5). Ces contours peuvent être séparés en plusieurs zones pour augmenter le nombre de gestes possibles [137], mais sans aide visuelle supplémentaire, le nombre de ces zones reste limité sur les interfaces commerciales (p.ex. entre 5 et 7 sur pour chaque côté d'une tablette [137]). Nous montrons dans le Chapitre 6 qu'utiliser de simples marques visuelles permet d'augmenter considérablement le nombre de gestes disponibles en utilisant une technique d'interaction qui exploite des gestes définis à l'aide de deux *positions*.

Guides (Visuo-)Tactiles. Les *guides tactiles* (souvent *visio-tactiles*) peuvent être sentis via le toucher lorsque l'utilisateur interagit. Ils facilitent entre autres l'interaction à l'aveugle (c.à-d. sans regarder le dispositif interactif), ce qui a des avantages dans des contextes où l'utilisateur doit rester concentré sur une tâche principale (p.ex. conduire un véhicule) [173]. Ce type de guides permet d'ajouter une dimension physique à des surfaces sensibles au toucher pour représenter

par exemple des claviers [77], ou les boutons d'une interface utilisateur [80]. Ces guides peuvent aussi servir de délimitation grâce à leur relief, pour indiquer à des utilisateurs mal-voyants la position d'éléments d'une interface utilisateur [24], ou servir de butée pour effectuer des gestes [49, 164] (Figure 5.6-a). Enfin utiliser des matériaux plus souples comme un élastique pour augmenter les capacités tactiles d'un pavé tactile [25] (Figure 5.6-b) offre une solution simple et efficace pour offrir de nouvelles possibilités d'interaction à l'utilisateur. Comme le montre ces exemples, l'utilisation de matériaux tangibles bon marché permet d'augmenter les capacités d'un dispositif interactif à moindre coût. Nous nous inspirons de ces méthodes dans les Chapitre 6 et 7.

Guides Corporels. Le corps de l'utilisateur peut servir de support, aussi bien visuel que visio-tactile, pour interagir. L'utilisateur peut par exemple utiliser une de ses mains comme repère visuel pour effectuer des gestes "en l'air" [62]. Il peut de même tirer avantage de repères naturels comme des tâches de naissances pour placer et se rappeler de commandes qu'il aimerait déclencher [16], ou de protubérances osseuses comme les phalanges pour guider son mouvement [162]). Cette même approche lui permet d'utiliser les rides de sa main pour visualiser une interface imaginaire [38], qui peut représenter les boutons d'un téléphone [63] (Figure 5.6-d), et ainsi lui permettre d'interagir avec son téléphone sans le tenir dans sa main.

Suivant le contexte d'interaction, diverses zones du corps sont appropriées pour interagir. Si l'utilisateur veut interagir en courant ou en faisant du vélo, les avant-bras et le côté de la tête sont des zones privilégiés car faciles d'accès [153]. S'il veut interagir en étant debout, comme devant un mur d'écrans, les avant-bras et les hanches sont préférables [78, 158]. Un avantage important du corps est que les capacités de proprioception de l'humain lui permettent d'interagir avec celui-ci sans avoir besoin de le regarder, ce qui est utile dans bien des cas (voir *guides visio-tactiles*, et Chapitre 4).

5.2.2 *Guides dynamiques*

Les *guides dynamiques* utilisent des rétroactions en temps réel pour guider l'utilisateur pendant qu'il interagit. Ils permettent d'orienter le mouvement de l'utilisateur lors d'interactions gestuelles en utilisant par exemple des aides *visuelles* [14, 74, 83], *sonores* [45, 107], ou *vibratoires* [21]. Utiliser de telles aides permet aussi d'assurer à l'utilisateur qu'il interagit correctement avec un système (p.ex. émission de vibrations en entrant du texte sur un clavier tactile). L'utilisation d'un sens différent de la vue (p.ex. ouïe et toucher) rend possible des interactions à l'aveugle [171] ou permet à des personnes visuellement déficientes d'effectuer des interactions gestuelles [107].

Guides Visuels. Pour guider un utilisateur novice lors d'interactions gestuelles, une représentation graphique de ces gestes peut être utilisée. Les *Marking menus* [83] ont introduit ce concept à l'aide d'un mode novice qui se déclenche si l'utilisateur commence à interagir sans effectuer de geste pendant un court délai. Ce mode novice est amélioré dans le projet *Octopocus* [14] qui prend en compte le chemin déjà parcouru par l'utilisateur, et n'affiche que les gestes qu'il peut encore effectuer. Ce mécanisme permet de filtrer dynamiquement la quantité d'information transmise à l'utilisateur, et de le guider constamment. De plus, le mode semi-novice de cette technique permet à un utilisateur qui a déjà commencé un geste de s'arrêter pendant un court instant pour déclencher le mode novice et vérifier s'il effectue le bon geste.

Guides Vibratoires. Les vibrations sont faites de plusieurs composantes (c.à-d. fréquence, intensité, rythme) qui peuvent être exploitées pour transmettre un message complexe à l'utilisateur [21]. En jouant avec ces composantes, il est par exemple possible de faire varier la friction d'une surface et ainsi donner l'illusion à l'utilisateur de toucher des surfaces faites de différentes rugosités [3, 15]. Grâce à ce type de système, l'utilisateur peut différencier plusieurs zones sur une surface d'interaction [119], pour pouvoir par exemple reconnaître différents éléments graphiques d'une interface utilisateur à l'aide du toucher [89].

L'utilisation de courtes vibrations en séquence peut aussi s'avérer efficace pour sélectionner des commandes rapidement [91]. L'utilisateur peut ainsi garder son doigt appuyé sur un bouton et compter les vibrations pour sélectionner la commande qu'il désire. Il est aussi possible de reconnaître plusieurs schémas de vibration qui peuvent correspondre à différentes notifications (p.ex. une vibration courte pour un SMS, et une vibration longue pour un e-mail). Pour augmenter le nombre de schémas reconnaissables, quatre émetteurs peuvent être utilisés sur une montre intelligente, et vibrer en séquence pour transmettre diverses informations [90]. Ces émetteurs peuvent aussi être disposés sur le corps de l'utilisateur pour augmenter encore plus ce nombre [28]. Nous utilisons de simples vibrations dans le Chapitre 7 pour indiquer la position du doigt de l'utilisateur lorsqu'il interagit sans regarder.

Guides Sonores. Les sons partagent les mêmes caractéristiques que les vibrations et sont de même utiles pour guider l'utilisateur. Ils peuvent être utiles pour aider des utilisateurs à effectuer des gestes en deux dimensions [107], c'est à dire sur une surface sensible au toucher, ou en trois dimensions [45] "en l'air". Ils sont aussi utiles pour décrire une interface que l'utilisateur ne voit pas, comme le propose le projet *Earpod* [171]. Une zone circulaire est découpée en plusieurs parties auxquelles sont associées des commandes. L'utilisateur en tou-

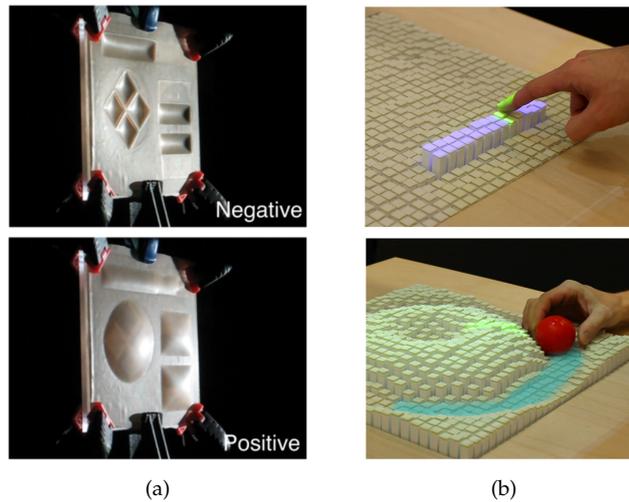


FIGURE 5.7 – Exemples de guides visio-tactiles dynamiques. (a) Système gonflable pour représenter des boutons à l’aide de reliefs [68]. (b) Piliers motorisés utilisés pour modifier le relief d’une surface [43].

chant une partie peut entendre le nom de la commande associée grâce à de la synthèse vocale, et ainsi sélectionner des commandes sans avoir recourt à la vue.

Surfaces Modifiables. La surface d’un dispositif interactif peut être modifiée dynamiquement pour représenter une variété d’informations. En modifiant le relief de celle-ci, avec un système pneumatique [68], ou en utilisant des piliers motorisés [43, 141], des boutons, des formes, ou encore des données peuvent être représentés (Figure 5.7). Ce même principe peut être utilisé sur les côtés d’un téléphone pour augmenter ces capacités tactiles (p.ex. création de boutons supplémentaires) ou ajouter une dimension physique aux données affichées sur l’écran [74]. Un pavé tactile peut aussi en bénéficier [76], ce qui est particulièrement intéressant pour aider l’utilisateur à effectuer avec précision des gestes définis par des *positions* (voir Chapitre 6). Enfin, des boutons tangibles peuvent s’extraire d’une surface interactive pour aider l’utilisateur à interagir à l’aveugle [122].

Nous nous inspirons des différents guides évoqués jusqu’à présent dans les Chapitres 6 et 7. Nous utilisons des guides *passifs* sous forme de marques visuelles et visio-tactiles pour indiquer à l’utilisateur des zones sur une surface sensible au toucher à partir desquelles il peut commencer et terminer son mouvement, et nous utilisons des guides *dynamiques*, via l’émission de vibrations, pour aider l’utilisateur à interagir sans avoir besoin de regarder le dispositif interactif.

Un ordinateur est un système interactif complexe dont un utilisateur se sert pour achever des tâches variées. Souvent, l'utilisateur jongle entre plusieurs logiciels qui proposent des fonctionnalités différentes, et obligent l'utilisateur à apprendre un grand nombre de commandes pour tous les maîtriser. Proposer à l'utilisateur un ensemble de gestes cohérents qui peuvent être associés à un grand nombre de commandes peut l'aider à interagir plus rapidement en lui évitant de parcourir de longs menus hiérarchiques, et lui fournir un moyen d'interaction consistant pour contrôler pleinement son ordinateur.

Les ordinateurs portables sont accompagnés de pavés tactiles qui permettent à l'utilisateur de contrôler un curseur de façon relative pour pointer et sélectionner des éléments graphiques affichés sur l'écran. Or, suivant la taille de ces pavés tactiles, les bords de ceux-ci sont peu utilisés [95] (voir la section 6.5). Notre approche dans le projet MarkPad n'est pas seulement de tirer avantage des bords du pavé tactile pour initier des gestes, comme le proposent plusieurs études [73, 124], mais de définir ces gestes par des *positions* et des *directions*. Ces gestes ont l'avantage de pouvoir être effectués avec un seul doigt, sans avoir besoin de rentrer dans un mode particulier, et autorisent un grand nombre de gestes.

Pour que les utilisateurs effectuent ces gestes avec précision, nous les guidons en apposant des marques visuelles ou visio-tactiles sur le pavé tactile. Ainsi, les utilisateurs peuvent glisser leur doigt d'une marque à une autre pour réaliser un geste. Nous validons notre concept dans ce chapitre à l'aide de plusieurs études. Les deux premières étudient la faisabilité des gestes proposés, alors que la troisième étudie si ces gestes rentrent en conflit avec le pointage usuel sur un pavé tactile. Nous présentons enfin un prototype effectif, ainsi qu'une étude longitudinale pour étudier la façon dont les utilisateurs s'approprient une telle technologie.

6.1 INTRODUCTION

Les utilisateurs effectuent souvent les mêmes actions lorsqu'ils interagissent avec un ordinateur, comme exécuter les commandes de leurs applications favorites, ouvrir des applications, des fichiers, ou leurs pages Web favorites. Ces actions nécessitent généralement l'uti-

Le contenu de ce chapitre est très inspiré d'un article précédemment publié à CHI'17 [50]



FIGURE 6.1 – (a) Exemple d'un geste *MarkPad* effectué en glissant son doigt d'une zone de *départ* à une zone d'*arrivée*. (b) Interface graphique affichée en mode *novice*, représentant ici le menu ouvert par l'utilisateur en effectuant le geste montré dans (a).

lisation de différentes techniques d'interaction, telles que des menus (pour les commandes), des barres d'outils permanentes ou masquées (pour l'ouverture d'applications) ou des listes de favoris (pour l'ouverture de pages Web). A part les menus, la plupart de ces techniques ne s'appuient que sur la *reconnaissance* et ne proposent pas de mode *expert*. Les menus fournissent des raccourcis clavier mais les raccourcis "simples", généralement ceux qui utilisent la première lettre de la commande associée, sont en nombre limité et la plupart d'entre eux sont déjà utilisés. La création de nouvelles touches de raccourci a donc tendance à nécessiter des combinaisons complexes de modificateurs.

Dans ce chapitre, nous proposons une nouvelle technique appelée *MarkPad* (Figure 6.1) qui tire parti du pavé tactile des ordinateurs portables pour effectuer n'importe quel type d'action fréquente. Cette technique permet de déclencher un grand nombre de commandes (680 dans notre expérience) et offre beaucoup de flexibilité en permettant aux utilisateurs de définir leurs propres gestes. Elle fournit une manière homogène d'effectuer toutes ces différentes actions et permet de les grouper de manière significative pour l'utilisateur, indépendamment de leur type. Par exemple, l'utilisateur peut rassembler toutes les actions (applications, commandes, scripts, pages Web, etc.) liées à une tâche, une activité ou un projet dans un groupe agissant comme une sorte de zone conceptuelle.

MarkPad fournit à la fois un mode *novice* et un mode *expert* en s'appuyant sur des raccourcis *gestuels simples* qui sont identiques dans les deux modes. Sa conception prolonge les *Marking* et *Bezel* menus [73, 83] en prenant en compte les positions de départ et d'arrivée des gestes, ce qui augmente considérablement le nombre de gestes possibles. Pour obtenir des performances suffisantes, MarkPad s'appuie sur l'ajout de marques *visuelles* ou *visio-tactiles* au pavé tactile (Figure 6.1-a). Cette solution simple, qui ne nécessite que des matériaux bon marché (par exemple des autocollants en papier ou du ru-

ban adhésif), permet d'utiliser la technique pratiquement sans frais sur les dispositifs actuels.

Les gestes MarkPad commencent des bords du pavé tactile pour éviter d'entrer en conflit avec les interactions standard (c.à-d. pointage usuel). Plus précisément, ils partent de zones définies par l'utilisateur qui correspondent à des menus. En initiant un geste à partir d'une de ces zones, l'utilisateur ouvre un menu et il peut sélectionner une commande de ce menu en finissant son geste dans une autre zone située sur le pavé tactile (Figure 6.1). Chaque menu peut contenir un grand nombre d'éléments (34 dans notre expérience). Ils peuvent être arrangés de façon à avoir du sens pour l'utilisateur pour l'aider à les mémoriser en favorisant ses mémoires *spatiale* et *sémantique*. Ces groupes sémantiques facilitent non seulement la découverte ou la recherche de gestes [104], mais aussi l'apprentissage et la mémorisation [7, 18, 97]. Contrairement aux *Marking* et *Bezel* menus, la largeur des menus MarkPad est assez grande pour ne pas contraindre la création de gestes.

Après avoir décrit la technique, nous rapportons deux études en laboratoire montrant qu'une précision de 95% peut être obtenue pour une configuration dense de 680 raccourcis gestuels en utilisant des marques visuelles ou visio-tactiles. Une seconde étude montre que retirer les marques au centre du pavé tactile diminue légèrement la précision des gestes (environ 90% de précision pour la même configuration extrême). Dans une dernière étude, où les utilisateurs ignorent l'existence de la technique proposée, nous montrons que les bords du pavé tactile sont rarement utilisés et que les gestes que nous proposons sont moins enclins à des activations involontaires que des gestes directionnels. Enfin, nous présentons un prototype fonctionnel et son utilisation par un groupe d'utilisateurs.

6.2 LA TECHNIQUE MARKPAD

Attributs et modalités. Les gestes MarkPad reposent sur la combinaison de plusieurs attributs et modalités géométriques. Bien que ces gestes dépendent uniquement d'une zone de départ et d'une zone d'arrivée, les utilisateurs peuvent également les percevoir comme la combinaison d'une *position*, d'une *direction*, et d'une *distance*. Pour effectuer ces gestes avec précision, les utilisateurs peuvent s'appuyer sur les contours du pavé tactile qui forment quatre coins et agissent comme des repères *visuels* et *tactiles* (donc *visio-tactiles*) [137]. Nous augmentons le pavé tactile avec des marques pour augmenter encore la précision.

Marques visuelles/tactiles. Utiliser des marques *passives* ne modifie que légèrement le pavé tactile et reste discret. Ces marques consti-

tuent des points de repère pour initier et achever des gestes, et les marques *tactiles* peuvent être presque invisibles, par exemple en utilisant du ruban adhésif transparent ou en modifiant légèrement la rugosité de la surface. Leur présence n'est pas gênante sur les bords du pavé tactile car ceux-ci sont rarement utilisés [95], comme le montre notre dernière étude. Cependant, ils peuvent être désagréables au centre du pavé tactile, en particulier lors des tâches de pointage. Une solution consiste à avoir des marques seulement sur les bords (Figure 6.1-a), un cas que nous considérons dans notre deuxième étude.

Une solution pour éviter d'utiliser des marques statiques au centre du pavé tactile est d'utiliser des marques *dynamiques* qui s'adaptent aux gestes de l'utilisateur (p.ex. seulement les éléments du menu sélectionné seraient représentés par les marques). Les marques *tactiles* peuvent être produites par des rétroactions vibratoires [1, 15, 25], ou des rétroactions permettant de changer le relief de la surface d'interaction [76, 141]. Une telle technologie a par exemple été utilisée dans Métamorphe [13] pour promouvoir l'utilisation des raccourcis clavier. Les marques *visuelles* pourraient quant à elles être affichées à l'aide d'un écran tactile, comme c'est le cas des nouveaux modèles d'ordinateur portables Azus (<https://www.asus.com/us/Laptops/ASUS-ZenBookPro-15-UX580GE/>) ou des *touchbars* des nouveaux modèles de Macbook (<https://www.apple.com/macbook-pro/>).

Utilisation sans marques. La technique MarkPad fonctionne également sans marques à condition que les zones utilisées soient assez grandes. Les zones de départ n'ont pas besoin d'être grandes car l'utilisateur est guidé par les bords du pavé tactile, mais les zones d'arrivée, au contraire, doivent l'être suffisamment. Les données recueillies au cours de l'étude longitudinale montrent que les utilisateurs n'ont pas eu besoin de marques pour utiliser les gestes MarkPad correctement.

Pointage absolu vs relatif. Un point important est que MarkPad utilise le pavé tactile en tant que périphérique de pointage *absolu*. Ceci signifie que MarkPad n'entre pas en conflit avec des techniques d'interaction telles que les coins actifs ou les barres d'outils cachées car celles-ci reposent sur la position du *curseur* de la souris. En d'autres termes, nous profitons du fait que le pavé tactile est normalement utilisé en tant que périphérique de pointage *relatif*. Du fait que nous commençons les gestes à partir des bords, les deux manières d'utiliser le pavé tactile (c.à-d. de façon absolue ou relative) n'entrent pas en conflit, sauf dans les rares cas où l'utilisateur touche involontairement la bordure. De plus, le logiciel peut empêcher le mouvement du curseur lorsqu'un mouvement MarkPad est initié sur la bordure.

Interaction. MarkPad propose à l'utilisateur trois modes d'interaction (*novice*, *semi-novice* et *expert*) en fonction de son niveau d'expertise. En mode *novice*, l'utilisateur appuie sur une combinaison de

touches comme par exemple les touches *function* et *control* (il peut également appuyer deux fois sur la bordure, ou la toucher dans une zone spéciale [135]). Les noms des menus disponibles sont ensuite affichés sur les bordures de l'écran. Leur emplacement correspond à ceux des zones de départ (ou "zones de menu") des gestes Mark-Pad sur le pavé tactile, qui peuvent être matérialisés par des marques visuelles ou tactiles.

Une fois que l'utilisateur touche une zone appropriée pour ouvrir le menu souhaité (zone de menu), les noms des éléments contenus dans ce menu sont affichés sur l'écran (Figure 6.1-b). Le menu est transparent, affiché en plein écran et superposé aux applications exécutées sur le bureau. L'utilisateur peut alors effectuer le geste souhaité, qui consiste à déplacer son doigt de la zone de menu à la zone de l'action souhaitée. L'action associée est déclenchée lorsque l'utilisateur relâche son doigt. Le geste peut être annulé en déplaçant le doigt vers une zone vide ou vers la zone de menu. Toutes ces opérations peuvent être effectuées sans regarder le pavé tactile, car l'emplacement du doigt est affiché en permanence sur l'écran.

En mode *expert*, l'utilisateur peut effectuer directement un geste sans maintenir la touche *function* enfoncée et sans déclencher le menu graphique. Le mode *semi-novice* est un cas intermédiaire lorsque l'utilisateur connaît la zone de menu, mais pas le geste approprié. Dans ce cas, il peut toucher deux fois la zone de menu souhaitée, ou la toucher pendant au moins 500 ms pour faire apparaître ce menu.

Zones et marques. Les zones composant les gestes peuvent soit correspondre aux marques visuelles ou visio-tactiles sur le pavé tactile, soit à l'absence d'une telle marque entre deux marques (en particulier le long des bordures). Les zones de menus doivent être situées sur les bordures, mais l'utilisateur peut placer les zones des éléments de menu où bon lui semble. Les zones peuvent avoir différentes tailles (Figure 6.10) et peuvent être plus grandes que les marques visuelles ou visio-tactiles réelles. Par exemple, les zones dans les coins n'ont pas besoin d'être grandes, mais de grandes zones sont bénéfiques au centre du pavé tactile, en particulier si la technique est utilisée sans marques au centre du pavé tactile.

Comme les emplacements ne changent pas, après un peu de pratique, les utilisateurs devraient être en mesure d'effectuer certains des gestes sans regarder le pavé tactile en mode expert, en particulier lorsqu'ils utilisent des marques tactiles. Cela leur permettrait de se concentrer sur leur tâche principale en empêchant les mouvements de la tête et des yeux entre l'écran et le pavé tactile.

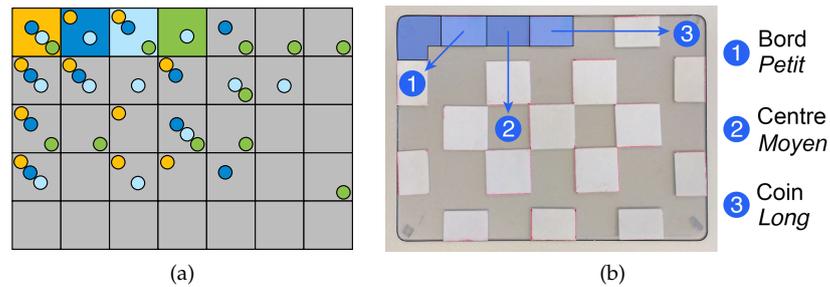


FIGURE 6.2 – (a) Gestes évalués : les cercles correspondent aux zones d'arrivée et leurs couleurs indiquent la zone de départ associée (aucune couleur n'était utilisée au cours de l'expérience). (b) Trois exemples de gestes montrés sur l'interface de marques *Visio-Tactile*.

6.3 SÉLECTION DE COMMANDES EN MODE EXPERT

Cette première étude vise à évaluer la performance de la technique en mode expert lorsque des marques visuelles ou visio-tactiles sont présentes sur le pavé tactile. Pour cela, nous avons construit trois interfaces sur une couche de plastique que nous fixons sur le pavé tactile (Figure 6.2-b). La première version a de fines marques *Visio-Tactiles* que l'utilisateur peut voir et sentir (faites d'autocollants en papier), et la seconde version des marques *Visuelles* qui ne peuvent être que vues (les marques sont dessinées sur le plastique). La dernière version, appelée *Mixte*, combine les deux cas précédents : sur les bords sont disposées des marques *tactiles* et au centre des marques *visuelles*. Cette dernière version évite de placer des marques tactiles au centre du pavé tactile qui pourraient être gênantes pour des tâches de pointage usuelles.

Comme le montre la figure 6.2, dans cette expérience, nous utilisons une grille contenant un grand nombre de zones rectangulaires ($7 \times 5 = 35$ zones). Un geste valide peut commencer à partir d'une zone sur les bords et se terminer dans n'importe quelle zone, à l'exception de la zone à partir de laquelle il a été commencé. Les marques tactiles et visuelles (Figure 6.2-b) apparaissent en gris clair tandis que les autres zones, plus foncées, sont restées vides. Les prototypes ont été construits avec des matériaux bon marché (feuilles de plastique, autocollants en papier, ruban adhésif, stylos Posca...) que chacun peut utiliser pour personnaliser son propre pavé tactile.

Nous utilisons une configuration de zone de 7×5 parce que : (1) elle permet le déclenchement d'un grand nombre de commandes (20 zones de départ \times 35 - 1 zones d'arrivée = 680 raccourcis), (2) un nombre impair de zones frontalières est préférable à un nombre pair [137], (3) la taille de toutes les zones est conforme aux recommandations pour interagir avec les écrans tactiles [111, 156]. Les zones du centre mesurent 15×15 mm tandis que les zones frontalières sont un

peu plus petites afin de ne pas occuper trop d'espace. Le plus petit côté de ces dernières (c'est-à-dire leur largeur pour les bords gauches et droits ou leur hauteur pour les bords supérieurs et inférieurs) est de 10 mm. Comme on peut le remarquer sur la Figure 6.2, une petite zone morte de 5 mm est utilisée entre la bordure et la zone centrale. Comme nous l'expliquons dans la dernière étude, cette zone vide est destinée à réduire les activations involontaires. Elle a été incluse par souci de réalisme, mais n'a pas ou peu d'impact sur les résultats de cette étude.

6.3.1 Protocole expérimental

Hypothèses. Nous avons émis l'hypothèse que : (H1) toutes les interfaces devraient fournir une précision suffisamment élevée, mais que, parce qu'elles fournissent plus d'informations, les marques *Visio-Tactiles* devraient (H2) offrir de meilleures performances et (H3) permettre aux participants de moins regarder le pavé tactile (ou de le regarder moins longtemps).

Comme nous ne pouvons pas tester les 680 gestes possibles, nous choisissons un sous-ensemble représentatif en tenant compte de trois caractéristiques : le type des zones de départ et d'arrivée, et la LONGUEUR du geste. Les zones de départ sont placées entre le coin supérieur gauche et la zone centrale supérieure (toutes deux plus faciles à pointer selon [56]), comme le montre les zones colorées sur la Figure 6.2-a. Nous avons choisi des zones voisines parce que nous pensions qu'elles pourraient mener à plus de confusions que des zones qui auraient été éloignées les unes des autres. De plus, ces zones étaient représentatives de tous les types de zones de départ possibles (coin, milieu, entre les deux). La zone d'ARRIVÉE était soit une zone *Coin*, *Bord*, ou *Milieu*, et la LONGUEUR était le nombre de zones entre les zones de départ et d'arrivée (soit 0 = *Petit*, 1 = *Moyen*, 2 = *Long*), comme indiqué sur la Figure 6.2-b. Nous avons équilibré ces caractéristiques pour obtenir 14 *Petit*, 14 *Moyen* et 14 *Long* gestes (soit un total de 42 gestes), dont 4 se terminant dans un *Coin*, 19 sur un *Bord*, et 19 dans une zone du *Milieu*.

Nous utilisons une tâche AUXILIAIRE pour rendre la tâche de sélection de commande plus réaliste. L'utilisateur doit effectuer cette tâche avant d'effectuer un geste MarkPad. La tâche AUXILIAIRE est une tâche de *Pointage* ou d'*Entrée clavier*. Les participants doivent placer dans le premier cas le curseur de la souris à l'intérieur d'un cercle de 35 pixels, à une distance de 250 pixels, et dans le second cas appuyer sur les touches '5' et '7' du clavier en utilisant leurs deux mains. Nous nous attendions à ce que ces tâches aient une incidence sur la performance de la tâche principale et le regard des utilisateurs.

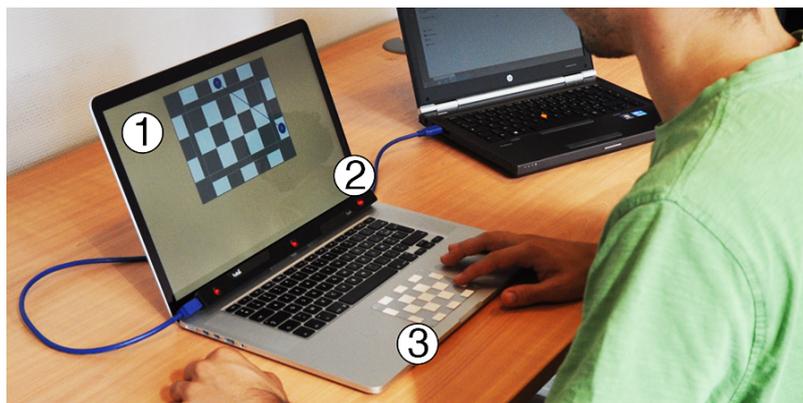


FIGURE 6.3 – Dispositif expérimental : (1) Stimulus montré pendant la tâche de sélection de commande (deux cercles bleus indiquent les zones de départ/arrivée), (2) système Tobii EyeX utilisé pour capturer le regard de l'utilisateur, (3) interface *Visio-Tactile* attachée au pavé tactile.

Stimulus. Après la tâche AUXILIAIRE effectuée, la grille de 7×5 zones est affichée sur l'écran de l'ordinateur portable avec un cercle bleu montrant la zone de départ (Figure 6.3). Lorsque le participant touche le pavé tactile, la zone d'arrivée apparaît sur la grille (également sous la forme d'un cercle bleu), et le participant peut alors compléter le geste. Nous utilisons cette conception pour simuler un comportement expert où l'utilisateur continue à regarder l'écran tout en exécutant le geste sur le pavé tactile. Nous ne montrons pas les deux zones dès le début de la tâche parce que nous avons remarqué dans des pré-tests que les participants ne regardent pas systématiquement le pavé tactile pour effectuer le geste. Cette procédure en deux étapes encourage donc les participants à rester concentrés sur l'écran.

Aucun retour n'est affiché à l'écran *pendant* que les participants effectuent un geste, mais un retour est fourni *une fois* le geste effectué. Une fois que le participant relâche son doigt, une ligne entre les points de départ et d'arrivée de son mouvement est affichée sur la grille. Cette ligne est verte et affichée pendant 1 seconde en cas de succès, mais rouge et affichée pendant 2.5 s (comme pénalité) en cas d'erreur. Le participant peut alors commencer l'essai suivant en appuyant sur la barre d'espace.

Procédure. Nous avons demandé à 12 participants droitiers de réaliser notre étude (9 hommes, 3 femmes, âgés de 22 à 35 ans). L'expérience durait entre 30 et 40 minutes. Nous faisons varier l'INTERFACE utilisée par blocs (*Visio-Tactile*, *Visuelle* et *Mixte*) et l'ordre de présentation était contrebalancé entre les participants. Pour chaque INTERFACE, les participants devaient effectuer un bloc d'entraînement de 6 essais suivis d'un bloc d'évaluation de 84 essais. Les participants exécutaient chaque geste deux fois, chaque fois avec une tâche différente.

	<i>Visuelle</i>	<i>Mixte</i>	<i>Visio-Tactile</i>
Taux de succès (%)	95.64 ± 2.11	94.83 ± 1.84	95.63 ± 1.69
Temps de complétion (ms)	2013 ± 152	2061 ± 156	2100 ± 125
Temps d'exécution (ms)	975 ± 89	1019 ± 78	1041 ± 67
Nombre de regards	1.84 ± 0.13	1.72 ± 0.16	1.74 ± 0.15
Durée des regards (%)	36.05 ± 2.4	32.38 ± 3.5	31.85 ± 3.1

TABLEAU 6.1 – Résumé des résultats principaux pour chaque interface. Moyennes avec intervalles de confiance à 95% calculé relativement aux moyennes des participants.

Enfin, les participants étaient invités à remplir un questionnaire à la fin de l'expérience.

Apparatus. L'expérience a été réalisée sur un Macbook 15" pro avec un processeur Intel Core i7 de 2,2 Ghz. La taille du pavé tactile était de 105×76 mm. Nous avons utilisé un système de suivi oculaire Tobii EyeX [41] fonctionnant sur un ordinateur Windows 7 pour capturer le regard des utilisateurs. Les deux ordinateurs interagissaient par l'intermédiaire du protocole UDP.

6.3.2 Résultats

Nous fondons notre analyse sur les mesures suivantes : le *taux de succès*, le *temps de complétion* (durée totale de la sélection d'une commande), le *temps d'exécution* (temps écoulé entre le toucher et le relâchement du pavé tactile pour effectuer le geste), le *nombre de regards* vers le pavé tactile et la *durée de ces regards* (en pourcentage du *durée de la tâche*). Le tableau 6.1 fournit un résumé des résultats. Le principal résultat étant que toutes les interfaces ont mené à une grande précision ($\approx 95\%$).

Les tests ANOVA ne montrent aucun effet significatif de l'INTERFACE sur le *taux de succès* ($F_{2,22} = 0.43$, $p = 0.655$), le *temps de complétion* ($F_{2,22} = 0.57$, $p = 0.576$), le *temps d'exécution* ($F_{2,22} = 1.54$, $p = 0.236$) ou le *nombre de regards* ($F_{2,22} = 3.14$, $p = 0.063$). Cependant, un autre test ANOVA révèle un effet significatif sur la durée du regard ($F_{2,22} = 9.83$, $p = 0.01$). Un test t post-hoc montre que l'interface *Visuelle* demande davantage de temps pour regarder le pavé tactile que les interfaces *Visio-Tactiles* ($p = 0.014$) et *Mixtes* ($p < 0.01$)¹. Bien que nous nous attendions à ce résultat, le *temps d'exécution* n'est pas significativement différent (sa valeur moyenne est en fait légèrement plus courte pour l'interface *Visuelle*, Tableau 6.1). Nous avons également exécuté les mêmes mesures pour évaluer l'effet de la tâche AUXILIAIRE précédant

1. Tous nos t-tests sont sans ajustement Bonferroni pour les raisons expliquées dans [113]. Cependant, ils restent significatifs avec l'ajustement Bonferroni-Holm.

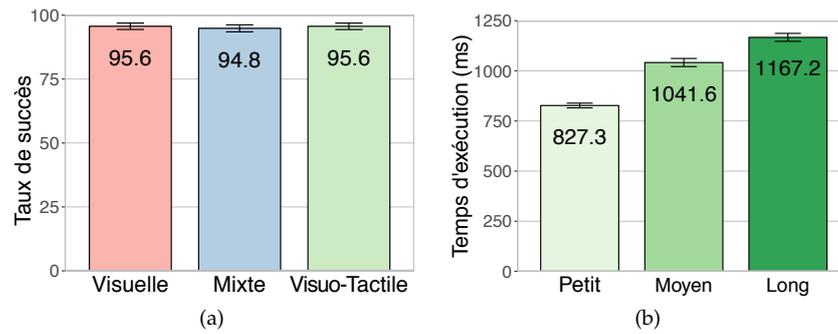


FIGURE 6.4 – (a) *Taux de succès* relatifs à la ZONE D'ARRIVÉE. (b) *Temps d'exécution* relatif à la LONGUEUR.

les tâches de sélection des commandes, mais nous n'avons trouvé aucune différence significative.

Nous avons également examiné l'impact de la LONGUEUR et de la ZONE D'ARRIVÉE. Les tests ANOVAS révèlent un effet pour les deux sur le *taux de succès* (respectivement $F_{2,22} = 6.23$, $p < 0.01$ et $F_{2,22} = 11.32$, $p < 0.01$) et sur le *temps d'exécution* (respectivement $F_{2,22} = 7.04$, $p < 0.01$ et $F_{2,22} = 135.62$, $p < 0.01$). Les tests t post-hoc montrent que les petits gestes sont accomplis avec succès plus souvent que les gestes longs (96,73% vs 94,72%, $p < 0.01$). Comme on pouvait s'y attendre, des gestes plus petits ont également été exécutés plus rapidement que des gestes plus longs (respectivement 827ms, 1042ms, 1167ms, tous les p 's < 0.01 , Figure 6.4). D'autres tests t révèlent que les gestes se terminant dans un *Coin* ont été accomplis avec succès plus souvent que les autres (98.25% vs. *Bord* 95.47% et *Milieu* 94.66%, Figure 6.4) et que les gestes se terminant dans un *Coin* ou un *Bord* étaient plus rapides que ceux se terminant au *Milieu* (respectivement 997ms, 978ms et 1049ms).

Enfin, nous voulions évaluer à quels moments les utilisateurs regardaient le pavé tactile (que ce soit en *touchant* ou *relâchant* pour initier ou terminer le geste). Un test ANOVA sur le *pourcentage d'essais* pendant lesquels les utilisateurs ont regardé le pavé tactile en *relâchant* leur doigt révèle un effet de l'INTERFACE ($F_{2,22} = 3.83$, $p = 0.037$). Un test t post-hoc ne révèle aucune autre différence, bien que l'interface *Visuelle* forçait les utilisateurs à regarder le pavé tactile tout en *relâchant* leur doigt sur 74% des essais alors que les interfaces *Mixte* et *Visio-Tactile* les forçaient respectivement sur 65% et 64% d'entre eux.

Questionnaire. Nous avons demandé aux participants de classer les interfaces de la moins appréciée à la plus appréciée avec la possibilité d'avoir des égalités (sur une échelle de 1 à 3, 3 étant la meilleure). De petites différences non significatives ont été trouvées entre elles (moyennes : *Visuelle* 2.00, *Mixte* 2.17 et *Visio-Tactile* 2.33). Puis nous leur avons demandé de remplir des échelles de Likert avec des niveaux de 1 à 7 sur leur perception de leur niveau de *succès*, leur

niveau de *confiance*, combien de fois ils ont regardé le pavé tactile et sur la *charge cognitive* requise pour chaque INTERFACE. L'interface *Visio-Tactile* semblait mieux perçue dans tous les cas, mais aucune différence significative n'a été trouvée. Nous avons également demandé aux participants s'ils trouvaient que les marques tactiles étaient gênantes lorsqu'ils effectuaient la tâche de pointage. Une valeur médiane de 5 (légèrement d'accord) a été obtenue sur une échelle de 1 à 7 (7 pour "tout à fait d'accord").

6.3.3 Discussion

Le principal résultat de cette expérience est que toutes les interfaces ont mené à une précision d'environ 95% de gestes réussis, ce qui satisfait (H1) et valide la faisabilité de la technique. Une limitation de l'expérience est qu'en raison de leur grand nombre (680), nous n'avons considéré qu'une sous-partie (42 gestes) de l'ensemble des gestes possibles. Cependant, nous avons testé la technique dans des conditions extrêmes. Non seulement nous avons utilisé une grille très dense, mais nous avons choisi des zones de départ et d'arrivée voisines. Ces deux caractéristiques sont susceptibles d'accroître les confusions parce que les gestes étaient plus semblables entre eux que s'ils portaient de grandes et lointaines régions. Dans l'usage réel, la plupart des utilisateurs utiliseront moins de gestes, de plus grandes zones (surtout au centre du pavé tactile) et favoriseront les zones les plus pratiques (comme par exemple, les zones dans les *Coins* et au *Milieu*).

Le *temps d'exécution* était d'environ une seconde et le *temps total de sélection* d'environ deux secondes pour toutes les interfaces, ce qui semble raisonnablement rapide puisque tous les participants utilisaient la technique pour la première fois. Bien qu'il soit difficile de comparer les études parce que les tâches et les dispositifs diffèrent, ces résultats semblent en phase avec les recherches antérieures sur les techniques de raccourcis. Par exemple, des *temps de sélection* d'environ 2200ms ont été obtenus pour des *Marking menus* utilisant une hiérarchie de 3×8 éléments et environ 2000ms pour les des *Zones* et *Polygon* menus de 16×16 éléments [83, 169]. Des temps plus courts ont été obtenus pour des menus plus petits (par exemple, environ 1300ms pour des *Marking menus* 2×8 [83] et 1517ms pour la technique *Swipe* dans [135]), mais ces résultats ne sont pas comparables car nous avons utilisé une configuration dense avec de petites zones proches les unes des autres. Les délais seraient probablement plus courts pour des configurations plus simples avec de grandes surfaces. A titre indicatif, les *Bezel menus*, qui peuvent être considérés comme une sorte de menu MarkPad avec de très grandes zones (infinies), ont

montré des *temps d'exécution* de 382ms pour des utilisateurs formés [73].

Comme prévu, les 14 gestes *courts* étaient plus rapides (environ 830ms de *temps d'exécution*) et devraient donc être favorisés pour les commandes fréquentes. Les gestes le long des frontières étaient également un peu plus rapides et offraient des taux de réussite légèrement meilleurs. Encore une fois, nous n'avons pas testé tous les gestes possibles mais, au cas où d'autres gestes seraient plus lents, cela ne devrait pas être un problème compte tenu du grand nombre de gestes disponibles. Enfin, il est intéressant de noter que les tâches auxiliaires d'*Entrée clavier* n'étaient pas désavantagées par rapport aux tâches de *Pointage*, bien que les doigts n'étaient pas déjà sur le pavé tactile dans le premier cas.

Contrairement à nos attentes, les interfaces *Visio-Tactile* et *Mixte* n'ont pas fourni un meilleur *taux de succès* ou *temps d'exécution* que l'interface *Visuelle*, ce qui réfute (H2). Nous pensions que les participants prendraient moins de temps à regarder le pavé tactile (H3) et effectueraient ainsi des gestes plus rapidement (H2). Alors qu'ils passaient moins de temps à regarder le pavé tactile et semblaient regarder moins ($p = 0.063$), le temps d'exécution n'était pas significativement différent. Cela peut être dû au fait que cette configuration était nouvelle pour les participants, ou parce que les marques tactiles ralentissaient légèrement leurs mouvements. Il est intéressant de noter que dans toutes les conditions, les participants ont été en partie capables d'interagir sans regarder le pavé tactile. Étant donné la façon dont le stimulus était affiché, ils devaient regarder deux fois le pavé tactile pour voir où étaient leurs doigts, mais le nombre moyen de coups d'œil se situait entre 1,72 et 1,84 selon l'état. Une analyse plus poussée a montré que c'est parce qu'ils terminaient les gestes sans regarder le pavé tactile dans ces cas.

Les participants semblaient préférer légèrement l'interface *Visio-Tactile* mais étaient également (légèrement) préoccupés par le fait que les marques tactiles pourraient être gênantes, en particulier au centre du pavé tactile. Cela suggère que le design *Mixte* pourrait être la meilleure alternative. Une autre option, que nous avons étudiée dans l'expérience suivante, consiste à n'utiliser des marques que sur la bordure du pavé tactile.

6.4 INTERFACES SIMPLIFIÉES

Le but de cette deuxième expérience est d'évaluer si des performances suffisantes peuvent être atteintes sans repères *Visuelle* ou *Visio-Tactile* au centre du pavé tactile. Nous comparons 4 conditions différentes : *Visio-Tactile Complète*, *Visio-Tactile Légère*, *Visuelle Légère*

et *Aucune*. *Visio-Tactile Complète* utilise la même interface *Visio-Tactile* que dans l'expérience précédente, et sert ainsi de référence. Nous avons choisi l'interface *Visio-Tactile* plutôt que l'interface *Visuelle* pour recueillir plus de résultats sur les sentiments des utilisateurs avec des repères tactiles. Les interfaces *Visio-Tactile Légère* et *Visuelle Légère* sont similaires à *Visio-Tactile* et *Visuelle* sauf qu'elles n'ont pas de marques au centre. Enfin, *Aucune* correspond au cas extrême où aucune marque n'est ajoutée au pavé tactile.

6.4.1 Protocole expérimental

Procédure. La procédure est la même que pour l'expérience précédente, sauf que nous menons l'expérience avec 16 participants droitiers (11 hommes, 5 femmes, âgés de 23 à 38 ans, aucun n'a participé à l'expérience précédente), et les faisons s'entraîner au préalable pendant 12 essais avec l'interface *Visio-Tactile Complète* afin qu'ils s'habituent à la technique.

Hypothèses. Nous faisons l'hypothèse que (H1) l'interface *Visio-Tactile Complète* conduit aux meilleurs taux de réussite et l'interface *Aucune* aux pires, et (H2) que les participants prennent plus de temps pour regarder le pavé tactile (et le font plus souvent) avec les interfaces *Visio-Tactile Légère* et *Visuelle Légère* qu'avec l'interface *Visio-Tactile Complète* car cette interface les aide à exécuter une partie de la tâche sans regarder.

6.4.2 Résultats

Le tableau 6.2 montre les résultats principaux de cette deuxième expérience. Ces résultats révèlent un effet de l'INTERFACE SUR le *taux de succès* ($F_{3,45} = 45.30, p < 0.01$), le *nombre de regards* dirigés vers le

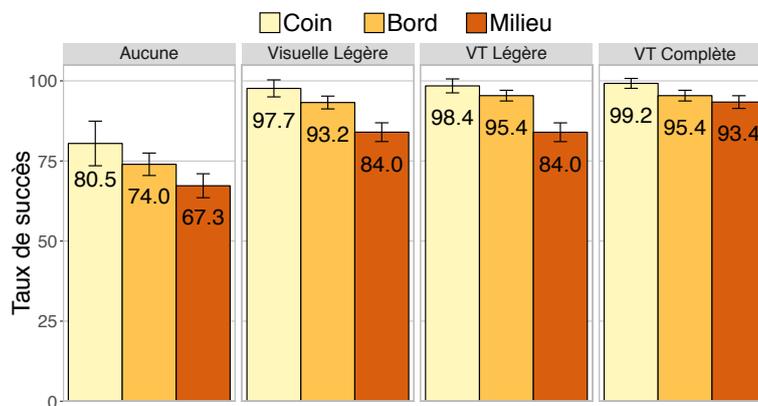


FIGURE 6.5 – Taux de succès par ZONE D'ARRIVÉE pour chaque INTERFACE.

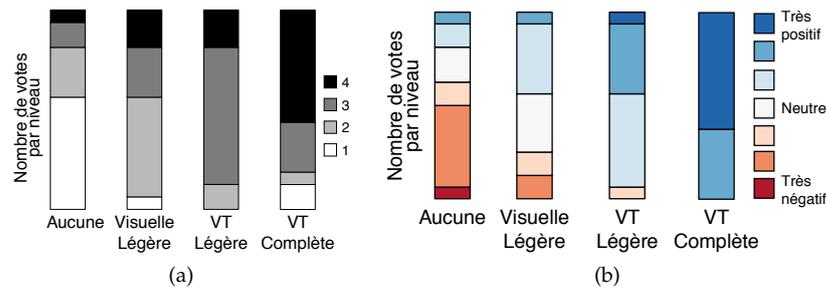


FIGURE 6.6 – (a) Classement de chaque INTERFACE pour une échelle de 1 à 4 (4 - meilleure). (b) Confiance de la performance en utilisant chaque INTERFACE sur une échelle de 1 à 7 (7 - entière confiance).

	<i>Aucune</i>	<i>Visuelle Légère</i>	<i>VT Légère</i>	<i>VT Complète</i>
Taux de succès (%)	71.56 ± 5.9	89.49 ± 4.3	90.53 ± 3.5	94.85 ± 2.3
Temps de complétion (ms)	2347 ± 284	2388 ± 337	2353 ± 220	2223 ± 161
Temps d'exécution (ms)	1161 ± 153	1215 ± 187	1232 ± 132	1144 ± 95
Nombre de regards	1.58 ± 0.22	1.91 ± 0.22	1.85 ± 0.19	1.76 ± 0.15
Durée des regards (%)	30.88 ± 4.2	36.08 ± 4.0	34.28 ± 4.3	34.15 ± 3.6

TABLEAU 6.2 – Résumé des résultats obtenus pour chaque interface au cours de la seconde expérience.

pavé tactile ($F_{3,45} = 10.48$, $p < 0.01$) et la *durée de ces regards* ($F_{3,45} = 2.97$, $p = 0.042$). Des tests t post-hoc montrent (1) que l'interface *Aucune* conduit aux pires résultats ($p < 0.01$ par rapport à toutes les autres) et l'interface *Visio-Tactile Complète* aux meilleurs résultats ($p = 0.011$ vs. les deux *Visuelle Légère* et *Visio-Tactile Légère*); (2) que les participants regardaient moins souvent le pavé tactile avec l'interface *Aucune* ($p < 0.01$ vs. *Visuelle Légère* et *Visio-Tactile Légère*; $p = 0.023$ vs. *Visio-Tactile Complète*), et moins souvent avec l'interface *Visio-Tactile Complète* qu'avec l'interface *Visuelle Légère* ($p = 0.047$); (3) que la *durée des regards* est plus courte pour l'interface *Aucune* que pour l'interface *Visuelle Légère* ($p < 0.01$, nous n'avons trouvé aucune autre différence significative entre les autres interfaces).

Un test ANOVA révèle également une interaction significative sur le *taux de succès* entre l'INTERFACE utilisée et la ZONE D'ARRIVÉE ($F_{6,90} = 3.32$, $p < 0.01$, Figure 6.5). En effet, des tests t post-hoc montrent que l'interface *Aucune* conduit aux pires taux de réussite pour chaque ZONE D'ARRIVÉE (p 's < 0.02), mais les aides au Milieu améliorent la précision des utilisateurs : 93.39% pour *Visio-Tactile Complète* vs. 83.99% pour *Visuelle Légère* et 83.97% pour *Visio-Tactile Légère* (Figure 6.5).

Nous avons aussi évalué à *quels moments* les utilisateurs regardaient le pavé tactile. Une ANOVA sur le pourcentage d'essais pour lesquels les utilisateurs ont regardé le pavé tactile alors qu'ils *relâchaient* leur doigt montre un effet de l'INTERFACE ($F_{3,45} = 9.51$, $p < 0.01$). Un test

t post-hoc révèle que l'interface *Aucune* nécessite moins de regards que les autres interfaces pour relâcher le doigt (48,13% des essais contre *Visuelle Légère* 69,79%, *Visio-Tactile Légère* 67,28%, et *Visio-Tactile Complète* 68,33%, tous $p's < 0.01$).

Questionnaire. Un test t de Wilcoxon non paramétrique révèle que l'interface *Aucune* a été perçue comme la pire (tous $p's < 0.01$ sauf pour *Visuelle Légère* $p = 0.016$), comme le montre la Figure 6.6. Davantage de tests t montrent des différences pour le *taux de réussite* et le *niveau de confiance*. *Visio-Tactile Complète* atteint le meilleur taux de réussite (vs. *Aucune* et *Visuelle Légère* $p < 0.01$, vs. *Visio-Tactile Légère* $p = 0.024$), et *Visio-Tactile Légère* est perçue comme étant plus efficace que *Visuelle Légère* ($p = 0.024$) et *Aucune* ($p < 0.01$). Un test t sur le *niveau de confiance* montre que les participants se sentaient plus en confiance avec *Visio-Tactile Complète* qu'avec les autres interfaces, et avec *Visio-Tactile Légère* qu'avec *Visuelle Légère* et *Aucune* (tous $p's < 0.01$, comme le montre la Figure 6.5).

6.4.3 Discussion

Cette expérience montre que des marques sont nécessaires pour obtenir un bon *taux de succès*, du moins en utilisant une configuration dense, ce qui valide (H1). Ne pas utiliser de marques du tout (interface *Aucune*) mène à de mauvais résultats (71,6%), mais seulement utiliser des marques sur les bords du pavé tactile (interfaces *Visio-Tactile Légère* et *Visuelle Légère*) mène à des résultats acceptables (environ 90%). Comme les erreurs pour les interfaces *légères* proviennent principalement des gestes qui se terminent au centre, ceci suggère que ces dernières configurations donneraient des taux de réussite satisfaisants avec des zones moins nombreuses et plus grandes au centre du pavé tactile.

Il est intéressant de noter que le *taux de réussite* est plus élevé pour les zones au *Milieu* avec les interfaces *Visio-Tactile Légère* et *Visuelle Légère* qu'avec l'interface *Aucune*, bien que ces interfaces soient identiques (pas de marques) au centre. Une raison probable est que les participants ont utilisé les marques sur la bordure pour deviner l'emplacement des zones au centre du pavé tactile. De plus, nous avons remarqué que la façon dont ils commencent les gestes était très importante. Les marques sur la frontière ont non seulement aidé les participants à partir de la bonne zone, mais aussi à placer leur doigt correctement au centre de cette zone. Ceci réduit les erreurs lors du déplacement du doigt vers la zone terminale car le doigt a tendance à "dériver". Par conséquent, les erreurs sont moins probables si le doigt est bien positionné au début du geste.

Les participants regardaient moins le pavé tactile avec l'interface *Aucune* car ils n'avaient pas de marques pour s'aider. Nous n'avons pas trouvé de différences significatives sur la *durée des regards* et le *temps d'exécution* entre les interfaces *Visio-Tactile Complète*, *Visio-Tactile Légère*, et *Visuelle Légère*. Cependant, les interfaces composées d'aides *tactiles* étaient plus confortables pour les utilisateurs puisqu'ils se sentaient plus confiants dans leur utilisation. Comme pour l'expérience précédente, les marques tactiles semblent aider les utilisateurs, ce qui valide en partie (H2), mais une expérience longitudinale avec des utilisateurs expérimentés serait nécessaire pour mesurer cet effet avec plus de précision.

6.5 CONFLITS AVEC LE POINTAGE

Les surfaces sensibles au toucher sont conçues principalement pour le pointage. Les techniques basées sur des gestes partant des contours de ces surfaces comme [82, 124] et MarkPad se reposent sur l'hypothèse que les utilisateurs ne commencent pas à pointer depuis le bord de la surface. Cependant, ils peuvent accidentellement toucher le bord de temps en temps. En particulier, en raison de l'emplacement du clavier sur un ordinateur portable, il se peut qu'ils glissent par inadvertance sur le pavé tactile lorsqu'ils déplacent leurs mains pour utiliser le clavier.

C'est pourquoi nous avons mené une étude pour estimer la fréquence à laquelle les utilisateurs effectuent des gestes à partir des bords dans des situations réelles. Il est important de noter que les participants n'avaient aucune connaissance de la technique MarkPad et qu'ils ne savaient pas pourquoi l'étude était réalisée. Comme les utilisateurs adaptent leur comportement en utilisant MarkPad, les résultats obtenus peuvent être considérés comme une limite supérieure du nombre d'activations involontaires possibles.

En plus des gestes MarkPad joignant deux zones différentes sur le pavé tactile (ici appelé "*Segments*"), nous avons également pris en compte les gestes directionnels utilisés pour les *Marking menus* (appelés "*Directions*"), tous à partir du bord du pavé tactile. Après avoir collecté les données, nous avons calculé combien de gestes auraient été détectés, en fonction de deux facteurs variables : la *taille du bord* (W sur la Figure 6.7) et la *taille minimale* des gestes.

Nous avons utilisé la même configuration ($7 \times 5 = 35$ zones) que dans les expériences précédentes (Figure 6.7). La largeur des 20 zones de bordure (en bleu dans la figure), ou leur hauteur pour les bordures supérieure et inférieure, dépend de la *taille de la bordure* définie. Les *Directions* peuvent commencer à partir de n'importe laquelle de ces zones et se terminer n'importe où, à condition qu'elles soient plus

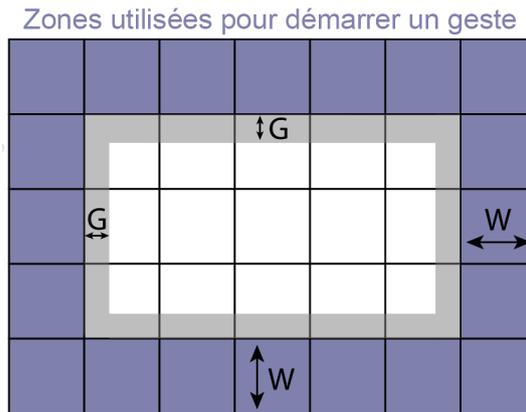


FIGURE 6.7 – Configuration du pavé tactile utilisée dans notre étude (W est la *taille de la bordure*, et G la *séparation* entre les zones de départ et les zones centrales).

longues que la *longueur minimale* définie. Les petits gestes sont ignorés et n'auraient donc aucun effet dans les applications réelles. Les mêmes règles s'appliquent pour les *Segments*, sauf que, par construction, ils ne peuvent pas commencer et se terminer dans la même zone.

Procédure. Nous avons réalisé une étude sur 12 utilisateurs droitiers (8 hommes, 4 femmes) qui a duré une semaine. Ceux-ci ont tous utilisé leur propre Macbook avec un pavé tactile intégré de 105×76 mm. Nous avons conçu un logiciel pour détecter les mouvements des doigts de l'utilisateur sur son pavé tactile, et les enregistrer. Les données recueillies comprennent le nombre de doigts en contact avec la surface, leur emplacement et leur taille. Nous avons recueilli un total de 1 547 680 gestes, avec une durée moyenne des gestes d'environ 600ms.

Analyse. Après avoir collecté les données, nous avons calculé quels gestes auraient été détectés en tant que *Direction* ou *Segment* pour une *taille de bord* entre 1 et 15 mm et une *taille minimale* de geste entre 1 et 9 mm. Les résultats sont donnés sous forme de pourcentages de *Directions* ou *Segments* par rapport au nombre total de "gestes" détectés sur le pavé tactile. Un "geste" consiste en un toucher suivi d'un relâchement. Dans cette étude, nous n'avons considéré que les gestes à un seul doigt. A fin de comparer, nous avons également évalué le nombre de *Touchers* détectés dans la zone frontalière (c.à-d. une tolérance de 1 mm pour la taille du geste et une durée maximale de contact avec le pavé tactile de 250 ms).

		Taille de la bordure (en mm)														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1.86	3.01	3.58	3.98	4.27	4.57	4.91	5.39	5.95	6.57	7.33	8.19	9.18	10.36	11.73	
	0.71	0.94	0.98	1.07	1.15	1.25	1.42	1.71	2.06	2.48	3.03	3.66	4.38	5.22	6.22	
3	0.65	1.14	1.44	1.69	1.88	2.11	2.37	2.79	3.27	3.82	4.50	5.26	6.15	7.22	8.47	
	0.44	0.65	0.75	0.87	0.96	1.08	1.25	1.53	1.88	2.31	2.85	3.47	4.17	5.00	6.00	
5	0.41	0.70	0.91	1.12	1.27	1.46	1.70	2.09	2.55	3.07	3.72	4.44	5.29	6.32	7.52	
	0.34	0.54	0.65	0.77	0.86	0.97	1.14	1.43	1.78	2.20	2.73	3.33	4.03	4.86	5.84	
7	0.34	0.56	0.71	0.87	1.00	1.18	1.41	1.79	2.23	2.72	3.34	4.03	4.85	5.84	6.99	
	0.29	0.47	0.57	0.69	0.78	0.89	1.06	1.35	1.70	2.11	2.62	3.21	3.89	4.70	5.66	
9	0.30	0.47	0.60	0.73	0.84	1.01	1.23	1.59	2.01	2.50	3.10	3.77	4.57	5.52	6.63	
	0.27	0.42	0.52	0.64	0.72	0.84	1.01	1.29	1.63	2.03	2.54	3.11	3.79	4.58	5.53	

TABLEAU 6.3 – Détection des gestes *Directions* et *Segments* en prenant en compte la *taille de la bordure* et leur *taille minimale*.

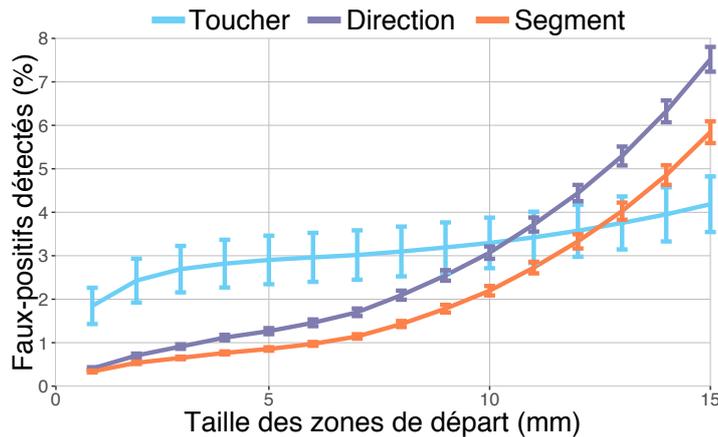


FIGURE 6.8 – Pourcentage de *Touchers* (bleu), *Directions* (violet) et *Segments* (orange) par rapport à la *taille du bord* pour une *taille minimale de geste* de 5 mm.

6.5.1 Résultats

Comme on peut le voir sur la Figure 6.8 et le Tableau 6.3, peu de gestes ont été détectés (au moins pour des valeurs raisonnables de *taille minimale* de gestes et de bordure) bien que les participants n'étaient pas au courant des techniques. Cela signifie que les utilisateurs utilisent rarement les bords du pavé tactile, du moins lorsque celui-ci est relativement grand (105×76 mm), une tendance courante sur les ordinateurs portables.

Les *Segments* MarkPad ont été moins souvent détectés que les *Directions*. Par exemple, pour une *taille minimale* de 5 mm, la différence était d'environ 20 % pour une *taille de bord* de 1 mm, puis a atteint un maximum de 50 % pour 6 mm et, finalement, a diminué pour atteindre 29 % pour une largeur de 15 mm. Cette différence augmente (fortement) pour les valeurs plus petites de la *taille minimale* et diminue pour les valeurs plus grandes. La raison de cette différence est que les *Segments* ne peuvent pas se terminer dans la zone d'où ils sont partis, ils intègrent donc par défaut une *taille minimale de geste* qui varie suivant la direction de celui-ci. En d'autres termes un *Segment* peut-être considéré comme une *Direction*, mais pas l'inverse.

Comme on peut s'y attendre, la *taille minimale de geste* et la *taille du bord* ont un fort impact sur les résultats. Augmenter la *taille minimale de gestes* pour réduire le nombre de gestes détectés peut être problématique car les utilisateurs peuvent penser que la technique n'est pas réactive ou mal calibrée si aucune action n'a lieu. À cet égard, une longueur d'environ 5 mm peut être un compromis raisonnable. À l'inverse, une réduction trop importante de la *taille du bord* peut conduire à des erreurs de détection. Les utilisateurs expérimentés, qui exécuteront les gestes rapidement, sans prêter attention parce

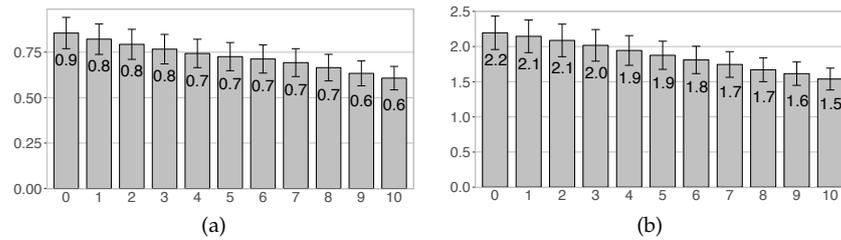


FIGURE 6.9 – Impact de la taille de la *séparation* (en mm) sur la détection de gestes (en %). (a) Taille du bord = 5 mm. (b) Taille du bord = 10 mm).

qu'ils sont concentrés sur leur tâche principale, peuvent ne pas commencer les gestes à partir du bord du pavé tactile et manquer la zone active. Par conséquent, cette valeur devrait probablement dépendre des habitudes et des préférences de l'utilisateur. Comme nous l'expliquerons dans la section suivante, deux utilisateurs ont utilisé cette technique pendant environ 2 ans. Après plusieurs tests, ils ont décidé d'utiliser des valeurs comprises entre 3 et 4 mm, ce qui est suffisant pour assurer une bonne précision.

En analysant davantage les données, nous avons remarqué que beaucoup de gestes détectés se terminaient au centre, près de leur zone de départ. Nous avons donc ajouté une *séparation* entre les zones des bords et les zones centrales (Figure 6.7) pour voir si cela améliorerait les résultats. La Figure 6.9 montre les résultats pour une *séparation* variant de 0 à 10 mm avec une *taille de bord* de 5 ou 10 mm et une *taille minimale de geste* de 5 mm. Comme on peut le constater, cette solution a un effet positif.

6.5.2 Discussion

Notre analyse des données d'utilisation du pavé tactile montre que les utilisateurs utilisent rarement les bords de celui-ci, même lorsqu'ils ne sont pas au courant de la technique. Pour cette raison, et aussi parce que nous évaluons le cas extrême où un utilisateur utilise toute la surface de son pavé tactile pour déclencher des actions, les taux de détection obtenus doivent être considérés comme une limite supérieure stricte du nombre d'activations involontaires possibles. La *taille minimale des gestes* devrait être petite, pour éviter de rendre l'interaction désagréable, mais pas trop petite, pour éviter les activations involontaires. Une longueur d'environ 5 mm semble un bon compromis. En considérant cela, le taux de détection pour les gestes MarkPad (les *Segments*) était respectivement de 0,34 %, 0,86 %, 2,20 % pour une *taille de bord* de 1, 5, 10 mm. En utilisant une *séparation* de 10 mm entre les zones de départs et les zones centrales, ces valeurs ont diminué à

0.22 %, 0.61 %, 1.54 %. Cet écart nécessite des gestes plus longs, mais seulement vers le centre.

Les tailles de bord peuvent varier grandement entre un utilisateur novice et un utilisateur expert (voir section suivante). Alors que nous avons effectué nos deux premières expériences avec une *taille de bords* de 10 mm, nous avons remarqué qu'en utilisant les mêmes données, les taux de succès étaient presque les mêmes (environ 1% plus bas) pour une *taille de bords* de 8 mm. Ainsi, 8 mm peut être une bonne valeur par défaut (le taux de détection est alors de 1,03% pour un écart de 10 mm). Or, un utilisateur expert peut diminuer encore plus cette taille pour arriver à 3 ou 4 mm (comme c'est le cas des deux utilisateurs sur le long terme), et ainsi ne plus avoir de problème d'activations involontaires.

6.6 PROTOTYPE ET USAGE

MarkPad a été implémenté sur MacOS et s'appuie sur différents mécanismes (appels système, AppleScript, génération de raccourcis clavier ou d'événements, API privée MacOS *multitouch*) pour effectuer toutes les actions mentionnées jusqu'à présent. Ce programme est générique en ce sens qu'il peut lancer n'importe quelle application, exécuter presque n'importe quelle commande et ouvrir n'importe quel document (à condition qu'une application permette de l'afficher). Il peut également envoyer des messages à d'autres applications via une connexion TCP/IP. Le prototype fonctionne comme une tâche de fond et consomme très peu de CPU, et uniquement lors de l'exécution d'actions de raccourcis ou lorsque l'utilisateur interagit avec le pavé tactile (environ 0,5-1% de charge CPU sur un MacBook Pro 3 GHz Core i7).

Le prototype a été utilisé régulièrement pendant une période d'environ 2 ans par ses deux concepteurs principaux. Il est intéressant de noter que ces deux utilisateurs ont utilisé le prototype différemment à bien des égards. Bien qu'ils aient tous deux créé des raccourcis et des menus pour accéder à leurs applications et documents préférés (principalement des pages Web), ils ne les ont pas organisés de la même manière et n'ont pas mis l'accent sur les mêmes actions. Par exemple, comme le montre la Figure 6.10-b, un utilisateur a créé des raccourcis gestuels pour remplacer les raccourcis clavier communs (copier, coller, etc.) qui permettaient un copier-coller rapide sans clavier [26], tandis que l'autre utilisateur continuait à utiliser des raccourcis clavier standard. A l'inverse, le second utilisateur a créé un menu pour contrôler iTunes et son environnement multimédia domestique (Figure 6.10-a).

Menus thématiques. Les deux utilisateurs ont créé un menu pour ouvrir les applications les plus fréquemment utilisées. Ce menu a été

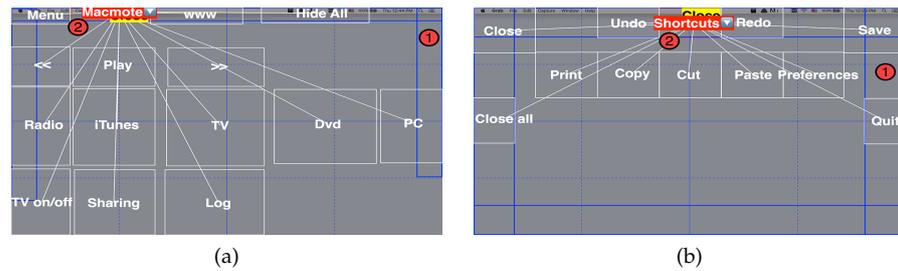


FIGURE 6.10 – Exemples de menus utilisés initialement par les concepteurs (première version de MarkPad). Les cercles rouges (2) indiquent le nom du menu actuellement sélectionné. Les cercles (1) montrent où les zones de départ peuvent être placées (dans les rectangles bleus), en accord avec les préférences des utilisateurs. Les bords des zones de raccourcis sont seulement affichés en mode édition pour éviter d'obstruer l'écran.

jugé particulièrement utile parce qu'il permettait de passer rapidement d'une application à une autre. De plus, l'activation d'une application deux fois en séquence la fait disparaître, ce qui permet de "jeter un coup d'œil" sur une application (par exemple en regardant rapidement le calendrier ou le courrier). Ces menus contenaient de raccourcis permettant d'exécuter le même type d'actions (par exemple, lancer des applications). Or un menu peut contenir des actions de différents types, comme c'est le cas du menu multimédia (Figure 6.10-a) qui contient des raccourcis pour ouvrir des pages Web (une interface Web) et des applications (iTunes), activer des commandes (*play/pause*, *next/previous*), ou envoyer des commandes à une application distante (pour allumer le téléviseur, etc.). Ceci souligne le fait que les utilisateurs ne sont pas obligés de grouper les actions en fonction du type d'opération qu'elles effectuent, mais qu'ils peuvent regrouper dans un même menu des actions ayant des effets différents, par exemple pour créer des menus thématiques.

Positionnement des zones. Les zones ont été positionnées de manières très différentes par les deux utilisateurs. Par exemple, un utilisateur aimait utiliser des zones sur le bord inférieur du pavé tactile, mais l'autre utilisateur a trouvé cela gênant et n'a jamais utilisé de telles zones, probablement en raison de la façon dont il place ses mains sur le pavé tactile et le clavier. Une autre différence remarquable (Figure 6.10) est qu'un utilisateur aimait utiliser les zones du centre du pavé tactile, tandis que l'autre utilisateur utilisait principalement les zones situées le long ou à proximité des bordures. On peut de même remarquer que les tailles des zones étaient différentes pour les deux utilisateurs. Initialement, ils utilisaient des *Directions* à partir de certaines zones (une possibilité offerte par le logiciel), mais n'ont finalement utilisé que des gestes MarkPad par souci d'espace, car ceux-ci nécessitent d'utiliser moins de zones de départ.

Guides passifs. Les deux utilisateurs ont utilisé des marques visuelles ou visio-tactiles sur la bordure, mais aucune au centre du pavé tactile par souci pratique. Un utilisateur a utilisé du ruban adhésif transparent presque invisible, tandis que l'autre préférait des marques blanches comme celles illustrées à la Figure 6.1. Les deux utilisateurs se basaient sur des marques d'environ 5,5–8,5 mm de largeur en bordure pour localiser les autres zones (c'est-à-dire les zones sans marque vers le centre du pavé tactile). Ils ont principalement utilisé le mode expert, ce qui est cohérent avec le fait qu'ils aient créé leurs propres raccourcis et menus. Ces différentes stratégies mettent en évidence les nombreuses possibilités offertes par la technique et l'importance de la personnalisation.

Editeur de gestes. Nous avons développé un éditeur de raccourcis pour éditer des *Segments* (gestes MarkPad) et des *Directions* (gestes *Marking menus*), et y associer les actions décrites jusqu'à présent (Figure 6.10). Cet éditeur peut être invoqué en cliquant sur l'icône MarkPad dans la barre de menu MacOS ou en appuyant sur une combinaison de touches personnalisable. Il peut aussi être invoqué lorsque l'utilisateur sélectionne un menu en commençant un geste, et appuie sur la touche *Shift* pour éditer ce menu. Diverses actions (telles que la génération de raccourcis clavier communs) sont prédéfinies et ne nécessitent qu'une sélection dans un menu. L'ouverture d'applications, de scripts ou de documents est presque aussi simple : l'utilisateur n'a qu'à sélectionner l'action correspondante dans un menu et coller ou taper l'URL ou le nom de la commande.

Enfin, une autre question importante est le coût des erreurs (p.ex. fermer la mauvaise application), ce qui peut se produire de temps à autre. Ce problème est déjà pris en compte en affichant rapidement le nom de la commande activée sur l'écran après avoir effectué un geste, afin que l'utilisateur puisse savoir quelle commande il a déclenchée. Cependant, un mécanisme d'historique plus sophistiqué serait utile pour récupérer le geste qui a été effectué et, idéalement, annuler des actions non désirées. De plus, l'interface d'édition pourrait guider l'utilisateur pour l'aider à choisir des gestes qui sont très peu susceptibles d'être déclenchés involontairement pour l'activation de commandes dangereuses.

6.6.1 Améliorations

Plusieurs améliorations ont été apportées au logiciel au cours de son développement. Nous présentons ici celles qui nous semblent les plus pertinentes.

Guides. Pour aider l'utilisateur à éditer des gestes, nous lui proposons des emplacements et des tailles de zones prédéfinis (Figure

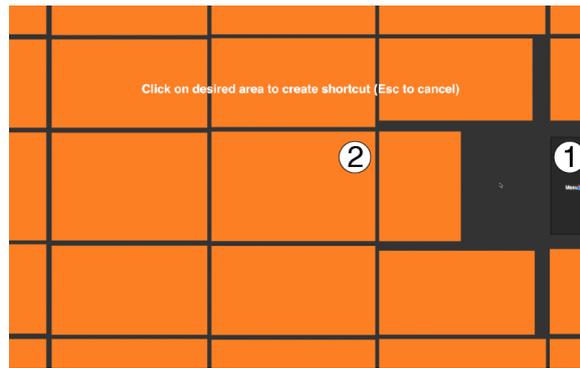


FIGURE 6.11 – Zones d'arrivée prédéfinies (en orange (2)) permettant à l'utilisateur de créer un geste MarkPad en seulement deux cliques (sélection de la zone de départ (1), et de la zone d'arrivée).

6.11). Ainsi, il lui suffit de cliquer sur une zone de départ puis une zone d'arrivée pour créer un geste, ce qui évite des manipulations interactives fastidieuses. Autrement dit, nous proposons des sortes de "pochoirs" à l'utilisateur pour lui indiquer des zones précises, ce qui permet à la fois de faciliter la création de gestes et d'assurer qu'ils soient faciles à exécuter sans erreur. Ces guides peuvent être modifiés si l'utilisateur le souhaite au moyen de l'éditeur intégré.

Presse-Papier. Les actions copier et coller sont très couramment utilisées lors de l'utilisation d'un ordinateur. Par défaut elles copient non seulement le texte mais aussi le *style* du texte, ce qui n'est pas toujours ce que souhaite l'utilisateur. Certaines applications permettent la copie sans style, mais, lorsqu'ils existent, les raccourcis clavier sont non triviaux et ils diffèrent selon les applications. Nous avons implémenté des actions qui permettent de copier/coller avec ou sans style quelle que soit l'application. MarkPad permet ainsi d'effectuer ces différentes actions en utilisant toujours les mêmes gestes sans avoir à se soucier de ces différences.

D'autres actions génériques ont été implémentées pour s'affranchir des particularités des différentes applications. Un exemple typique est *Undo*, dont le raccourci clavier diffère suivant qu'il s'agit d'une application implémentée par Microsoft ou Apple. MarkPad permet là encore de s'affranchir de ces différences.

Données cohérentes. Le design des gestes MarkPad favorise l'utilisation de la mémoire spatiale pour mémoriser les gestes. Utiliser des gestes pour sauvegarder un ensemble de données permet donc à l'utilisateur d'associer une position sur le pavé tactile à cet ensemble. Il peut vouloir par exemple stocker des mots de passe, ou avoir besoin de copier plusieurs ensembles de données en même temps (c.à-d. utiliser plusieurs presse-papier), ce qui ne fait pas partie des fonctionnalités de base d'un ordinateur actuel. Nous avons implémenté des actions MarkPad qui permettent à l'utilisateur de sauvegarder et ré-

cupérer des informations persistantes au moyen de gestes. L'utilisateur peut ainsi stocker des mots clés souvent utilisés (par exemple des mots de passe ou des adresses email) ou encore interagir avec plusieurs *presse-papiers*.

Redimensionnement. Pour faciliter le redimensionnement des fenêtres d'applications, nous avons programmé des actions à l'aide du langage AppleScript. Ces scripts permettent à l'utilisateur de redimensionner la fenêtre active automatiquement à une dimension donnée, pour qu'elle soit affichée par exemple en plein écran, ou sur la moitié droite ou gauche de l'écran. Les gestes MarkPad ont dans ce cas l'avantage d'utiliser des zones d'arrivée qui peuvent correspondre à l'endroit où sera affichée la fenêtre sur l'écran, ce qui aide l'utilisateur à mémoriser le geste. De plus, cette fonctionnalité est particulièrement intéressante pour le système d'exploitation Mac OS X, car celui-ci ne propose pas de dimensions de références pour redimensionner facilement des fenêtres (comme le fait Windows 10 en glissant une fenêtre sur un bord de l'écran par exemple).

Interface Utilisateur. Des changements ont aussi été apportés sur l'interface utilisateur du prototype, pour, entre autres, rendre plus facile d'accès la création de gestes. Nous avons essayé d'épurer au maximum cette interface, ainsi que faciliter le choix des actions en utilisant des onglets pour les catégoriser (actions impliquant des applications, des liens webs, etc...). Malgré nos efforts, certaines fonctionnalités restent difficiles à faire comprendre à des utilisateurs novices n'ayant pas de connaissances en informatique (p.ex. la notion de presse-papier), ce qui est un frein à l'apprentissage d'un tel logiciel, mais un sujet très intéressant en soit.

6.7 ETUDE LONGITUDINALE

Le prototype MarkPad n'avait été initialement étudié qu'à travers l'utilisation de ses concepteurs. Pour mieux comprendre comment des utilisateurs novices manipulent un tel logiciel, nous avons souhaité étudier leurs comportements au cours d'une étude longitudinale. L'intérêt d'une telle étude est de voir dans quelle mesure un ensemble d'utilisateurs peut s'approprier le concept proposé et utiliser efficacement des interactions gestuelles dans leur environnement habituel de travail sans que ceci ne perturbe leurs tâches habituelles.

Comme nous avons pu le voir avec les gestes définis par les concepteurs, la façon dont ceux-ci sont définis et utilisés peut largement varier d'un utilisateur à un autre. Nous souhaitons ainsi (1) mieux comprendre quelles stratégies adoptent les utilisateurs pour définir des gestes, (2) étudier la façon dont ils effectuent ces gestes, et (3) étu-

dier les changements qu'ils apportent à leurs configurations au cours du temps.

Cette étude a été faite en collaboration avec une équipe d'ergonomes de Télécom ParisTech, composée de Stéphane Safin (maître de conférences) et Yanis Mendi (étudiant en première année de master). Ils étaient les principaux moteurs de cette étude, et voulaient à l'aide de MarkPad, comprendre comment des utilisateurs s'approprieraient un tel logiciel et de tels gestes. Yanis Mendi s'est chargé de la relation avec tous les participants, c'est donc lui qui s'est occupé de familiariser les participants avec le logiciel, et de mettre en place les entretiens au cours de l'étude. Il est important de souligner qu'il n'était pas proposé aux utilisateurs d'utiliser de marques au cours de l'étude et que ceux-ci, étant novices, n'ont utilisés qu'une petite partie des fonctionnalités offertes par MarkPad. Cette étude se focalise donc sur une version plus légère du logiciel, ce qui influence les observations détaillées ci-dessous.

6.7.1 *Protocole expérimental*

Participants. Nous avons demandé à 6 participants (cinq hommes et une femme) âgés de 23 à 39 ans de participer à cette expérience. Un des participants était un étudiant en master d'ergonomie (P4), deux d'entre eux étaient des doctorants en ergonomie (P1-P3), deux autres des doctorants en IHM (P5-P6), et enfin le dernier un maître de conférences en IHM (P2).

Appareil. Tous les participants utilisaient des Macbooks Pro avec un pavé tactile intégré. La taille de ces pavés tactiles variaient d'un participant à l'autre, entre 105×76 cm (P2-P4-P5-P6) et 131.6×80.16 cm (P1-P3). Un des participants a précisé qu'il utilisait parfois un pavé tactile externe, ce qui change la taille de la surface d'interaction, mais ne pose pas de problème pour détecter les gestes. Les participants étaient tous des utilisateurs du système d'exploitation Mac OS X depuis au moins deux ans.

Durée et Entretiens. Cette étude s'est déroulée entre un et deux mois (moyenne = 44.2 jours, $\sigma = 17.5$). Le concept MarkPad était d'abord introduit aux participants à l'aide d'un premier entretien avec l'expérimentateur. Les différentes interactions possibles pour effectuer et créer des gestes étaient abordées, ainsi que les concepts de modes novice et expert. A la fin de cet entretien, plusieurs ensembles de gestes prédéfinis étaient proposés aux participants pour qu'ils n'aient pas à créer plusieurs gestes dès le début, et qu'ils puissent s'inspirer d'exemples pour définir leurs propres gestes. Ils devaient alors choisir un de ces ensembles pour commencer à utiliser le logiciel. Ces ensembles étaient composés d'actions courantes sur un Macbook

TABLEAU 6.4 – Nombre de menus et de gestes définis par les utilisateurs pour les configurations initiales (i) / finales (f) utilisées.

Participants	Nombre de menus (i/f)	Nombre de gestes (i/f)
P1	6/1	29/6
P2	5/5	34/36
P3	5/4	23/12
P4	5/5	12/15
P5	5/5	27/25
P6	5/3	31/12

comme ouvrir les applications principales (p.ex. Mail, Safari), déclencher des raccourcis clavier (p.ex. copier, coller), ou encore accéder à des liens sur le Web.

Après le premier entretien, les participants étaient laissés en autonomie pendant une période d'environ deux semaines (moyenne = 14,2 jours, $\sigma = 4.72$). A l'échéance de cette période, un second entretien était réalisé pour discuter avec les participants des problèmes qu'ils avaient rencontrés, et des stratégies adoptées pour créer des gestes (seul P5 n'a pas eu cet entretien par souci pratique). En général, cet entretien était important pour comprendre comment les participants définissaient leurs gestes (c.à-d. le placement des zones de départ et d'arrivée), et comprendre leurs besoins en matière d'actions utilisées (p.ex. ouverture de pages web, d'applications, de dossiers). Il nous a aussi permis de guider les participants qui avaient du mal à utiliser le logiciel ou n'arrivait pas à régler certains problèmes comme les activations involontaires (voir la partie *Observations*). Un nouvel entretien était ensuite effectué toutes les deux semaines avec les participants (sauf en cas d'indisponibilité).

Enregistrement des données. Nous avons intégré au logiciel MarkPad un programme pour enregistrer les mouvements des utilisateurs sur le pavé tactile, ainsi que les modifications apportés à la configuration des gestes. Ce programme n'enregistrait que les gestes susceptibles d'être reconnus comme des gestes MarkPad, c'est-à-dire les gestes démarrant d'une zone de départ existante. Nous enregistrions pour ces gestes la zone de départ où le geste était initié, la trace du mouvement, la durée du mouvement, si le geste était effectué en mode novice, et enfin la zone d'arrivée où se terminait le geste et l'action résultante. Le programme enregistrait l'état complet de la configuration utilisateur dès que celui-ci la modifiait.

TABLEAU 6.5 – Changements apportés par les participants aux différentes configurations en étant **supervisé** par un expérimentateur, ou **non-supervisé**. Les différents changements possibles sont l’ajout (A), la suppression (S), le redimensionnement/repositionnement (R) d’une zone de départ (Menu) ou d’une zone d’arrivée (Raccourci). L’action ou le nom d’un raccourci peut aussi être modifié (M) sans pour autant changer la zone d’arrivée.

Ps	Type (nombre)	Menus			Raccourcis			
		A	S	R	A	S	R	M
P1	Supervisé (3)	0	1	1	1	1	1	0
	Non-supervisé (4)	1	5	0	7	30	3	2
P2	Supervisé (1)	0	0	1	0	0	1	0
	Non-supervisé (5)	0	0	6	2	0	0	1
P3	Supervisé (2)	0	1	4	0	8	0	1
	Non-supervisé (7)	0	0	9	0	3	15	0
P4	Supervisé (1)	1	1	0	5	3	0	1
	Non-supervisé (4)	0	0	0	1	0	0	0
P5	Supervisé (0)	-	-	-	-	-	-	-
	Non-supervisé (3)	0	0	3	0	0	15	2
P6	Supervisé (1)	0	0	1	0	1	5	0
	Non-supervisé (5)	0	2	1	3	21	10	1
Tous	Supervisé (8)	1	3	6	6	12	2	2
	Non-supervisé (28)	1	7	19	13	54	43	6

6.7.2 Observations

Nombre de menus. La première observation est que dans l’ensemble les participants n’ont pas eu besoin d’utiliser davantage de menus que dans la configuration initiale qu’ils avaient choisie. Trois participants ont réduit le nombre de menus utilisés au cours de l’étude (deux légèrement, un radicalement en passant de 6 à 1 menu). Les trois autres ont gardé ce nombre constant (Tableau 6.4). Ceci peut indiquer qu’un ensemble modéré de zones de départ suffit à des utilisateurs novices pour profiter des fonctionnalités de MarkPad, d’autant que seulement deux menus ont été créés au cours de l’étude (Tableau 6.5). En comparaison les utilisateurs experts en utiliseraient davantage, comme le suggère l’utilisation du prototype par ses concepteurs (c.à-d. 7 et 10 menus).

D’autres explications sont aussi possibles, comme par exemple l’effort supplémentaire nécessaire pour découvrir toutes les fonctionnalités disponibles ou créer de nouveaux menus, ou encore la crainte

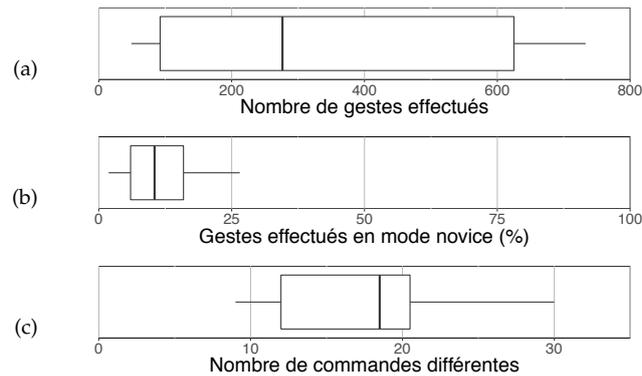


FIGURE 6.12 – Statistiques des gestes effectués par tous les utilisateurs. (a) Nombre de gestes ayant déclenchés des actions. (b) Pourcentage de ces gestes effectués à l’aide du mode novice. (c) Nombre de commandes différentes utilisées au cours de l’étude (p.ex. ouvrir une application, ou un lien web).

qu’un nombre plus important de menus provoque des erreurs ou des activations involontaires. Il faut à nouveau souligner que les participants n’utilisaient pas de marques, ce qui rend difficile l’utilisation de plusieurs menus.

Autonomie. Une deuxième observation intéressante est que les utilisateurs ont su personnaliser les gestes selon leurs besoins. Ils ont en effet modifié leurs configurations, principalement en autonomie, c’est à dire sans être supervisé par un expérimentateur, comme le montre le tableau 6.5. Ces modifications concernaient principalement la suppression de raccourcis qu’ils jugeaient inutiles pour leurs propres besoins (54 pour tous les participants), et leur redimensionnement/repositionnement (43). De plus, pour éviter les activations involontaires, les participants ont aussi plusieurs fois redimensionné/repositionné les menus (zones de départ, 19).

Statistiques des gestes. Quelques statistiques relatives aux gestes enregistrés sont intéressantes à étudier. Dans l’ensemble, une moyenne de 351.20 ($\sigma = 309.15$) gestes ont été effectués (Figure 6.12-a) à l’aide de MarkPad, ce qui montre que certains participants ont beaucoup utilisé les gestes MarkPad alors que d’autres les ont peu utilisés (écart-type élevé). En moyenne, 11.93 % ($\sigma = 8.95\%$) des gestes étaient effectués en utilisant le mode novice (Figure 6.12-b). Les participants ont donc souvent eu recours au mode expert pour effectuer leurs gestes, et certains n’ont presque même pas utilisé le mode novice (à nouveau, écart-type élevé). Enfin, une moyenne de 17.83 ($\sigma = 7.73$) commandes différentes ont été utilisées par les participants au cours de l’étude (p.ex. ouvrir une application, ou un lien web). Les types d’actions les plus couramment utilisés étaient l’ouverture de liens web (33 % des gestes), l’ouverture d’applications (27.33 %), et le redimensionnement de la fenêtre active en plein écran (18.56 %)¹. Nous pouvons conclure

1. Il faut souligner que ce résultat dépend principalement des utilisateurs ayant effectué un grand nombre de gestes

avec ces résultats que dans l'ensemble les participants ont su s'approprier le logiciel dans leur environnement de travail.

Activations involontaires. Nous avons décrit dans la partie précédente une étude focalisée sur le nombre maximum d'activations involontaires pouvant être déclenchées avec différentes configurations. Il nous est impossible de mesurer ce nombre avec les données de cette étude de terrain, car nous ne connaissons pas l'intention d'un participant pour un geste donné. On ne peut donc pas savoir s'il a déclenché une action volontairement ou non. Cependant, il nous est possible d'estimer des gestes qui ont déclenché le mode novice "par inadvertance". Ces gestes sont particulièrement ennuyeux car ils affichent l'interface de MarkPad, sans que l'utilisateur ne le veuille, ainsi obstruant l'écran (noter cependant que l'interface est affichée en transparence, ce qui réduit la gêne).

Les déclenchements involontaires du mode novice sont représentés par des gestes qui n'ont déclenché *aucune action*, dont la longueur ne dépasse pas 5 mm (c.à-d. que l'utilisateur a touché le pavé tactile sans intention de faire un geste), et dont la durée est assez longue pour déclencher le mode novice (c.à-d. plus de 400ms par défaut). Nous trouvons alors un nombre d'activations involontaires de 5.91 % ($\sigma = 2.11\%$) en moyenne, en considérant tous les gestes effectués par les utilisateurs.

En général, assez peu de déclenchements involontaires du mode novice ont été détectés, mais assez pour gêner certains utilisateurs. Une observation intéressante est que les utilisateurs n'ont dans l'ensemble pas réussi à régler le problème d'eux-même, même en essayant de redimensionner les zones de départ (menus, Tableau 6.5). Pour résoudre ce problème, l'expérimentateur a pu lors des entretiens aider les participants. Un utilisateur en particulier (P2) a demandé à pouvoir utiliser des zones de départ plus petites (car une taille minimale était définie pour ces zones par défaut, Figure 6.13). En conclusion, les utilisateurs devraient être plus guidés pour résoudre ce problème en autonomie, ce qui pourrait être détecté automatiquement par le logiciel, qui pourrait proposer de redimensionner/repositionner les zones correctement pour éviter au maximum ce problème.

Placement des menus. La Figure 6.13 montre les configurations initiales et finales des participants de l'étude. Cette représentation permet de prendre conscience du placement des commandes par les utilisateurs et de l'évolution de ces placements. Principalement, on peut voir que les participants ont rarement changé la position des menus entre les configurations initiale et finale. En combinant ces configurations avec une représentation de la densité des positions de départ utilisées pour effectuer des gestes ayant abouti (Figure 6.14), nous pouvons voir que les utilisateurs ont principalement utilisé les coins et les milieux des bords pour initier des gestes. Ceci s'explique par

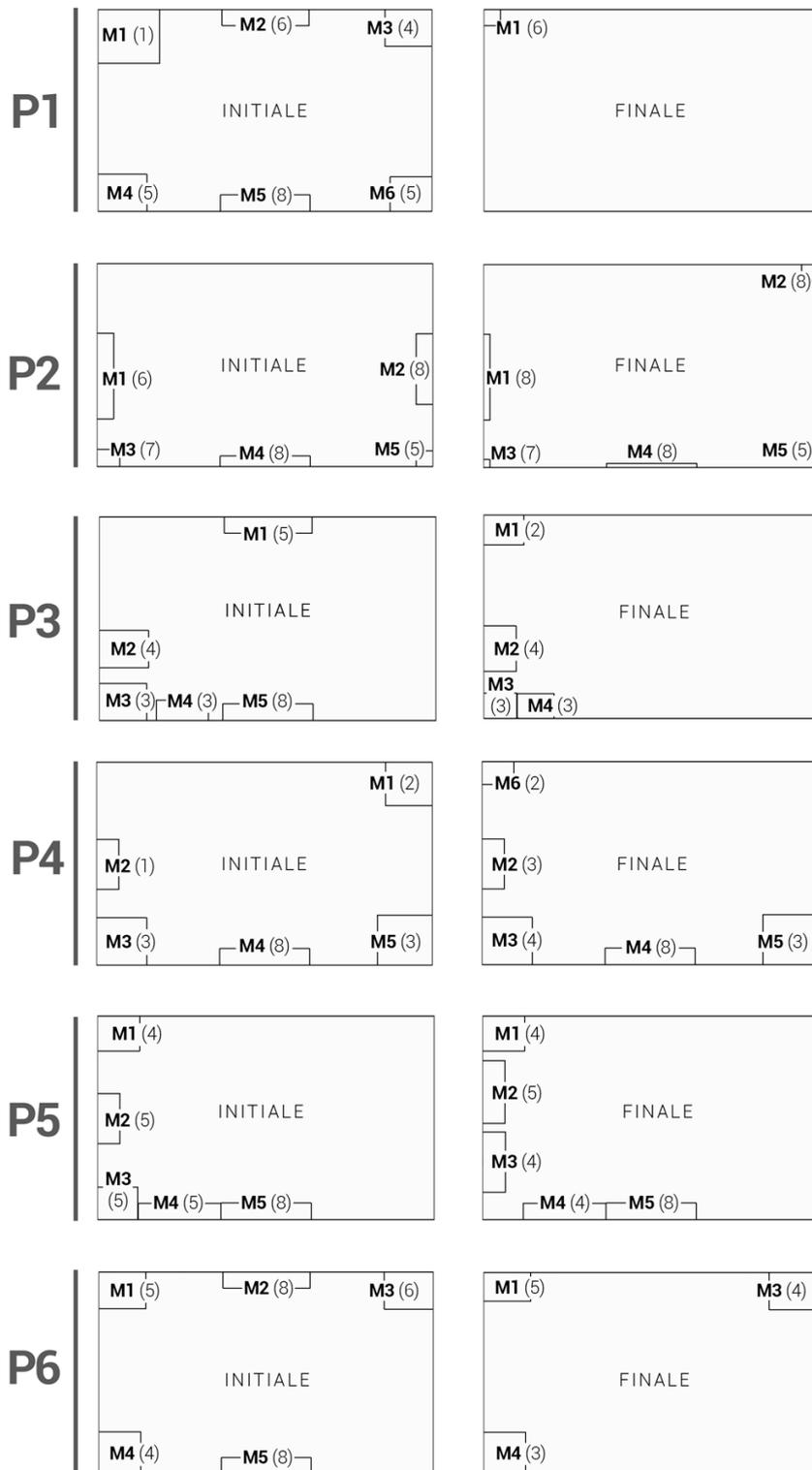


FIGURE 6.13 – Configurations initiales et finales des différents participants de l'étude. Chaque menu est représenté par un rectangle qui définit la zone de départ du geste, et les chiffres entre parenthèses représentent le nombre de commandes dans un menu (chaque menu est numéroté par utilisateur, les menus sont donc différents d'un utilisateur à l'autre).

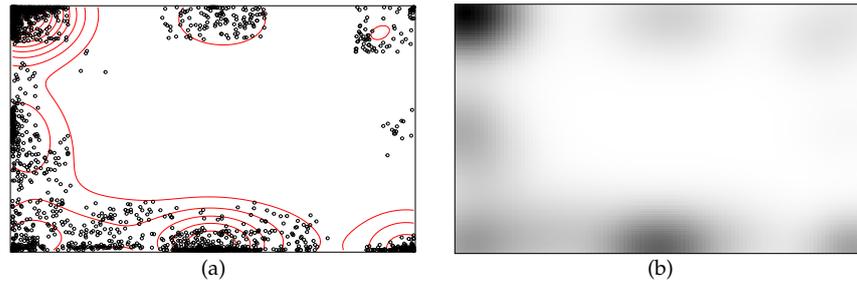


FIGURE 6.14 – Densité des positions de départ des gestes ayant abouti. Cette densité est calculée à l'aide de la méthode de Parzen-Rosenblatt [112, 123] ($n=100$, h défini par l'équation 5.5 dans [154, p. 127]). (a) Représentation sous forme de courbes avec les positions de départ. (b) Représentation à l'aide d'une carte de chaleur.

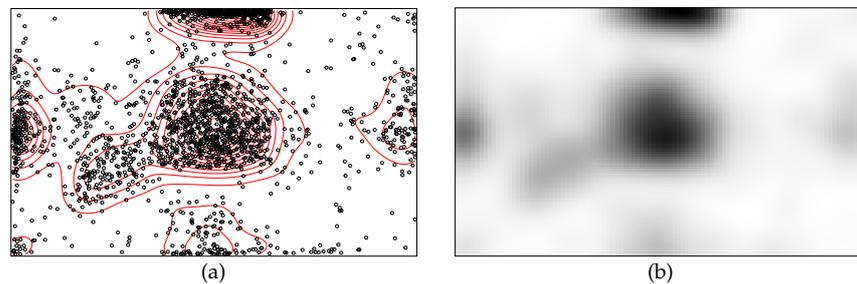


FIGURE 6.15 – Densité des positions d'arrivée des gestes ayant abouti. La densité est calculée de la même façon que pour la Figure 6.14. (a) Représentation sous forme de courbes avec les positions d'arrivée. (b) Représentation à l'aide d'une carte de chaleur.

le fait que ces parties du pavé tactile servent de repères visuels pour aider les participants à effectuer des gestes précis. Sans utiliser de marques, seulement ces repères visuels sont utilisables par les utilisateurs. On peut remarquer que la partie gauche du pavé tactile est plus utilisée que son homologue, ce qui s'explique sans doute par le fait que les participants étaient tous droitiers, et que ce côté était moins susceptible d'être utilisé en pointant avec le pavé tactile. De même la partie inférieure semble plus utilisée que la partie supérieure, sans doute pour éviter des activations involontaires en touchant le pavé tactile par inadvertance lorsque l'utilisateur tape au clavier.

Placement des zones d'arrivée. La Figure 6.15 représente la densité des positions d'arrivée utilisées par les gestes ayant aboutis. Comme on peut le voir, la zone centrale du pavé tactile est fortement utilisée, car elle est facile d'accès depuis tous les bords de celui-ci. On peut de même observer que les milieux des bords du pavé tactile sont fréquemment utilisés pour terminer des gestes, sans doute parce qu'ils servent de repères spatiaux. Avec le temps, certains utilisateurs ont préféré rapprocher les zones d'arrivée des gestes de leur zone de départ. Cette stratégie permet d'effectuer des gestes plus petits, et est

particulièrement intéressante lors de l'utilisation d'un grand pavé tactile.

Certains participants ont déclaré placer des commandes dans les menus selon une logique particulière, par exemple en groupant les commandes sémantiquement (p.ex. commandes liées à la *thèse* du participant) comme l'incite le concept de MarkPad, ou bien en créant une hiérarchie spatiale. Par exemple, P2 a placé des commandes en cascade, comme c'est le cas des *Marking menus*, pour mémoriser plus facilement l'emplacement de dossiers apparentés les uns à la suite des autres.

Améliorations. Les participants ont proposé plusieurs améliorations à appliquer au prototype au cours de l'étude, nous discutons ici des plus intéressantes. Entre autres, certains utilisateurs proposaient des délais de déclenchement du mode novice différents d'une zone à l'autre pour éviter les actions involontaires de celui-ci, quitte à complètement le désactiver pour certains menus. Un utilisateur aurait préféré voir l'interface s'afficher sur une partie de l'écran, et non sa totalité. Cette remarque nous a été faite plusieurs fois et mériterait d'être étudiée, cependant réduire l'interface graphique pourrait la rendre illisible pour afficher un grand nombre de commandes. Enfin, un utilisateur aurait aimé pouvoir définir des zones non rectangulaires pour démarrer et terminer des gestes. Cette dernière idée est intéressante et pourrait être explorée, comme nous le proposons dans le Chapitre 7.

6.8 CONCLUSION

Nous avons présenté MarkPad, une technique qui tire avantage du pavé tactile d'un ordinateur pour effectuer des raccourcis gestuels simples, sans rentrer en conflit avec le pointage. En tenant compte les positions de départ et d'arrivée des gestes, ce qui augmente considérablement le nombre de gestes possibles, MarkPad autorise un grand nombre de commandes et offre beaucoup de flexibilité pour les organiser. Cette technique s'appuie sur l'augmentation du pavé tactile en y ajoutant des marques visuelles ou tactiles, une solution simple qui ne nécessite que des matériaux bon marché et qui permet d'utiliser la technique pratiquement gratuitement sur les appareils actuels.

Nous avons présenté les résultats de deux études expérimentales évaluant la sélection de commandes en mode expert avec une configuration dense de 680 gestes possibles. En utilisant des marques visuelles ou visio-tactiles recouvrant le pavé tactile, nous avons obtenu une précision de 95% et un temps d'exécution homologue à des techniques similaires. Les réponses aux questionnaires soumis aux participants suggèrent qu'une interface mixte (bordures avec des marques

visio-tactiles et centre avec des marques visuelles) est une solution prometteuse. Une précision de 90% a été observée sans marques au centre (sans perte de vitesse), mais les résultats suggèrent que cette interface plus simple est viable lorsqu'elle est utilisée avec de plus grandes surfaces au centre du pavé tactile. Ces études ont également révélé que les utilisateurs doivent regarder davantage le pavé tactile en utilisant des repères visuels, ce qui ne modifie pas le temps de sélection. Cependant il est vraisemblable qu'avec de l'entraînement, des utilisateurs aient moins besoin de regarder ces marques pour être précis.

Nous avons évalué la possibilité d'utiliser notre design sur un pavé tactile en parallèle du pointage usuel, en sondant l'utilisation quotidienne du pavé tactile de 12 utilisateurs sur une semaine. Cette étude a confirmé notre hypothèse selon laquelle les bordures sont rarement utilisées, mais suffisamment pour déclencher des gestes involontaires. Notre analyse a mis en évidence 1) l'impact de la largeur des zones frontalières, 2) qu'un écart entre les zones du bord et les zones centrales réduit la détection des gestes, 3) que les gestes que nous proposons sont moins enclins à l'activation involontaire que des gestes directionnels.

Nous avons présenté un prototype effectif de MarkPad qui a été utilisé par ses concepteurs pendant un longue période de deux ans. Une version plus légère du prototype (c.à-d. pas de marques et peu de gestes utilisés) a ensuite été évaluée par le biais de 6 participants au cours d'une étude longitudinale d'environ 1 à 2 mois. Cette étude a révélé que ces participants ont réussi à s'approprier le logiciel dans leur utilisation quotidienne en utilisant les gestes MarkPad pour déclencher des actions courantes (c.à-d. ouvrir des liens Web, ouvrir des applications, etc.). De plus, ils ont su personnaliser les gestes dont ils avaient besoin en autonomie, utiliser ces gestes en mode expert, et utiliser des stratégies particulières pour les définir (c.à-d. groupement sémantique, hiérarchisation spatiale).

Dans le cadre de travaux futurs, nous aimerions étudier plus en détails l'utilisation de repères visuels et tactiles pour guider des utilisateurs lors de l'utilisation de gestes dépendant de positions. De nouveaux modèles d'ordinateur intègrent par exemple des pavé tactiles avec écran (p.ex. nouvelle *Touch Bar* sur les Macbooks Apple, ou le Zenbook Asus), ce qui permettrait d'utiliser ce type de technique sur écran tactile avec la possibilité d'utiliser des marques visuelles dynamiques. Ces marques pourraient n'afficher que les gestes disponibles suivant les actions de l'utilisateur (p.ex. sélection d'un menu). Il serait aussi très intéressant d'étudier plus en détails la façon dont un utilisateur peut être guidé en utilisant sa peau comme surface d'interaction [38, 63]. L'acuité de la peau permet aux utilisateurs de sentir où ils sont en train d'interagir sur une partie de leur corps, or

peu d'études se sont intéressées jusqu'à présent à formellement étudier ses bénéfices. Enfin, comme la conception de MarkPad s'appuie sur la mémoire spatiale, elle doit aussi favoriser la mémorisation, un aspect que nous envisageons également d'étudier.

SIDE-CROSSING MENUS : GESTES À L'AVEUGLE POUR DE GRANDS ENSEMBLES DE COMMANDES SUR PETITS DISPOSITIFS

Nous présentons dans ce chapitre une extension des gestes Mark-Pad, présentés dans le Chapitre 6, spécifiquement adaptée aux petits dispositifs. L'avantage qu'offre l'utilisation de nombreuses zones sur un pavé tactile est fortement réduit sur un petit dispositif qui ne permet de délimiter que quelques zones (9 dans notre étude sur une montre intelligente). Pour permettre néanmoins l'activation d'un grand ensemble de commandes, nous proposons avec cette variante de tirer avantage de gestes de *franchissement* (c.à-d. "crossing gestures"). L'utilisateur effectue un geste d'une zone (appelée cellule dans ce chapitre) à une autre, comme précédemment, sauf que nous considérons également le côté par lequel il entre dans la cellule d'arrivée (Figure 7.1-a). En d'autres termes, chaque côté d'une cellule d'arrivée peut être associé à une commande particulière (c.à-d. 4 commandes peuvent être activées avec une zone rectangulaire).

Un avantage des petits dispositifs, comme par exemple une montre intelligente, est qu'ils peuvent être portés constamment par des utilisateurs. Pour ne pas contraindre leur mobilité, nous proposons des moyens efficaces pour interagir à l'aveugle, et ainsi leur permettre de concentrer leur attention visuelle sur leur tâche principale. Pour arriver à ce résultat, nous ajoutons des marques tactiles passives au contour de la surface interactive (Figure 7.1-b). De plus, nous utilisons des vibrations pour indiquer quand le doigt de l'utilisateur traverse le côté d'une cellule.

7.1 INTRODUCTION

L'interaction à l'aveugle est particulièrement utile en situation de mobilité [20, 140] ou lorsque l'utilisateur interagit avec son environnement. Dans le contexte d'une maison intelligente, par exemple, l'utilisateur peut souhaiter allumer la lumière ou afficher ses chaînes de télévision préférées sans avoir à regarder un dispositif spécifique et faire défiler de longues listes de menus et de commandes. De même, en conduisant ou en interagissant avec un écran à distance, l'interaction à l'aveugle permet à l'utilisateur de se concentrer sur sa tâche sans perturber son attention visuelle. Enfin, lorsque l'utilisateur ne peut pas voir le périphérique d'entrée, comme lors d'utilisation d'un

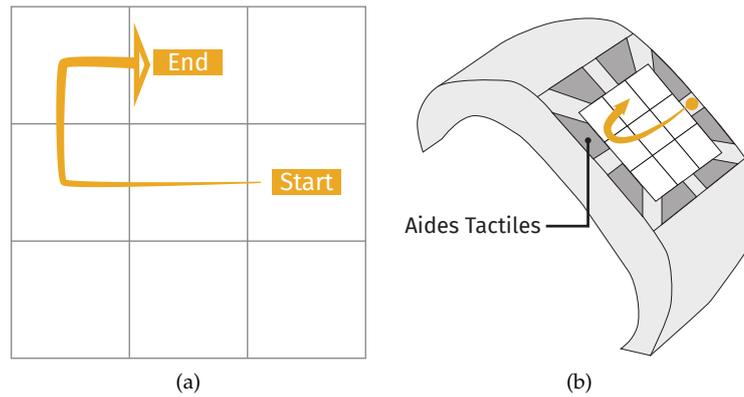


FIGURE 7.1 – (a) Un geste SCM démarre d’une cellule et se termine dans une autre, après avoir traversé un de ses côtés. (b) Des aides tactiles sont ajoutées au contour d’une montre intelligente pour permettre aux utilisateurs d’interagir à l’aveugle.

casque de réalité virtuelle, interagir à l’aveugle lui évite de se fier à des palettes ou à des menus, qui nécessitent une attention visuelle et éventuellement des gestes fatigants.

Nous présentons dans ce chapitre *Side-Crossing Menus* (SCM, Figure 7.1), une nouvelle technique d’interaction gestuelle qui permet d’effectuer un grand nombre de gestes sur une petite surface tactile. Le grand nombre de gestes pris en charge (jusqu’à 172 sur une montre intelligente) offre une grande flexibilité aux utilisateurs ou aux concepteurs pour définir quels gestes seront utilisés d’une manière sensée. Cette technique permet également d’utiliser un même dispositif pour une variété de tâches, que ce soit à la maison (maison intelligente) ou au travail (mur d’écrans, environnement de RV).

Les gestes SCM peuvent être effectués sans aide visuelle (mode expert) ou avec une représentation visuelle (mode novice) qui est typiquement fournie par un affichage auxiliaire, par exemple, un écran

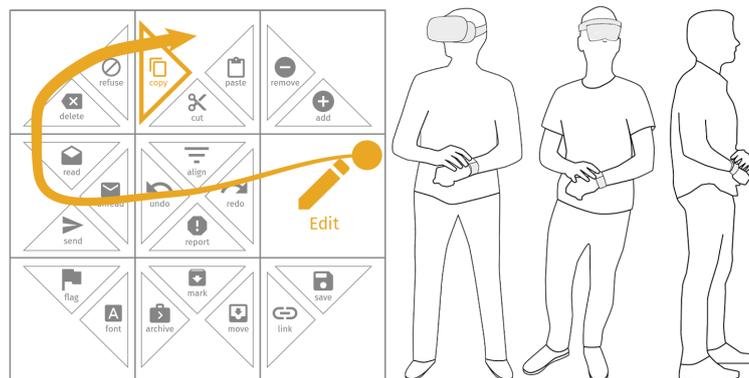


FIGURE 7.2 – Représentation visuelle d’un geste SCM et exemples d’environnements adaptés à l’utilisation de la technique SCM.

distant, un casque de réalité augmentée ou virtuelle (Figure 7.2), des lunettes intelligentes ou une projection sur l'avant-bras [166].

Par rapport aux techniques précédentes, SCM offre deux types de propriétés qui sont souvent exclusives : *beaucoup* de gestes sur une *petite* surface. Sa conception repose sur la combinaison de gestes dépendants à la fois de *positions* [67, 103] (voir Chapitre 6) et des gestes de *franchissement* [5, 61]. Les gestes dépendants de positions forcent l'utilisateur à commencer et terminer ceux-ci à des endroits spécifiques, ce qui augmente la taille de l'ensemble de gestes et fournit une bonne précision lorsqu'un retour tactile est fourni (voir Chapitre 6). Pour augmenter encore plus cette taille, la commande sélectionnée dépend aussi du *côté* traversé en entrant dans la cellule où le geste se termine. Bien que ces caractéristiques aient été étudiées individuellement, cette combinaison unique permet de fournir un grand nombre de gestes qui peuvent être effectués avec précision par les utilisateurs.

Pour permettre des interactions à l'aveugle, nous utilisons des aides tactiles passives [17, 58, 164] et actives [115, 127]. Bien que diverses techniques gestuelles aient été proposées pour interagir à l'aveugle sur une montre intelligente [82, 106], un téléphone [20, 73], ou une tablette [136], elles nécessitent souvent que la surface sensible soit relativement grande [136], ou ne peuvent prendre en charge qu'un nombre limité de commandes [73, 82, 106]. À l'inverse, d'autres techniques supportent un grand nombre de commandes (par exemple, [67, 172]) mais n'ont pas été conçues pour l'interaction à l'aveugle. Des aides tactiles simples sur les contours de la surface interactive (Figure 7.1-b), et de courtes vibrations lorsque l'utilisateur traverse le côté d'une cellule, permettent à l'utilisateur d'effectuer de nombreux gestes à l'aveugle avec une précision suffisante, comme le montre nos expérimentations.

Nous présentons dans la suite de ce chapitre le design de SCM et une représentation visuelle destinée à faciliter l'apprentissage des gestes adéquats par des utilisateurs novices. Nous présentons ensuite une étude utilisateur démontrant la capacité des utilisateurs à effectuer des gestes SCM à l'aveugle et concluons par des idées de travaux futurs.

7.2 SIDE-CROSSING MENUS

Modes d'interaction. SCM fournit un *mode novice* qui représente visuellement les gestes SCM (Figure 7.3). Ce mode peut difficilement être utilisé sur une montre intelligente en raison du nombre de gestes à représenter. Cette technique requiert donc un écran auxiliaire comme un téléviseur (maison intelligente), un grand écran ou un casque de RA/RV (Figure 7.2). De même, des lunettes intelli-

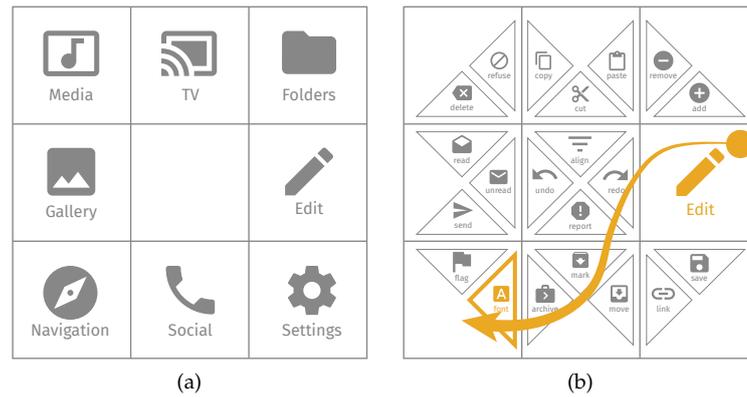


FIGURE 7.3 – Mode novice utilisé par SCM. (a) Les cellules de départ sont liées à des menus. (b) Les commandes sont situées dans des triangles dont les côtés non-diagonaux indiquent quel côté de la cellule doit être traversé, et une flèche orange montre la trace du mouvement de l'utilisateur.

gentes [139] ou une projection sur l'avant-bras de l'utilisateur [166] pourraient être utilisés dans un contexte mobile (Figure 7.4). Une fois que les utilisateurs deviennent des experts et peuvent se rappeler un ensemble de gestes, ils peuvent les exécuter sans aides visuelles (p.ex. à l'aveugle).

Les gestes SCM dépendent d'une cellule de départ et d'arrivée sur la surface tactile, ce qui les rend dépendants de *positions* (Chapitre 6). Nous combinons à ce type de gestes des gestes de *franchissement*, en considérant le *côté* de la cellule finale traversé, ce qui multiplie par quatre le nombre de commandes possibles (Figure 7.3-b). En combinant ces deux modalités d'interaction, notre concept étend le champ des techniques d'interaction gestuelle avec une approche efficace qui permet d'effectuer de grands ensembles de commandes sur petits dispositifs.

Menus SCM. Un avantage notable de SCM est qu'elle fournit un grand nombre de commandes tout en évitant d'utiliser de grands menus hiérarchiques, qui sont un obstacle pour découvrir et sélectionner des commandes [10, 105]. Tous les gestes partant d'une même cellule de départ correspondent à un menu (Figure 7.3-a). Un menu est donc lié à une seule cellule de départ. Cette cohérence spatiale doit en théorie exploiter la mémoire spatiale [172].

Toucher une cellule liée à un menu pendant plus de 300 ms affiche ce menu. Les commandes sont représentées à l'intérieur de triangles situés dans des cellules rectangulaires (Figure 7.3-b). Le côté non-diagonal d'un triangle indique quel côté traverser pour déclencher la commande. La commande est mise en évidence lorsque l'utilisateur effectue un geste et passe sur une cellule (Figure 7.3-b). La commande est déclenchée après avoir relâché le doigt. Un geste peut être annulé en relâchant le doigt sur la cellule utilisée pour le démarrer.

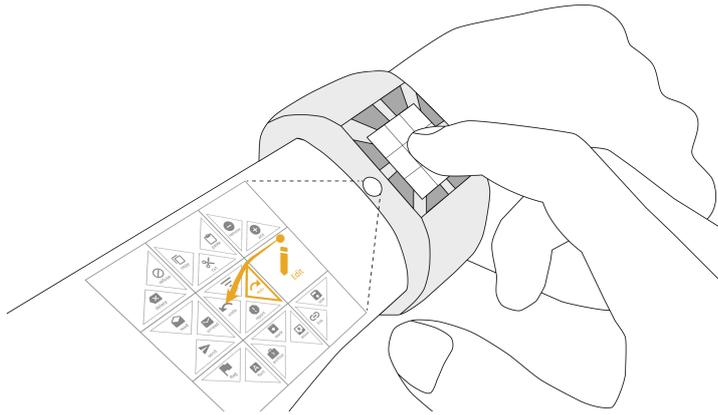


FIGURE 7.4 – Projection du mode novice sur l’avant-bras de l’utilisateur pour éviter les problèmes d’occultation en interagissant directement sur la montre intelligente, et pour afficher les éléments graphiques en plus gros dans un contexte mobile. Le mode novice peut être affiché avec un projecteur attaché à la montre [166], ou en utilisant un système de réalité augmentée porté sur la tête [139]

Nombre de commandes. SCM utilise 9 cellules à chaque niveau, pour assurer que l’utilisateur puisse les sélectionner avec précision sur un petit dispositif. Pour faciliter l’interaction à l’aveugle, les gestes SCM partent des cellules situées sur les bords de la surface interactive [73, 125, 136]. Huit menus sont ainsi disponibles, et 22 ou 21 commandes composent chaque menu : selon leur emplacement, les cellules d’arrivée peuvent définir 2, 3 ou 4 commandes (Figure 7.3-b), avec pour conséquence que les menus d’angle ont une commande de plus que les autres menus. SCM supporte donc un total de $21 \times 4 + 22 \times 4 = 172$ commandes.

Personnalisation. Il est important de noter que le but n’est pas d’utiliser tous les gestes possibles, mais de donner la liberté aux utilisateurs, ou aux concepteurs d’interaction, d’agencer un ensemble de commandes de manière significative. Contrairement aux techniques qui limitent fortement le nombre de gestes disponibles à chaque niveau d’un menu (par exemple, [83, 170]), SCM permet de regrouper les commandes associées au lieu de les placer dans différents menus.

Contrairement à beaucoup d’autres interactions gestuelles [83, 169, 170], les gestes SCM ne sont pas droits. L’utilisateur peut dessiner n’importe quel chemin à condition qu’il commence et termine son geste d’une manière appropriée (Figure 7.5). Différents chemins peuvent donc être utilisés pour exécuter la même commande, selon les préférences des utilisateurs. Cette fonction a été largement utilisée par les participants pendant l’expérience.

Cette particularité offre de nombreux avantages : (1) elle rend la reconnaissance gestuelle très robuste, (2) les utilisateurs peuvent cor-

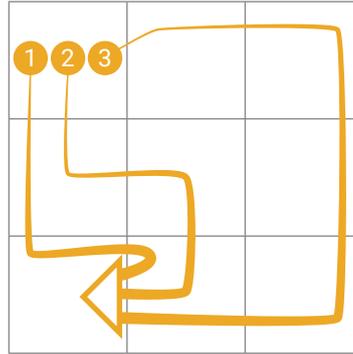


FIGURE 7.5 – Trois façons différentes d’activer la même commande.

riger des gestes partiellement erronés en modifiant leur trajectoire, (3) ils peuvent utiliser des gestes qu’ils trouvent plus faciles à mémoriser (p.ex. des formes symboliques [6], ou des formes ressemblant des schémas de déverrouillage de téléphone [145]), et enfin, (4) ils peuvent adapter leurs mouvements en fonction des contraintes imposées par le contexte d’interaction (p.ex. l’orientation du dispositif).

7.2.1 Aides tactiles passives et actives

Un autre avantage des gestes SCM est qu’ils ne nécessitent que de petits mouvements (contrairement aux gestes en trois dimensions qui peuvent être grands et fatigants dans des environnements de RV [36]). Cependant, des tests préliminaires ont montré que de si petits mouvements ne sont pas suffisamment précis lorsqu’ils sont effectués à l’aveugle et sans guidage [20, 58], même en utilisant les contours de la surface comme guide.

L’utilisation des contours comme *repères tactiles passifs* aide à localiser les cellules de départ contenues dans la grille de 3×3 proposée par SCM, comme souligné dans [136]. Cependant, bien que les utilisateurs peuvent effectivement utiliser les contours, leur doigt ne se trouve pas toujours à un endroit "idéal" au début des gestes, ce qui entraîne de nombreuses erreurs.

Aides tactiles passives. Pour résoudre ce problème, nous avons ajouté des *aides tactiles passives* sur les contours, qui sont des autocollants que les utilisateurs peuvent sentir sous le bout de leur doigt (représentés à l’intérieur de lignes blanches pointillées dans la Figure 7.6-a). Les *positions* et les *formes* des espaces *entre* les autocollants indiquent respectivement les *positions* et *directions* idéales pour démarrer un geste SCM. Cette aide simple améliore sensiblement les performances en évitant à l’utilisateur de "dériver" son doigt vers une cellule indésirable. Il est important de noter que les autocollants ne recouvrent pas l’écran tactile et n’ont pas d’impact significatif sur l’esthétique de la

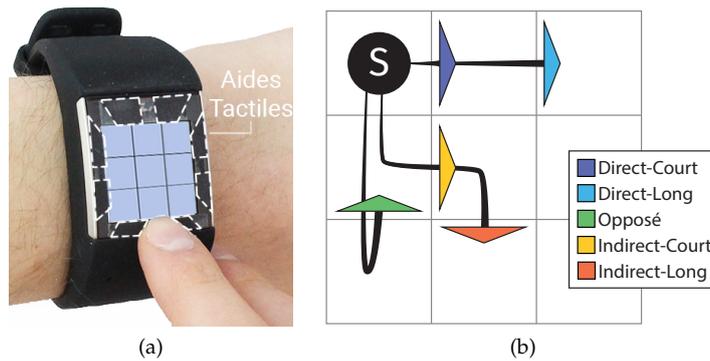


FIGURE 7.6 – (a) La montre intelligente utilisée dans notre expérience, avec les contours augmentés par des bouts de papier autocollant. (b) Types des gestes évalués dans l'étude utilisateur (avec "S" dénotant une cellule de départ).

montre intelligente. En fait, ils sont à peine visibles et pourraient être intégrés au contour d'un produit commercial.

Aides tactiles actives. Les aides tactiles décrites ci-dessus aident les utilisateurs à démarrer les gestes, mais ne les aident pas ou peu à les terminer, surtout lorsqu'ils traversent le côté d'une cellule au milieu de l'écran tactile. L'utilisation d'aides tactiles passives directement sur la surface sensible modifierait son relief, ce qui pourrait être désagréable lors d'utilisation d'applications standard. Pour cette raison, nous utilisons une courte vibration lorsque le doigt de l'utilisateur traverse le côté d'une cellule. Ce mécanisme simple est suffisant pour avertir les utilisateurs lorsque leur doigt entre dans une cellule (ainsi que la surface interactive). En conséquence, les utilisateurs peuvent compter le nombre de vibrations (p.ex. le chemin 2 sur la Figure 7.5 impliquerait 5 vibrations).

Nous pensons que des utilisateurs experts habitués à effectuer des gestes SCM n'ont pas autant besoin de ces types d'aides que des utilisateurs débutants. Ils préféreront sans doute faire des gestes rapides sans attendre de ressentir les vibrations (dont la latence est limitée), ou passer trop de temps à sentir les aides sur le contour. Cette hypothèse est consolidée par les commentaires des participants reportés dans la discussion.

7.3 EXPÉRIENCE UTILISATEUR

Pour valider le design de SCM, nous avons effectué une étude afin d'évaluer si des utilisateurs pouvaient effectuer des gestes SCM avec précision. Il est important de noter que nous avons évalué l'utilisabilité de la technique en mode *expert*, c'est-à-dire à l'aveugle. Il s'agis-

sait d'une première étape obligatoire, car une telle technique n'aurait guère d'intérêt si elle n'offrait pas un mode expert efficace.

Participants. Nous avons recruté 12 participants droitiers dans nos universités locales (dont 3 femmes), âgés de 21 à 38 ans (moyenne = 27, médiane = 26). Trois d'entre eux utilisaient déjà une montre intelligente, dont deux tous les jours.

Appareil. Nous avons utilisé une montre intelligente parce que de tels dispositifs sont répandus et adaptés à nos contextes d'utilisation. Le modèle était une Android Polar M600 avec un écran tactile de 23.3×23.3 mm et une résolution de 240×240 pixels (Figure 7.6-a). La taille des contours était de 6.5 mm, sauf pour la partie supérieure (15.5 mm). Nous avons connecté la montre par WiFi à un serveur node.js [146] fonctionnant sur un Macbook 15". Un programme Android était lancé sur la montre intelligente pour capturer les gestes SCM et interagissait à distance avec le serveur pour stocker les données et contrôler le déroulement de l'expérience.

Contexte. Les participants portaient la montre intelligente sur leur poignet gauche et interagissaient avec leur index droit pendant les essais. Nous leur avons demandé de s'asseoir à un bureau, devant l'ordinateur portable qui affichait les stimuli visuels. Pour s'assurer qu'ils ne pouvaient pas voir la montre, ils devaient poser leur poignet sur leur genou sous le bureau. Nous nous sommes assurés qu'ils étaient à l'aise avant de commencer l'expérience.

Protocole Experimental. Nous avons identifié cinq TYPES de gestes représentant tous les gestes pouvant être réalisés avec SCM (voir Figure 7.6-b). Le type *Direct* correspond à des gestes qui peuvent être complétés par un trait droit. Le type *Opposé* consiste en des cellules alignées en ligne droite, mais avec le côté à traverser à l'opposé de la cellule de départ. Le type *Indirect* inclut tous les autres gestes. Puisque les types *Direct* et *Indirect* incluent des gestes définis par des cellules voisines, ou des cellules qui sont espacées par une autre, nous divisons ces catégories en deux (c'est-à-dire *-Court* et *-Long*, Figure 7.6-b).

Nous avons choisi au hasard six cellules de départ (c.à-d. des cellules liées à des menus) et avons choisi au hasard cinq gestes pour chacune d'entre elles (un geste pour chaque TYPE), pour composer un ensemble représentatif de gestes comme dans [83, 169, 172]. Nous avons ainsi obtenu un total de 30 gestes représentatifs parmi les 172 gestes SCM possibles.

Pour chaque essai, deux étiquettes "Start" et "End" indiquaient les cellules de départ et d'arrivée du geste à exécuter (Figure 7.7-a), et un triangle indiquait le côté à traverser (aucune indication n'était donnée sur le mouvement à effectuer). Les participants commençaient un essai en touchant l'écran tactile de la montre intelligente, ce qui révélait immédiatement le geste à reproduire. Un essai se terminait lorsque

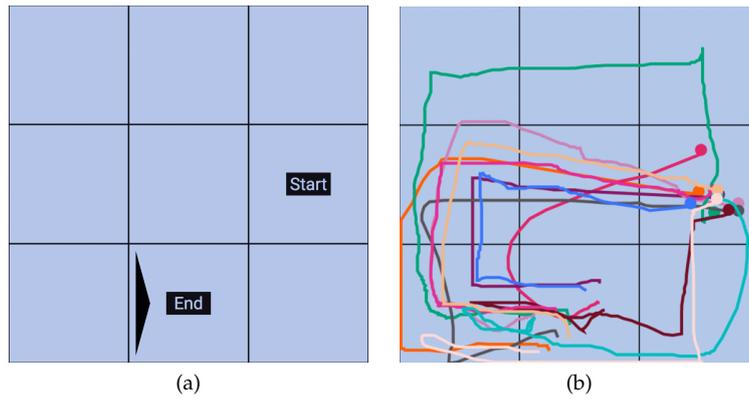


FIGURE 7.7 – (a) Stimulus visuel indiquant le geste à reproduire pendant un essai. (b) Mouvements effectués par les utilisateurs (une couleur par utilisateur) pendant le dernier bloc de l'expérience pour le geste représenté par (a).

le participant accomplissait un geste (c.à-d. relâchait son doigt à l'extérieur de la cellule de départ du mouvement).

Notre but dans cette étude était d'évaluer la capacité des utilisateurs à effectuer des gestes SCM. Nous avons donc demandé aux participants d'être aussi précis que possible. Pour s'assurer que les participants suivaient correctement cette instruction, ils devaient attendre deux secondes si l'essai était effectué correctement, et six secondes dans le cas contraire. À la fin de chaque essai, une indication était donnée s'ils avaient accompli le geste avec succès ou non, et la trace réelle de leur mouvement était affichée pendant quelques secondes.

Les participants ont dû exécuter six blocs pour compléter l'expérience. Pour chaque bloc, ils devaient exécuter dans un ordre aléatoire les 30 gestes représentatifs. Le premier bloc (B₀) était considéré comme un bloc d'*entraînement* où les participants pouvaient s'habituer à la technique. Nous avons donc enregistré 5 blocs (B₁ à B₅), pour un total de $5 \times 30 \times 12 = 1800$ gestes. L'expérience durait environ 30 minutes.

7.3.1 Résultats

Le principal résultat de l'expérience est que les participants ont effectué des gestes SCM avec précision dès le début de l'expérience (B₁ : 89.2%), et que les performances se sont améliorées jusqu'à la fin (B₅ : 95.0%). Dans cette section, nous fournissons des détails sur les résultats, discutons la façon dont les participants ont effectué des gestes et rapportons les résultats du questionnaire qu'ils ont eu à remplir.

Précision. La précision globale (c.à-d. le taux de réussite) est indiquée dans la Figure 7.8-a¹. On peut constater que les participants

1. les barres d'erreur indiquent des intervalles de confiance à 95%

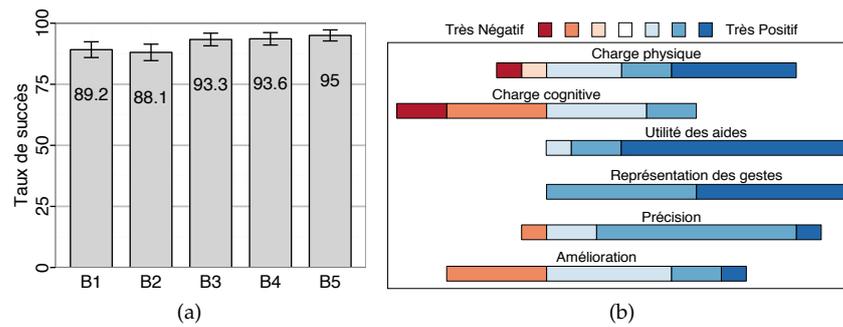


FIGURE 7.8 – Résultats de l'expérience. (a) Taux de succès pour chaque bloc. (c) Résultats des échelles de Likert dans le questionnaire : charge physique, charge cognitive, utilité des aides, représentation des gestes, estimation de la précision et de l'amélioration.

ont effectué les gestes avec une grande précision dès le premier bloc (89.2%) et qu'ils ont amélioré leur performance jusqu'au dernier bloc (95%). Ce résultat est confirmé par un effet du numéro de bloc ($F_{4,44} = 4.28$, $p = 0.005$), et des tests t de Student appariés montrent des différences significatives entre B1-B5 ($p = 0.016$, Cohen's $d = 0.87$), B2-B4 ($p = 0.025$, $d = 0.66$) et B2-B5 ($p = 0.022$, $d = 0.85$).

Nous avons trouvé un effet du TYPE de gestes ($F_{4,44} = 4.29$, $p = 0.005$) sur le taux de réussite, mais aucune interaction avec le numéro du bloc. En effet, les tests t montrent un taux de succès global plus mauvais pour les gestes *Direct-Long* contre les gestes *Indirect-Court* ($p = 0.039$, $d = 0.66$), *Indirect-Loin* ($p < 0.001$, $d = 1.16$), et une tendance contre les gestes *Direct-Court* ($p = 0.065$, $d = 0.74$). Ils montrent aussi un désavantage des gestes *Opposé* contre les gestes *Direct-Court* ($p = 0.004$, $d = 0.50$) et *Indirect-Loin* ($p = 0.021$, $d = 0.79$). Cependant, aucune différence de ce type ne peut être trouvée dans le dernier bloc.

Nous avons également trouvé un effet de la position de la cellule de départ sur le taux de réussite ($F_{5,55} = 8.42$, $p < 0.001$), montrant que les participants ont moins bien réussi en partant de la cellule du milieu gauche que tout autre (p 's < 0.001). Cependant, encore une fois, cet effet disparaît dans le dernier bloc.

Ces résultats suggèrent que le TYPE du geste et la cellule de départ de celui-ci ont un impact limité sur la précision des utilisateurs après un court entraînement.

Mouvements des participants. La Figure 7.7-b représente les traces des mouvements de tous les participants dans le dernier bloc pour le geste présenté par la Figure 7.7-a. Nous pouvons voir que la plupart d'entre eux ont choisi de se déplacer horizontalement sur la surface sensible (en traversant la cellule centrale), mais trois participants ont préféré traverser la cellule finale une première fois avant d'y entrer du bon côté, et un participant a préféré effectuer un long mouvement en utilisant les quatre bords comme guide. Ceci suggère que les par-

ticipants utilisent naturellement des stratégies différentes lorsqu'ils choisissent les chemins à emprunter pour effectuer les mêmes gestes, même si aucune instruction n'a été donnée sur cet aspect.

Questionnaire. Les participants devaient répondre à un questionnaire à la fin de l'expérience. Ce questionnaire comprenait six échelles de Likert allant de 1 (*très positif*) à 7 (*très négatif*) à propos de : (1) la charge *physique* et (2) la charge *cognitive* requise pour effectuer des gestes, (3) si les *aides tactiles* les aidaient, (4) si la façon dont les gestes étaient *représentés* était facile à comprendre, (5) leur propre évaluation de leur *précision* dans le dernier bloc de l'expérience et (6) *l'amélioration* de leur performance pendant l'expérience. Les résultats de ce questionnaire sont illustrés à la Figure 7.8-b.

Dans l'ensemble, les participants ont perçu les *aides tactiles* comme très utiles pour faire des gestes précis. Ils ont mentionné qu'ils pouvaient compter sur elles pour initier un geste et guider leurs mouvements en glissant le long du contour. Il est intéressant de noter que même si les participants étaient positifs au sujet de leur performance dans le dernier bloc, ils n'ont pas perçu une amélioration importante tout au long de l'expérience (bien que leur précision se soit en fait améliorée). Cela suggère que les gestes SCM n'ont pas besoin d'une longue pratique pour être compris et exécutés correctement. Cette hypothèse est également appuyée par le fait que les participants ne semblaient pas avoir de difficulté à comprendre leur représentation graphique ni à effectuer les gestes correctement dès le premier bloc. Enfin, les participants ont mentionné une légère charge *physique* mais une importante charge *cognitive*, ce qui n'est pas surprenant étant donné que la technique était nouvelle pour eux.

7.3.2 Discussion

Cette étude suggère que les utilisateurs peuvent effectuer tous les types de gestes SCM avec précision sans regarder une montre intelligente. Il est intéressant de remarquer qu'ils ont exécuté les gestes avec précision dès le début (89,2%), même s'ils utilisaient la technique pour la première fois, et que 75% d'entre eux n'ont jamais utilisé de montre intelligente dans le passé. Ils se sont ensuite améliorés, atteignant un taux de réussite de 95% après 20 minutes de pratique. Ceci suggère que le concept SCM est assez intuitif et propose une technique convaincante pour effectuer des raccourcis gestuels à l'aveugle.

Les participants ont profité de la liberté proposée par le design de SCM pour utiliser divers chemins pour effectuer les mêmes gestes (Figure 7.7-b). Comme ils l'ont rapporté, certains d'entre eux ont préféré se fier aux bords tandis que d'autres étaient plus confiants avec les vibrations. Cette fonctionnalité peut réduire les erreurs de sélection car

les utilisateurs peuvent choisir un chemin "plus sûr" lorsqu'ils ne sont pas totalement confiants lorsqu'ils interagissent à l'aveugle [20].

Le fait que nous n'ayons observé que de petites différences au début de l'expérience entre les différents TYPES des gestes SCM, suggère qu'ils sont *tous* viables à l'utilisation. Cela suggère également que les résultats que nous avons obtenus pour un ensemble représentatif de gestes sont susceptibles d'être similaires pour les autres gestes.

Comme l'expérience a été conçue pour évaluer la capacité des utilisateurs à effectuer des gestes SCM, elle a été menée avec des utilisateurs novices. De toute évidence, des utilisateurs experts peuvent utiliser leur mémoire procédurale [134] pour moins s'appuyer sur les aides fournies et ainsi interagir plus rapidement. Par exemple, un participant a mentionné dans le dernier bloc : "J'ai le sentiment que j'ai moins besoin des marques". Cette remarque, couplée aux taux élevés de réussite précoces de l'expérience, donne à penser que des utilisateurs experts pourraient rapidement adopter SCM.

7.3.3 Limitations

Comparaisons. Nous avons d'abord envisagé de comparer SCM à une technique de référence, mais aucune ne semble appropriée dans ce contexte. Les *Marking menus* nécessitent des hiérarchies multi-niveaux qui ne sont pas compatibles avec des petites surfaces [169, 170], et les techniques dérivées conçues pour des appareils mobiles ne sont pas adaptées pour interagir à l'aveugle [73, 172], ne fournissent pas suffisamment de gestes [73, 82, 106], ou nécessitent de grands menus hiérarchiques [17] pour fournir un nombre comparable de commandes.

Néanmoins, en comparant nos résultats aux techniques proposées dans la littérature, nous pouvons voir que SCM est plus précise que les techniques supportant de grands ensembles de commandes (SCM : 172 commandes - taux d'erreur $5\% \pm 2.26\%$; *M3 menus* [172] : 512 commandes - $8.85\% \pm 4.47\%$; *Marking menus* [83] : 512 commandes - 17% ; *Simple-Mark menus* [170] : 512 commandes - 7%).

Temps de Complétion. Le temps de complétion d'un geste n'était pas au centre de cette expérience, et, en effet, nous n'avons pu mesurer que le temps complet d'un essai (ce qui n'est pas vraiment représentatif de l'utilisation de SCM en mode expert), et le temps d'exécution qui ne tient pas compte du temps passé par l'utilisateur sur le contour (qui devrait être limité pour les utilisateurs experts). Cependant, en comparant les temps d'exécution avec d'autres techniques adaptées à l'interaction à l'aveugle, nous pouvons voir que les gestes SCM nécessitent des temps d'exécution comparables (environ 1,54 s) aux gestes *Bezel Tap* (1,75 s) et *Bezel Marks* [20] (1,20 s) qui fournissent moins de



FIGURE 7.9 – Exemples de dispositifs intégrant des petites surfaces tactiles (surlignées en orange).

commandes (aucun temps de réponse n'est rapporté pour les *Bezel menus* [73]).

7.4 CONTEXTES D'UTILISATION ET FORMES ALTERNATIVES

Tous les dispositifs n'ont pas une forme rectangulaire, comme certaines montres intelligentes et certains dispositifs récents conçus pour interagir avec des systèmes de RA ou RV (Figure 7.9). Dans de tels cas, les cellules rectangulaires pourraient ne pas être bien adaptées à l'interaction [138]. Les menus SCM pourraient être adaptés aux dispositifs circulaires, comme illustré dans la Figure 7.10. Dans cet exemple, des cellules polygonales sont utilisées pour fournir plus de côtés, ce qui permet de réduire le nombre de cellules tout en conservant le même nombre de commandes.

Les menus SCM pourraient également être utilisés sur des appareils plus grands comme des téléphones intelligents, ce qui étendrait le design des menus M₃ [172] et *Bezel-Tap* [136]. Une sous-partie de l'écran située sur le côté d'un téléphone intelligent, à proximité de la main de l'utilisateur, pourrait alors servir à déclencher rapidement des raccourcis avec le pouce (voir Figure 7.9-c). De plus, le contour du téléphone pourrait être sensible au toucher pour fournir à la fois une aide tactile passive pour guider l'utilisateur, et un mécanisme de détection pour éviter les conflits avec les interactions courantes.

7.5 CONCLUSION

Nous avons présenté *Side-Crossing Menus*, une nouvelle technique d'interaction gestuelle qui permet d'effectuer un grand nombre de raccourcis gestuels sur des petites surfaces. Ces gestes peuvent être effectués à l'aveugle en utilisant des aides tactiles passives (autocollants) et actives (vibrations). SCM apporte une solution pour interagir

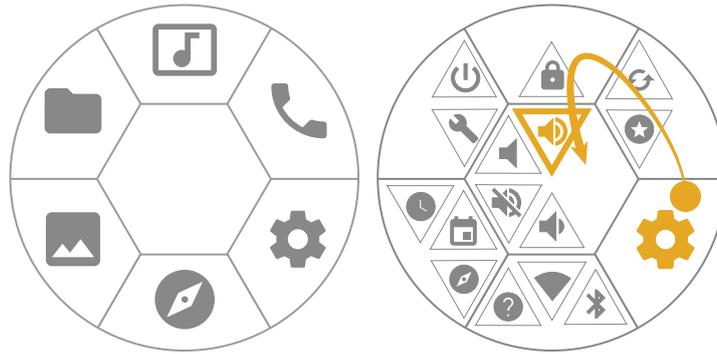


FIGURE 7.10 – Exemples de zones en forme d’hexagones contenant plus de commandes que des zones rectangulaires. Ce design serait particulièrement intéressant pour des surfaces d’interaction rondes.

avec de nombreux systèmes à l’aide d’un petit dispositif unique porté en permanence par l’utilisateur. Cette technique devient alors une sorte de "couteau suisse" pour interagir avec divers appareils, que ce soit à la maison, au travail ou dans des contextes mobiles.

Nous avons réalisé une étude utilisateur pour évaluer si les utilisateurs peuvent effectuer des gestes SCM avec précision sur une montre intelligente, et avons montré que des utilisateurs novices trouvaient les gestes intuitifs et atteignaient rapidement un bon niveau de précision. Il est intéressant de noter qu’ils ont utilisé différents chemins en fonction de leurs préférences pour effectuer les mêmes gestes, profitant ainsi de la liberté offerte par le design de SCM.

Dans le cadre de travaux futurs, nous prévoyons d’évaluer SCM sur différents dispositifs, comme ceux décrits ci-dessus. En particulier, nous aimerions savoir si SCM peut être utilisé avec des cellules non-rectangulaires, et en utilisant le pouce plutôt que l’index pour interagir. Nous prévoyons également d’évaluer SCM dans un contexte expert, de même qu’évaluer comment des utilisateurs apprennent de tels gestes (c.à-d. transition du mode novice au mode expert).

Nous avons étudié dans cette seconde partie des techniques d'interaction conçues pour supporter de grands ensembles de gestes. Nous avons présenté dans un premier chapitre (Chapitre 5) une revue de la littérature focalisée sur différentes approches s'intéressant à ce type d'interactions gestuelles. Elle a révélé que les gestes dépendants de *positions* sont encore peu étudiés malgré leur potentiel élevé. C'est pourquoi nous avons étudié ce type de gestes plus en détails à l'aide de deux techniques d'interaction dans les chapitres suivants, ce que nous synthétisons ci-dessous.

Guidage de l'utilisateur. Nous avons découvert au cours des études réalisées qu'une composante essentielle pour permettre à aux utilisateurs d'effectuer avec précision un grand nombre de gestes définis par des positions, est de les guider correctement. Grâce à de simples aides *passives* composées de matériaux bon marché, l'utilisateur peut ainsi effectuer 680 gestes sur le pavé tactile d'un ordinateur portable (voir Chapitre 6). En les combinant avec des aides *actives* comme des vibrations, l'utilisateur peut effectuer avec précision 172 gestes sur une montre intelligente sans avoir besoin de la regarder. Une observation intéressante est que la précision de l'utilisateur peut nettement décroître en l'absence de ces aides (voir Chapitre 6). Ces aides sont donc d'une grande importance pour permettre, en particulier aux utilisateurs novices, d'effectuer avec précision ce type de gestes, et elles méritent d'être étudiées plus en profondeur dans le futur.

MarkPad. Nous avons présenté dans le Chapitre 6 la technique d'interaction MarkPad, qui propose un nouveau type d'interactions gestuelles combinant des *positions* et des *directions* en définissant des gestes à l'aide de deux zones. Nous avons montré à l'aide de plusieurs études que les gestes MarkPad peuvent être effectués sur le pavé tactile d'un ordinateur avec précision, même en utilisant une configuration dense de 680 gestes (à condition de *guider* l'utilisateur, comme expliqué ci-dessus). De plus, une étude supplémentaire a montré qu'ils peuvent être utilisés sans entrer en conflit avec le pointage usuel, s'ils sont initiés des bords du pavé tactile. Nous avons ensuite présenté un prototype fonctionnel qui a été développé et utilisé sur une période de 2 ans. Enfin, une étude longitudinale dont le but était de comprendre comment des utilisateurs novices s'approprient un tel outil, a révélé qu'ils peuvent mettre à profit les gestes MarkPad dans une utilisation quotidienne de leur ordinateur, et qu'ils arrivent à personnaliser des gestes en autonomie en fonction de leurs besoins.

Variante sur Petits Dispositifs. Comme les gestes MarkPad nécessitent une surface d'interaction relativement grande pour être utilisés en grand nombre, ils ne sont pas adaptés pour des petits dispositifs

mobiles. C'est pourquoi nous avons étudié dans le Chapitre 7 une variante de MarkPad pour ce type de dispositif, appelée *Side-Crossing Menus*. Cette variante permet de diminuer le nombre de zones utilisées, tout en conservant un nombre important de gestes. Comme pour les gestes MarkPad, les gestes SCM sont définis par des zones de départ et d'arrivée, mais, de surcroît, ils dépendent du côté traversé pour entrer dans la zone d'arrivée. Une étude utilisateur a montré que 172 gestes peuvent être effectués à l'aveugle avec précision sur une montre intelligente sensible au toucher, si l'utilisateur est guidé correctement.

Personnalisation des Gestes. Un avantage des interactions gestuelles proposées dans cette partie est qu'elles sont principalement définies par des zones de départ et d'arrivée, et ne sont donc pas contraintes à un mouvement unique. Grâce à cette caractéristique, l'utilisateur peut choisir d'adapter son mouvement par rapport au contexte d'interaction (si les mouvements de sa main sont contraints par exemple), ou de la façon dont il préfère l'effectuer (mémorisation de la forme du geste). Certains utilisateurs ont par exemple déclaré utiliser des mouvements courbes pour certains gestes MarkPad, et le chemin emprunté pour un geste SCM pouvait varier d'un utilisateur à l'autre dans notre étude. Ces observations montrent que les utilisateurs s'appuient sur cette liberté pour effectuer les gestes comme ils le préfèrent, ce qui reste une caractéristique peu (ou pas) étudiée en IHM à notre connaissance.

Un autre aspect rarement étudié en IHM est la personnalisation des gestes. Plusieurs études se sont penchées sur la création libre de gestes par des utilisateurs [102, 160], mais aucune à notre connaissance sur la personnalisation de gestes à partir d'interactions gestuelles définies, comme nous l'avons fait dans le Chapitre 6. Cette problématique pose deux questions principales : (1) quelles stratégies adoptent les utilisateurs pour définir des gestes, et (2) quelles actions associent-ils aux gestes. Nous avons apporté quelques éléments de réponses avec nos études, mais des études plus approfondies sont nécessaires pour mieux comprendre les enjeux liés à ces problématiques.

PARTIE III

CONCLUSION

CONCLUSION

Pour conclure cette thèse, nous résumons ses contributions concernant la mémorisation de commandes et la conception de techniques d'interaction conçues pour supporter de grands ensembles de gestes. Nous discutons ensuite différentes perspectives aux travaux présentés dans la thèse.

8.1 CONTRIBUTIONS

8.1.1 Mémorisation de commandes

Nous avons étudié dans une première partie plusieurs types de mémoire (c.à-d. sémantique, spatiale), et la façon dont ils peuvent être exploités pour faciliter la mémorisation de commandes. Une revue de la littérature dans le Chapitre 2 a montré que l'étude de la mémorisation de commandes reste un sujet rarement abordé en IHM malgré l'importance de cet aspect pour la sélection de commandes. Une raison probable est la difficulté nécessitée par ce type d'expériences (temps d'expérimentation, protocole expérimental).

Nous avons présenté deux études focalisées sur la mémorisation de commandes dans les Chapitres 3 et 4. Nous y comparons l'utilisation de *positions* ou de *directions*, deux modalités largement utilisées par les techniques d'interaction, pour mémoriser des commandes dans différents contextes : l'interaction sur dispositif mobile et l'interaction sur le corps de l'utilisateur ou "en l'air" devant lui. Nos résultats suggèrent que ces deux méthodes mènent à des taux de rappels élevés et comparables, quelque soit le contexte, ce qui constitue la première contribution de la thèse. Ce résultat s'explique en partie par le fait que les utilisateurs avaient recours à des stratégies similaires pour mémoriser les commandes, quelle que soit la modalité utilisée (*position* ou *direction*).

La deuxième étude (décrite dans le Chapitre 4) compare l'apprentissage de *positions* sur le corps de l'utilisateur, à des *directions* effectuées "en l'air" devant lui. Pour comprendre les moyens utilisés par les participants pour mémoriser les commandes, nous avons créé deux groupes de participants, et avons demandé explicitement à l'un d'entre eux de créer des histoires en liens avec celles-ci. De plus, certains participants étaient aidés par des images placées à côté des

commandes. La comparaison des résultats de ces différents groupes suggère deux conclusions majeures : (1) proposer aux utilisateurs de créer des histoires en lien avec les commandes à mémoriser améliore substantiellement les taux de rappels, et (2) les images n'aident pas à mieux mémoriser, vraisemblablement parce que les utilisateurs sont surchargés d'information.

Les contributions de cette partie peuvent être résumées ainsi :

1. nous avons détaillé deux études approfondies sur la mémorisation de commandes à l'aide de *positions* ou de *directions* dans deux contextes particuliers (c.à-d. interactions sur dispositif mobile, et interactions en trois dimensions sur le corps de l'utilisateur ou "en l'air")
2. ces deux études suggèrent qu'utiliser des *positions* ou des *directions* pour sélectionner des commandes et les mémoriser amène à des taux de rappels élevés et comparables (des maximums de 84.1% et 88% atteints pour la première et seconde étude)
3. la deuxième étude suggère que simplement proposer aux utilisateurs de créer des histoires liées aux commandes pour les mémoriser plus facilement permet d'améliorer considérablement leurs taux de rappels (jusqu'à 28.5% d'amélioration en phase de rétention)

8.1.2 Grands ensembles de commandes

Les résultats des études de la première partie suggèrent d'utiliser des *positions* et des *directions* pour sélectionner et mémoriser efficacement des commandes. Nous proposons donc dans une seconde partie de les combiner pour concevoir des gestes définis par une position de départ et d'arrivée. Comme nous le montrons dans une seconde revue de la littérature focalisée sur les techniques d'interaction supportant un grand nombre de gestes (Chapitre 5), utiliser des *positions* pour définir des gestes a déjà été étudié dans le passé. Nous innovons en guidant l'utilisateur avec des aides *visuelles/visio-tactiles* qui permettent des interactions précises et efficaces.

Nous avons présenté dans le Chapitre 6 la technique d'interaction MarkPad, qui propose un grand nombre de gestes (680 gestes évalués dans l'étude utilisateur) sur le pavé tactile d'un ordinateur portable. Nous avons présenté trois expériences pour évaluer ce nouveau concept, qui ont montré que : (1) les utilisateurs peuvent effectuer les gestes MarkPad avec précision en étant guidés par des marques visuelles (95% de gestes correctement effectués), (2) réduire le nombre de marques visuelles réduit la précision dans le cas d'une configuration extrême (680 gestes possibles - 90% de réussite avec moins de marques, 72% sans marques), (3) les gestes MarkPad, qui démarrent

des bords du pavé tactile, ne rentrent pas en conflit avec le pointage usuel (taux d'activations involontaires négligeables).

Nous avons ensuite étendu le concept de ces gestes pour qu'ils soient adaptés à des petits dispositifs (p.ex. montre intelligente ou pavé tactile de télécommande de RV). Nous avons décrit dans le Chapitre 7 une étude utilisateur sur montre intelligente qui montre la faisabilité de cette approche en étant utilisée à l'aveugle. Nous discutons enfin de l'adaptation de ce type d'interactions pour plusieurs formes de surfaces interactives (p.ex. surfaces circulaires).

Les contributions de cette seconde partie peuvent être résumées ainsi :

1. nous avons proposé un nouveau type d'interaction gestuelle définissant des gestes à l'aide de *positions* et de *directions* supportant un grand nombre de gestes, ainsi qu'une variante adaptée pour petits dispositifs
2. nous montrons l'efficacité de ces deux techniques à l'aide de plusieurs expériences (95% de précision), et soulignons l'importance de guider l'utilisateur avec des marques visuelles/visio-tactiles pour effectuer ces gestes
3. nous avons présenté un prototype MarkPad effectif qui a été utilisé par ses créateurs pendant 2 ans, et une version allégée de celui-ci pendant un à deux mois par 6 utilisateurs novices, ce qui a permis de mieux comprendre comment des utilisateurs peuvent s'approprier un tel concept.

8.2 PERSPECTIVES

Les avancées présentées dans la thèse soulèvent plusieurs questions importantes qui concernent principalement la mémorisation de commandes et la personnalisation de gestes. Nous décrivons dans cette partie plusieurs problématiques qui mériteraient d'être étudiées plus profondément dans le futur, et discutons de l'impact qu'elles pourraient avoir sur l'efficacité des utilisateurs.

8.2.1 Mémorisation de commandes

Placement de commandes. Comme nous avons pu l'observer dans les deux études des Chapitres 3 et 4, les participants élaborent spontanément des stratégies pour mémoriser des commandes. Une observation particulièrement intéressante est que des stratégies similaires ont été adoptées par différents participants sans qu'ils ne soient incités à le faire. Ceux-ci mémorisaient par exemple des *groupes* de commandes pour se les rappeler plus facilement (une stratégie connue

et étudiée en psychologie [7, 99]), *visualisaient* mentalement une représentation graphique de la commande (p.ex. des ciseaux pour la commande "couper", une méthode également connue [110]), ou s'aideraient de la signification de la commande (p.ex. "l'aigle est en haut parce qu'il vole", ce qui met à profit la mémoire sémantique [147]).

Bien que ces stratégies soient connues depuis longtemps en psychologie et qu'elles aient été exploitées pour développer des méthodes mnémotechniques, l'enjeu actuel pour les designers d'interaction est de pouvoir induire ces stratégies aux utilisateurs, lesquels n'en n'ont généralement pas connaissance. En modifiant la façon dont sont représentées et placées les commandes, il serait sans doute possible de suggérer aux participants d'utiliser une stratégie en particulier. Une première approche consisterait à mettre en évidence de petits *groupes* de commandes (par 2 ou 4 par exemple) pour améliorer les hiérarchies de menus déjà présentes, et inciter les utilisateurs à apprendre ces groupes de commandes. Des exemples de ce type de configuration sont proposés dans le Chapitre 3 (Figure 3.12).

Une autre approche, pour aider les utilisateurs à *visualiser* une commande, consisterait à utiliser des images qui peuvent être plus simples à mémoriser que des mots [110, 142], et leur permettrait de se représenter visuellement les concepts à mémoriser [81, 167]. Un point majeur est la façon dont sont placées ces images par rapport aux commandes que l'utilisateur doit mémoriser. Les avantages de cette approche semblent cependant mitigés [148] (voir Chapitre 4). Ces observations suggèrent qu'il est nécessaire d'effectuer des études approfondies focalisées sur cette problématique, pour pouvoir aider efficacement des utilisateurs à mémoriser des commandes.

Création de moyens mnémotechniques. Comme l'a révélé l'étude du Chapitre 4, proposer aux utilisateurs de créer des histoires liées à des commandes permet de considérablement mieux les mémoriser. Notre étude s'étant déroulée dans un cadre expérimental en laboratoire, il nous était facile de guider les utilisateurs à l'aide d'instruction, or l'enjeu est d'arriver au même effet dans un contexte d'utilisation réelle. Pour ce faire, il serait possible d'avertir l'utilisateur à l'aide de notifications intelligentes lorsque celui-ci sélectionne une commande. Ces notifications pourraient lui indiquer textuellement des moyens efficaces de la mémoriser en proposant des histoires comme l'ont fait les participants de nos études, ou bien en présentant des images frappantes à partir desquelles l'utilisateur créerait des histoires [22]. Plusieurs stratégies variées peuvent être utilisées pour aider les utilisateurs (p.ex. notification textuelle, sonore, imagée), dont les avantages et inconvénients sont incertains. Des études plus approfondies aideraient à les évaluer formellement. Des études ce sont déjà intéressées à cette problématique pour l'apprentissage de raccourcis clavier [59, 94].

Un autre point important de la création de moyens mnémoniques est la charge cognitive que cette tâche nécessite. Nos études n'étudient pas particulièrement cet aspect qui est central dans le contexte de la sélection de commandes, car l'utilisateur ne doit pas être dérangé dans sa tâche principale, au risque d'être interrompu. C'est un biais courant des expériences d'apprentissage explicite car les utilisateurs sont concentrés sur la mémorisation de commandes, alors qu'ils seraient concentrés sur une tâche principale dans un cas réel de sélection de commandes. Évaluer l'apprentissage de commandes dans un contexte réel d'utilisation d'un logiciel permettrait (1) d'évaluer l'effort cognitif requis pour créer des moyens mnémoniques, et (2) d'étudier différentes façons de notifier les utilisateurs.

Concrétisation des commandes. Les noms des commandes utilisés au cours des deux études de la première partie ont été choisis suivant des critères particuliers (p.ex. la fréquence d'apparition du mot dans un vocabulaire donné, ou faisant référence à des concepts plus ou moins concrets). Or certaines commandes de nos études évoquent des concepts très clairs pour certains utilisateurs, comme des animaux, mais d'autres semblent plus difficile à visualiser, comme par exemple les commandes *design* ou *media*. Le fait que les commandes d'applications peuvent faire référence à des concepts abstraits (p.ex. sauvegarder un document) peut être un frein à la mémorisation de celles-ci [108]. L'utilisation de mots clés plus concrets peut aider à les mémoriser [109], mais les ajouter à une interface utilisateur pourrait la surcharger, en même temps que gêner les utilisateurs à rechercher des commandes (voir exemples au Chapitre 3, Figure 3.12). La façon dont pourrait être utilisée une telle stratégie est cependant intéressante, et mériterait plus d'approfondissements.

Nous nous sommes inspirés de la méthode des loci [167] dans l'étude du Chapitre 4, en ajoutant des images d'arrière-plan pour aider les utilisateurs à créer des histoires et ainsi mieux mémoriser. L'effet de ces images n'a pas mené à des différences notables sur les taux de rappels des utilisateurs. Ceci peut s'expliquer par le fait que les utilisateurs étaient surchargés d'information et ne se concentraient que sur le noms des commandes, mais aussi par le type d'images utilisées. En effet, la méthode des loci nécessite que l'utilisateur associe des items à mémoriser avec des images frappantes pour faciliter leur mémorisation, or les images que nous avons utilisées ne l'étaient peut être pas suffisamment. Il serait intéressant de comparer dans le futur plusieurs types d'images pour voir si cela a un effet sur les résultats obtenus, et comparer différents placements de ces images (p.ex. en arrière-plan, en tant qu'icône, etc.) pour mieux comprendre ce qui a rendu cette stratégie peu efficace dans le cas de notre étude.

8.2.2 *Guidage et personnalisation des gestes*

Nous avons présenté dans le Chapitre 6 la technique d'interaction MarkPad qui tire avantage de marques visuelles ou visio-tactiles pour guider l'utilisateur et lui permettre d'activer un grand ensemble de commandes. Nous y avons aussi présenté un prototype qui permet à un utilisateur de personnaliser des gestes pour déclencher de multiples actions sur un ordinateur doté d'un pavé tactile. Ces deux aspects soulèvent plusieurs questions captivantes que nous abordons ci-dessous.

Type d'actions. Le prototype MarkPad permet d'associer un geste à une action parmi une liste de possibilités. Comme ces actions peuvent déclencher n'importe quel programme, un utilisateur expert peut déclencher n'importe quelle action sur son ordinateur. Cependant, assez peu d'actions différentes ont été utilisées par les utilisateurs au cours de l'étude longitudinale. Cette observation soulève deux questions intéressantes : (1) quels types d'actions les utilisateurs aimeraient associer à des raccourcis gestuels, et (2) comment des utilisateurs novices peuvent prendre conscience efficacement des actions à leur disposition.

Dans notre étude, les participants étaient accompagnés pour découvrir le logiciel, et comprendre comment personnaliser des gestes. Nous n'avons donc pas étudié la façon dont un utilisateur novice apprendrait de lui-même à utiliser ce type de gestes. De plus, la façon dont l'utilisateur personnalise des gestes peut lui sembler être un processus compliqué qui lui coûte du temps tout en demandant des efforts. En utilisant un programme adaptatif, la tâche de personnalisation pourrait être simplifiée. Un programme pourrait détecter les actions fréquentes de l'utilisateur (p.ex. ouvrir une application, un lien web, un dossier) et lui proposer de les associer à des gestes. Ce type de système pourrait aussi suggérer des zones dont l'utilisateur ne se sert pas fréquemment pour créer des gestes, de même que proposer des nouvelles fonctionnalités qui pourraient lui être utiles.

Guidage dynamique. Nous avons évalué l'utilisation de marques *passives* lors de nos expériences car ces marques sont faites de matériaux bon marché qui ont l'avantage de ne pas nécessiter de technologie avancée. Cependant, utiliser des marques *dynamiques* qui s'adaptent aux mouvements de l'utilisateur a l'avantage de guider l'utilisateur plus précisément en ne représentant que les gestes faisables (p.ex. représenter seulement les zones qui peuvent être sélectionnées). Ce type de marques peut être représenté *visuellement* si l'utilisateur interagit sur un écran tactile ou à l'aide d'une surface dont le relief peut changer [43, 141]. Elles peuvent aussi être *non-visuelles* en utilisant des *vibrations* ou des *sons*, et plusieurs types de marques différentes pourraient être combinés.

Utiliser des marques *non-visuelles* a l'avantage de ne pas surcharger la surface d'interaction sur laquelle une grande quantité d'information peut être affichée. L'utilisation de *vibrations* est une alternative particulièrement intéressante car elles sont reconnaissables par le toucher, et peuvent servir à simuler des rugosités de surface variées [3, 15, 119]. Ainsi plusieurs types de zones pourraient être juxtaposés pour ne pas avoir à laisser d'espaces entre elles, comme c'est le cas en utilisant des marques visuelles dans nos études. Cependant, il n'est pas évident que la précision reste aussi bonne que celle observée durant nos études, sachant que les utilisateurs regardaient souvent le pavé tactile. Cet aspect mériterait d'être étudié plus en profondeur.

Guidage naturel. Interagir en utilisant le corps comme une surface d'interaction permet de ressentir les mouvements des doigts sur la peau. Cette acuité peut faire office de "marque", en plus des plis de la peau et de d'autres repères naturels proposés par le corps, pour aider l'utilisateur à effectuer des gestes dépendants de positions. Cependant, la précision d'un tel sens reste à ce jour peu étudié en IHM. Avoir plus de connaissances à ce sujet permettrait de focaliser les interactions sur des parties précises du corps (p.ex. l'avant-bras ou la main), qui peuvent être plus ou moins sensibles, et offrir des possibilités d'interaction variées.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ACTRONIKA. *Tactronik*. URL : <http://www.actronika.com/>.
- [2] ADOBE. *Adobe Photoshop CC*. 2018. URL : <https://www.adobe.com/fr/products/photoshop.html>.
- [3] Michel AMBERG, Frédéric GIRAUD, Betty SEMAIL, Paolo OLIVO, Géry CASIEZ et Nicolas ROUSSEL. « STIMTAC : A Tactile Input Device with Programmable Friction ». In : *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium Adjunct on User Interface Software and Technology*. UIST '11 Adjunct. Santa Barbara, California, USA : ACM, 2011, p. 7–8. ISBN : 978-1-4503-1014-7. DOI : [10.1145/2046396.2046401](https://doi.org/10.1145/2046396.2046401). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2046396.2046401>.
- [4] Jussi ANGESLEVÄ, Ian OAKLEY, Stephen HUGHES et Sile O'MODHRAIN. « Body Mnemonics - Portable device interaction design concept ». In : *Adjunct Proceedings of the 16th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '16 Adjunct. New York, NY, USA : ACM, 2003.
- [5] Georg APITZ et François GUIMBRETIERE. « CrossY : A Crossing-based Drawing Application ». In : *Proceedings of the 17th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '04. Santa Fe, NM, USA : ACM, 2004, p. 3–12. ISBN : 1-58113-957-8. DOI : [10.1145/1029632.1029635](https://doi.org/10.1145/1029632.1029635). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1029632.1029635>.
- [6] Caroline APPERT et Shumin ZHAI. « Using Strokes As Command Shortcuts : Cognitive Benefits and Toolkit Support ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '09. Boston, MA, USA : ACM, 2009, p. 2289–2298. ISBN : 978-1-60558-246-7. DOI : [10.1145/1518701.1519052](https://doi.org/10.1145/1518701.1519052). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1518701.1519052>.
- [7] Alan D. BADDELEY. *Essentials of Human Memory (Classic Edition)*. East Sussex, UK : Psychology Press, 2013.
- [8] Alan D BADDELEY et Graham HITCH. « Working memory ». In : *Psychology of learning and motivation*. T. 8. Elsevier, 1974, p. 47–89.
- [9] Gilles BAILLY, Eric LECOLINET et Laurence NIGAY. « Flower Menu : A New Type of Marking Menu with Large Menu Breadth, Within Groups and Efficient Expert Mode Memorization ». In : *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces*. AVI '08. Napoli, Italy : ACM, 2008, p. 15–22. ISBN : 978-

- 1-60558-141-5. DOI : [10.1145/1385569.1385575](https://doi.org/10.1145/1385569.1385575). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1385569.1385575>.
- [10] Gilles BAILLY, Eric LECOLINET et Laurence NIGAY. « Visual Menu Techniques ». In : *ACM Comput. Surv.* 49.4 (déc. 2016), 60 :1–60 :41. ISSN : 0360-0300. DOI : [10.1145/3002171](https://doi.org/10.1145/3002171). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3002171>.
- [11] Gilles BAILLY, Jörg MÜLLER et Eric LECOLINET. « Design and evaluation of finger-count interaction : Combining multitouch gestures and menus ». In : *International Journal of Human-Computer Studies* 70.10 (2012), p. 673 –689. ISSN : 1071-5819. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhcs.2012.05.006>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S107158191200095X>.
- [12] Gilles BAILLY, Jörg MÜLLER, Michael ROHS, Daniel WIGDOR et Sven KRATZ. « ShoeSense : A New Perspective on Gestural Interaction and Wearable Applications ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '12. Austin, Texas, USA : ACM, 2012, p. 1239–1248. ISBN : 978-1-4503-1015-4. DOI : [10.1145/2207676.2208576](https://doi.org/10.1145/2207676.2208576). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2207676.2208576>.
- [13] Gilles BAILLY, Thomas PIETRZAK, Jonathan DEBER et Daniel J. WIGDOR. « MéTamorphe : Augmenting Hotkey Usage with Actuated Keys ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '13. Paris, France : ACM, 2013, p. 563–572. ISBN : 978-1-4503-1899-0. DOI : [10.1145/2470654.2470734](https://doi.org/10.1145/2470654.2470734). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2470654.2470734>.
- [14] Olivier BAU et Wendy E. MACKAY. « OctoPocus : A Dynamic Guide for Learning Gesture-based Command Sets ». In : *Proceedings of the 21st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '08. Monterey, CA, USA : ACM, 2008, p. 37–46. ISBN : 978-1-59593-975-3. DOI : [10.1145/1449715.1449724](https://doi.org/10.1145/1449715.1449724). URL : <http://doi.acm.org.gate6.inist.fr/10.1145/1449715.1449724>.
- [15] Olivier BAU, Ivan POUPYREV, Ali ISRAR et Chris HARRISON. « TeslaTouch : Electro-vibration for Touch Surfaces ». In : *Proceedings of the 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '10. New York, New York, USA : ACM, 2010, p. 283–292. ISBN : 978-1-4503-0271-5. DOI : [10.1145/1866029.1866074](https://doi.org/10.1145/1866029.1866074). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1866029.1866074>.
- [16] Joanna BERGSTROM-LEHTOVIRTA, Sebastian BORING et Kasper HORNBAEK. « Placing and Recalling Virtual Items on the Skin ». In : *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '17. Denver, Colorado, USA : ACM,

- 2017, p. 1497–1507. ISBN : 978-1-4503-4655-9. DOI : [10.1145/3025453.3026030](https://doi.org/10.1145/3025453.3026030). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3025453.3026030>.
- [17] Gabor BLASKO et Steven FEINER. « An Interaction System for Watch Computers Using Tactile Guidance and Bidirectional Segmented Strokes ». In : *Proceedings of the Eighth International Symposium on Wearable Computers*. ISWC '04. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 2004, p. 120–123. ISBN : 0-7695-2186-X. DOI : [10.1109/ISWC.2004.6](https://doi.org/10.1109/ISWC.2004.6). URL : <https://doi.org/10.1109/ISWC.2004.6>.
- [18] Gordon H. BOWER, Michal C. CLARK, Alan M. LESGOLD et David WINZENZ. « Hierarchical retrieval schemes in recall of categorized word lists ». In : *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 8.3 (1969), p. 323–343. DOI : [10.1016/S0022-5371\(69\)80124-6](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(69)80124-6).
- [19] Gary L. BRADSHAW et John R. ANDERSON. « Elaborative encoding as an explanation of levels of processing ». In : *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 21.2 (1982), p. 165–174. ISSN : 0022-5371. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(82\)90531-X](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(82)90531-X). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002253718290531X>.
- [20] Andrew BRAGDON, Eugene NELSON, Yang LI et Ken HINCKLEY. « Experimental Analysis of Touch-screen Gesture Designs in Mobile Environments ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '11. Vancouver, BC, Canada : ACM, 2011, p. 403–412. ISBN : 978-1-4503-0228-9. DOI : [10.1145/1978942.1979000](https://doi.org/10.1145/1978942.1979000). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1978942.1979000>.
- [21] Stephen BREWSTER et Lorna M. BROWN. « Tactons : Structured Tactile Messages for Non-visual Information Display ». In : *Proceedings of the Fifth Conference on Australasian User Interface - Volume 28*. AUIC '04. Darlinghurst, Australia, Australia : Australian Computer Society, Inc., 2004, p. 15–23. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=976310.976313>.
- [22] Gary G. BRIGGS, Stephen HAWKINS et Herbert F. CROVITZ. « Bizarre images in artificial memory ». In : *Psychonomic Science* 19.6 (1970), p. 353–354. ISSN : 0033-3131. DOI : [10.3758/BF03328856](https://doi.org/10.3758/BF03328856). URL : <http://dx.doi.org/10.3758/BF03328856>.
- [23] Donald Eric BROADBENT. *Perception and communication*. Amsterdam, Netherlands : Elsevier, 2013.
- [24] Maria Claudia BUZZI, Marina BUZZI, Francesco DONINI, Barbara LEPORINI et Maria Teresa PARATORE. « Haptic Reference Cues to Support the Exploration of Touchscreen Mobile Devices by Blind Users ». In : *Proceedings of the Biannual Confe-*

- rence of the Italian Chapter of SIGCHI. CHIItaly '13. Trento, Italy : ACM, 2013, 28 :1–28 :8. ISBN : 978-1-4503-2061-0. DOI : [10.1145/2499149.2499156](https://doi.org/10.1145/2499149.2499156). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2499149.2499156>.
- [25] Géry CASIEZ, Daniel VOGEL, Qing PAN et Christophe CHAILLOU. « RubberEdge : Reducing Clutching by Combining Position and Rate Control with Elastic Feedback ». In : *Proceedings of the 20th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '07. Newport, Rhode Island, USA : ACM, 2007, p. 129–138. ISBN : 978-1-59593-679-0. DOI : [10.1145/1294211.1294234](https://doi.org/10.1145/1294211.1294234). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1294211.1294234>.
- [26] Olivier CHAPUIS et Nicolas ROUSSEL. « Copy-and-paste Between Overlapping Windows ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '07. San Jose, California, USA : ACM, 2007, p. 201–210. ISBN : 978-1-59593-593-9. DOI : [10.1145/1240624.1240657](https://doi.org/10.1145/1240624.1240657). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1240624.1240657>.
- [27] Olivier CHAPUIS et Nicolas ROUSSEL. « UIMarks : Quick Graphical Interaction with Specific Targets ». In : *Proceedings of the 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '10. New York, New York, USA : ACM, 2010, p. 173–182. ISBN : 978-1-4503-0271-5. DOI : [10.1145/1866029.1866057](https://doi.org/10.1145/1866029.1866057). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1866029.1866057>.
- [28] Qin CHEN, Simon T. PERRAULT, Quentin ROY et Lonce WYSE. « Effect of Temporality, Physical Activity and Cognitive Load on Spatiotemporal Vibrotactile Pattern Recognition ». In : *Proceedings of the 2018 International Conference on Advanced Visual Interfaces*. AVI '18. Castiglione della Pescaia, Grosseto, Italy : ACM, 2018, 25 :1–25 :9. ISBN : 978-1-4503-5616-9. DOI : [10.1145/3206505.3206511](https://doi.org/10.1145/3206505.3206511). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3206505.3206511>.
- [29] Xiang 'Anthony' CHEN, Nicolai MARQUARDT, Anthony TANG, Sebastian BORING et Saul GREENBERG. « Extending a Mobile Device's Interaction Space Through Body-centric Interaction ». In : *Proceedings of the 14th International Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services*. MobileHCI '12. San Francisco, California, USA : ACM, 2012, p. 151–160. ISBN : 978-1-4503-1105-2. DOI : [10.1145/2371574.2371599](https://doi.org/10.1145/2371574.2371599). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2371574.2371599>.
- [30] Marvin M CHUN et Yuhong JIANG. « Contextual cueing : Implicit learning and memory of visual context guides spatial attention ». In : *Cognitive psychology* 36.1 (1998), p. 28–71.

- [31] Andy COCKBURN, Per Ola KRISTENSSON, Jason ALEXANDER et Shumin ZHAI. « Hard Lessons : Effort-inducing Interfaces Benefit Spatial Learning ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '07. San Jose, California, USA : ACM, 2007, p. 1571–1580. ISBN : 978-1-59593-593-9. DOI : [10.1145/1240624.1240863](https://doi.org/10.1145/1240624.1240863). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1240624.1240863>.
- [32] Andy COCKBURN, Carl GUTWIN, Joey SCARR et Sylvain MALACRIA. « Supporting Novice to Expert Transitions in User Interfaces ». In : *ACM Comput. Surv.* 47.2 (nov. 2014), 31 :1–31 :36. ISSN : 0360-0300. DOI : [10.1145/2659796](https://doi.org/10.1145/2659796). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2659796>.
- [33] Fergus I. M. CRAIK et Robert S. LOCKHART. « Levels of processing : A framework for memory research ». In : *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 11.6 (1972), p. 671 –684. ISSN : 0022-5371. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(72\)80001-X](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(72)80001-X). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002253717280001X>.
- [34] Herbert F. CROVITZ. « The capacity of memory loci in artificial memory ». In : *Psychonomic Science* 24.4 (1971), p. 187–188. DOI : [10.3758/BF03335561](https://doi.org/10.3758/BF03335561).
- [35] Mary CZERWINSKI, Maarten van DANTZICH, George ROBERTSON et Hunter HOFFMAN. « The Contribution of Thumbnail Image, Mouse-over Text and Spatial Location Memory to Web Page Retrieval in 3D ». In : IOS Press, 1999, p. 163–170. URL : <https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/the-contribution-of-thumbnail-image-mouse-over-text-and-spatial-location-memory-to-web-page-retrieval-in-3d/>.
- [36] Raimund DACHSELT et Anett HÜBNER. « Three-dimensional Menus : A Survey and Taxonomy ». In : *Comput. Graph.* 31.1 (jan. 2007), p. 53–65. ISSN : 0097-8493. DOI : [10.1016/j.cag.2006.09.006](https://doi.org/10.1016/j.cag.2006.09.006). URL : <http://dx.doi.org/10.1016/j.cag.2006.09.006>.
- [37] William DELAMARE, Céline COUTRIX et Laurence NIGAY. « Designing Guiding Systems for Gesture-based Interaction ». In : *Proceedings of the 7th ACM SIGCHI Symposium on Engineering Interactive Computing Systems*. EICS '15. Duisburg, Germany : ACM, 2015, p. 44–53. ISBN : 978-1-4503-3646-8. DOI : [10.1145/2774225.2774847](https://doi.org/10.1145/2774225.2774847). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2774225.2774847>.
- [38] Niloofar DEZFULI, Mohammadreza KHALILBEIGI, Jochen HUBER, Florian MÜLLER et Max MÜHLHÄUSER. « PalmRC : Imaginary Palm-based Remote Control for Eyes-free Television Interaction ». In : *Proceedings of the 10th European Conference*

- on Interactive TV and Video*. EuroITV '12. Berlin, Germany : ACM, 2012, p. 27–34. ISBN : 978-1-4503-1107-6. DOI : [10.1145/2325616.2325623](https://doi.org/10.1145/2325616.2325623). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2325616.2325623>.
- [39] Christian F. DOELLER et Neil BURGESS. « Distinct error-correcting and incidental learning of location relative to landmarks and boundaries ». In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105.15 (2008), p. 5909–5914. ISSN : 0027-8424. DOI : [10.1073/pnas.0711433105](https://doi.org/10.1073/pnas.0711433105). eprint : <http://www.pnas.org/content/105/15/5909.full.pdf>. URL : <http://www.pnas.org/content/105/15/5909>.
- [40] Brian D. EHRET. « Learning Where to Look : Location Learning in Graphical User Interfaces ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '02. New York, NY, USA : ACM, 2002, p. 211–218. ISBN : 1-58113-453-3. DOI : [10.1145/503376.503414](https://doi.org/10.1145/503376.503414). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/503376.503414>.
- [41] Tobii EYETRACKING. *Tobii EyeX*. URL : <http://www.tobii.com/xperience/>.
- [42] Leah FINDLATER, Karyn MOFFATT, Joanna MCGRENERE et Jessica DAWSON. « Ephemeral Adaptation : The Use of Gradual Onset to Improve Menu Selection Performance ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '09. Boston, MA, USA : ACM, 2009, p. 1655–1664. ISBN : 978-1-60558-246-7. DOI : [10.1145/1518701.1518956](https://doi.org/10.1145/1518701.1518956). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1518701.1518956>.
- [43] Sean FOLLMER, Daniel LEITHINGER, Alex OLWAL, Akimitsu HOGGE et Hiroshi ISHII. « inFORM : Dynamic Physical Affordances and Constraints Through Shape and Object Actuation ». In : *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '13. St. Andrews, Scotland, United Kingdom : ACM, 2013, p. 417–426. ISBN : 978-1-4503-2268-3. DOI : [10.1145/2501988.2502032](https://doi.org/10.1145/2501988.2502032). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2501988.2502032>.
- [44] Blender FOUNDATION. *Blender*. 2018. URL : <https://www.blender.org/>.
- [45] Jules FRANÇOISE, Olivier CHAPUIS, Sylvain HANNETON et Frédéric BEVILACQUA. « SoundGuides : Adapting Continuous Auditory Feedback to Users ». In : *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. CHI EA '16. San Jose, California, USA : ACM, 2016, p. 2829–2836. ISBN : 978-1-4503-4082-3. DOI : [10.1145/2851581.2892420](https://doi.org/10.1145/2851581.2892420). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2851581.2892420>.

- [46] Jérémie FRANCONÉ, Gilles BAILLY, Eric LECOLINET, Nadine MANDRAN et Laurence NIGAY. « Wavelet Menus on Handheld Devices : Stacking Metaphor for Novice Mode and Eyes-free Selection for Expert Mode ». In : *Proceedings of the International Conference on Advanced Visual Interfaces*. AVI '10. Roma, Italy : ACM, 2010, p. 173–180. ISBN : 978-1-4503-0076-6. DOI : [10.1145/1842993.1843025](https://doi.org/10.1145/1842993.1843025). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1842993.1843025>.
- [47] Peter A. FRENCH et Dennis RÜNGER. « Implicit Learning ». In : *Current Directions in Psychological Science* 12.1 (2003), p. 13–18. DOI : [10.1111/1467-8721.01213](https://doi.org/10.1111/1467-8721.01213). URL : <https://doi.org/10.1111/1467-8721.01213>.
- [48] Robert W. FRICK. « Using both an auditory and a visual short-term store to increase digit span ». In : *Memory & Cognition* 12.5 (1984), p. 507–514. ISSN : 1532-5946. DOI : [10.3758/BF03198313](https://doi.org/10.3758/BF03198313). URL : <https://doi.org/10.3758/BF03198313>.
- [49] Jon FROEHLICH, Jacob O. WOBROCK et Shaun K. KANE. « Barrier Pointing : Using Physical Edges to Assist Target Acquisition on Mobile Device Touch Screens ». In : *Proceedings of the 9th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*. Assets '07. Tempe, Arizona, USA : ACM, 2007, p. 19–26. ISBN : 978-1-59593-573-1. DOI : [10.1145/1296843.1296849](http://doi.acm.org/10.1145/1296843.1296849). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1296843.1296849>.
- [50] Bruno FRUCHARD, Eric LECOLINET et Olivier CHAPUIS. « Mark-Pad : Augmenting Touchpads for Command Selection ». In : *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '17. Denver, Colorado, USA : ACM, 2017, p. 5630–5642. ISBN : 978-1-4503-4655-9. DOI : [10.1145/3025453.3025486](http://doi.acm.org/10.1145/3025453.3025486). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3025453.3025486>.
- [51] Bruno FRUCHARD, Eric LECOLINET et Olivier CHAPUIS. « How Memorizing Positions or Directions Affects Gesture Learning? ». In : *Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*. ISS '18. Tokyo, Japan : ACM, 2018, p. 107–114. ISBN : 978-1-4503-5694-7. DOI : [10.1145/3279778.3279787](http://doi.acm.org/10.1145/3279778.3279787). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3279778.3279787>.
- [52] Bruno FRUCHARD, Eric LECOLINET et Olivier CHAPUIS. « Impact of Semantic Aids on Command Memorization for On-body Interaction and Directional Gestures ». In : *Proceedings of the 2018 International Conference on Advanced Visual Interfaces*. AVI '18. Castiglione della Pescaia, Grosseto, Italy : ACM, 2018, 14 :1–14 :9. ISBN : 978-1-4503-5616-9. DOI : [10.1145/3206505](https://doi.org/10.1145/3206505).

3206524. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3206505.3206524>.
- [53] Bruno FRUCHARD, Eric LECOLINET et Olivier CHAPUIS. « Mé-morisation de Commandes : Positions Spatiales versus Gestes Directionnels ». In : *30ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine*. Sous la dir. d'AFIHM. AFIHM. Brest, France : ACM, oct. 2018, 6 p.
- [54] Emilien GHOMI, Stéphane HUOT, Olivier BAU, Michel BEAUDOUIN-LAFON et Wendy E. MACKAY. « ArpèGe : Learning Multitouch Chord Gestures Vocabularies ». In : *Proceedings of the 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*. ITS '13. St. Andrews, Scotland, United Kingdom : ACM, 2013, p. 209–218. ISBN : 978-1-4503-2271-3. DOI : [10.1145/2512349.2512795](https://doi.org/10.1145/2512349.2512795). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2512349.2512795>.
- [55] Emmanouil GIANNISAKIS, Gilles BAILLY, Sylvain MALACRIA et Fanny CHEVALIER. « IconHK : Using Toolbar Button Icons to Communicate Keyboard Shortcuts ». In : *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '17. Denver, Colorado, USA : ACM, 2017, p. 4715–4726. ISBN : 978-1-4503-4655-9. DOI : [10.1145/3025453.3025595](https://doi.org/10.1145/3025453.3025595). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3025453.3025595>.
- [56] Jérémie GILLIOT, Géry CASIEZ et Nicolas ROUSSEL. « Impact of Form Factors and Input Conditions on Absolute Indirect-touch Pointing Tasks ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '14. Toronto, Ontario, Canada : ACM, 2014, p. 723–732. ISBN : 978-1-4503-2473-1. DOI : [10.1145/2556288.2556997](https://doi.org/10.1145/2556288.2556997). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2556288.2556997>.
- [57] Jérôme GROSJEAN et Sabine COQUILLART. « Command and Control Cube : a Shortcut Paradigm for Virtual Environments ». In : *Eurographics Workshop on Virtual Environments*. Springer, 2001, p. 1–12. ISBN : 3211836713. DOI : [10.2312/EGVE/EGVE01/001-012](https://doi.org/10.2312/EGVE/EGVE01/001-012).
- [58] Tovi GROSSMAN, Xiang Anthony CHEN et George FITZMAURICE. « Typing on Glasses : Adapting Text Entry to Smart Eyewear ». In : *Proceedings of the 17th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*. MobileHCI '15. Copenhagen, Denmark : ACM, 2015, p. 144–152. ISBN : 978-1-4503-3652-9. DOI : [10.1145/2785830.2785867](https://doi.org/10.1145/2785830.2785867). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2785830.2785867>.
- [59] Tovi GROSSMAN, Pierre DRAGICEVIC et Ravin BALAKRISHNAN. « Strategies for Accelerating On-line Learning of Hotkeys ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '07. San Jose, California, USA : ACM,

- 2007, p. 1591–1600. ISBN : 978-1-59593-593-9. DOI : [10.1145/1240624.1240865](https://doi.org/10.1145/1240624.1240865). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1240624.1240865>.
- [60] Tiago GUERREIRO, Ricardo GAMBOA et Joaquim JORGE. « Mnemonical Body Shortcuts : Improving Mobile Interaction ». In : *Proceedings of the 15th European Conference on Cognitive Ergonomics : The Ergonomics of Cool Interaction*. ECCE '08. Funchal, Portugal : ACM, 2008, 11 :1–11 :8. ISBN : 978-1-60558-399-0. DOI : [10.1145/1473018.1473033](https://doi.org/10.1145/1473018.1473033). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1473018.1473033>.
- [61] François GUIMBRETIERE et Terry WINOGRAD. « FlowMenu : Combining Command, Text, and Data Entry ». In : *Proceedings of the 13th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '00. San Diego, California, USA : ACM, 2000, p. 213–216. ISBN : 1-58113-212-3. DOI : [10.1145/354401.354778](https://doi.org/10.1145/354401.354778). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/354401.354778>.
- [62] Sean GUSTAFSON, Daniel BIERWIRTH et Patrick BAUDISCH. « Imaginary Interfaces : Spatial Interaction with Empty Hands and Without Visual Feedback ». In : *Proceedings of the 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '10. New York, New York, USA : ACM, 2010, p. 3–12. ISBN : 978-1-4503-0271-5. DOI : [10.1145/1866029.1866033](https://doi.org/10.1145/1866029.1866033). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1866029.1866033>.
- [63] Sean GUSTAFSON, Christian HOLZ et Patrick BAUDISCH. « Imaginary Phone : Learning Imaginary Interfaces by Transferring Spatial Memory from a Familiar Device ». In : *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '11. Santa Barbara, California, USA : ACM, 2011, p. 283–292. ISBN : 978-1-4503-0716-1. DOI : [10.1145/2047196.2047233](https://doi.org/10.1145/2047196.2047233). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2047196.2047233>.
- [64] Carl GUTWIN et Andy COCKBURN. « Improving List Revisitation with ListMaps ». In : *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces*. AVI '06. Venezia, Italy : ACM, 2006, p. 396–403. ISBN : 1-59593-353-0. DOI : [10.1145/1133265.1133347](https://doi.org/10.1145/1133265.1133347). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1133265.1133347>.
- [65] Carl GUTWIN et Andy COCKBURN. « Improving List Revisitation with ListMaps ». In : *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces*. AVI '06. New York, NY, USA : ACM, 2006, p. 396–403. ISBN : 1-59593-353-0. DOI : [10.1145/1133265.1133347](https://doi.org/10.1145/1133265.1133347). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1133265.1133347>.

- [66] Carl GUTWIN, Andy COCKBURN, Joey SCARR, Sylvain MALACRIA et Scott C. OLSON. « Faster Command Selection on Tablets with FastTap ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '14. Toronto, Ontario, Canada : ACM, 2014, p. 2617–2626. ISBN : 978-1-4503-2473-1. DOI : [10.1145/2556288.2557136](https://doi.org/10.1145/2556288.2557136). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2556288.2557136>.
- [67] Teng HAN, Jiannan LI, Khalad HASAN, Keisuke NAKAMURA, Randy GOMEZ, Ravin BALAKRISHNAN et Pourang IRANI. « PageFlip : Leveraging Page-Flipping Gestures for Efficient Command and Value Selection on Smartwatches ». In : *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '18. Montreal QC, Canada : ACM, 2018, 529 :1–529 :12. ISBN : 978-1-4503-5620-6. DOI : [10.1145/3173574.3174103](https://doi.org/10.1145/3173574.3174103). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3173574.3174103>.
- [68] Chris HARRISON et Scott E. HUDSON. « Providing Dynamically Changeable Physical Buttons on a Visual Display ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '09. Boston, MA, USA : ACM, 2009, p. 299–308. ISBN : 978-1-60558-246-7. DOI : [10.1145/1518701.1518749](https://doi.org/10.1145/1518701.1518749). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1518701.1518749>.
- [69] Chris HARRISON, Shilpa RAMAMURTHY et Scott E. HUDSON. « On-body Interaction : Armed and Dangerous ». In : *Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*. TEI '12. Kingston, Ontario, Canada : ACM, 2012, p. 69–76. ISBN : 978-1-4503-1174-8. DOI : [10.1145/2148131.2148148](https://doi.org/10.1145/2148131.2148148). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2148131.2148148>.
- [70] Chris HARRISON, Desney TAN et Dan MORRIS. « Skinput : Appropriating the Body As an Input Surface ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '10. Atlanta, Georgia, USA : ACM, 2010, p. 453–462. ISBN : 978-1-60558-929-9. DOI : [10.1145/1753326.1753394](https://doi.org/10.1145/1753326.1753394). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1753326.1753394>.
- [71] Sandra G. HART et Lowell E. STAVELAND. « Development of NASA-TLX (Task Load Index) : Results of Empirical and Theoretical Research ». In : *Human Mental Workload*. T. 52. Advances in Psychology. North-Holland, 1988, p. 139 –183. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166411508623869>.
- [72] Stephane HUOT et et AL. *PUSH MENU : EXTENDING MARKING MENUS FOR PRESSURE-ENABLED INPUT SERVICES*. 2008.

- [73] Mohit JAIN et Ravin BALAKRISHNAN. « User Learning and Performance with Bezel Menus ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '12. Austin, Texas, USA : ACM, 2012, p. 2221–2230. ISBN : 978-1-4503-1015-4. DOI : [10.1145/2207676.2208376](https://doi.org/10.1145/2207676.2208376). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2207676.2208376>.
- [74] Sungjune JANG, Lawrence H. KIM, Kesler TANNER, Hiroshi ISHII et Sean FOLLMER. « Haptic Edge Display for Mobile Tactile Interaction ». In : *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '16. San Jose, California, USA : ACM, 2016, p. 3706–3716. ISBN : 978-1-4503-3362-7. DOI : [10.1145/2858036.2858264](https://doi.org/10.1145/2858036.2858264). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2858036.2858264>.
- [75] Eric A JOHNSON. « A study of the effects of immersion on short-term spatial memory ». In : (2010).
- [76] Jingun JUNG, Eunhye YOUN et Geehyuk LEE. « PinPad : Touchpad Interaction with Fast and High-Resolution Tactile Output ». In : *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '17. Denver, Colorado, USA : ACM, 2017, p. 2416–2425. ISBN : 978-1-4503-4655-9. DOI : [10.1145/3025453.3025971](https://doi.org/10.1145/3025453.3025971). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3025453.3025971>.
- [77] Shaun K. KANE, Meredith Ringel MORRIS et Jacob O. WOBROCK. « Touchplates : Low-cost Tactile Overlays for Visually Impaired Touch Screen Users ». In : *Proceedings of the 15th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*. ASSETS '13. Bellevue, Washington : ACM, 2013, 22 :1–22 :8. ISBN : 978-1-4503-2405-2. DOI : [10.1145/2513383.2513442](https://doi.org/10.1145/2513383.2513442). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2513383.2513442>.
- [78] Thorsten KARRER, Moritz WITTENHAGEN, Leonhard LICHTSCHLAG, Florian HELLER et Jan BORCHERS. « Pinstripe : Eyes-free Continuous Input on Interactive Clothing ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '11. Vancouver, BC, Canada : ACM, 2011, p. 1313–1322. ISBN : 978-1-4503-0228-9. DOI : [10.1145/1978942.1979137](https://doi.org/10.1145/1978942.1979137). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1978942.1979137>.
- [79] Katja KATJA WIEMER-HASTINGS et Xu XU. « Content differences for abstract and concrete concepts ». In : *Cognitive science* 29.5 (2005), p. 719–736.
- [80] Robert KINCAID. « Tactile Guides for Touch Screen Controls ». In : *Proceedings of the 26th Annual BCS Interaction Specialist Group Conference on People and Computers*. BCS-HCI '12. Birmingham, United Kingdom : British Computer Society, 2012, p. 339–344. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2377916.2377963>.

- [81] S. KOSSLYN, M. BEHRMANN et M. JEANNEROD. « The cognitive neuroscience of mental imagery ». In : *Neuropsychologia* 33.11 (1995), p. 1335–1344. ISSN : 0028-3932. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002839329500067D>.
- [82] Yuki KUBO, Buntarou SHIZUKI et Jiro TANAKA. « B2B-Swipe : Swipe Gesture for Rectangular Smartwatches from a Bezel to a Bezel ». In : *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '16. Santa Clara, California, USA : ACM, 2016, p. 3852–3856. ISBN : 978-1-4503-3362-7. DOI : [10.1145/2858036.2858216](https://doi.org/10.1145/2858036.2858216). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2858036.2858216>.
- [83] Gordon KURTENBACH et William BUXTON. « The Limits of Expert Performance Using Hierarchic Marking Menus ». In : *Proceedings of the INTERCHI '93 Conference on Human Factors in Computing Systems*. INTERCHI '93. Amsterdam, The Netherlands : IOS Press, 1993, p. 482–487. ISBN : 90-5199-133-9. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=164632.164977>.
- [84] Benjamin LAFRENIERE, Carl GUTWIN et Andy COCKBURN. « Investigating the Post-Training Persistence of Expert Interaction Techniques ». In : *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 24.4 (août 2017), 29 :1–29 :46. ISSN : 1073-0516. DOI : [10.1145/3119928](https://doi.org/10.1145/3119928). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3119928>.
- [85] Benjamin LAFRENIERE, Carl GUTWIN, Andy COCKBURN et Tovi GROSSMAN. « Faster Command Selection on Touchscreen Watches ». In : *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '16. Santa Clara, California, USA : ACM, 2016, p. 4663–4674. ISBN : 978-1-4503-3362-7. DOI : [10.1145/2858036.2858166](https://doi.org/10.1145/2858036.2858166). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2858036.2858166>.
- [86] Joseph Ting chun LAI, Yang LI et Richard ANDERSON. *Donuts : A Chinese Input Technique Using Pressure-Sensitive Marking Menus*. 2005.
- [87] Nilli LAVIE. « Perceptual load as a necessary condition for selective attention. » In : *Journal of Experimental Psychology : Human perception and performance* 21.3 (1995), p. 451. DOI : [10.1037/0096-1523.21.3.451](https://doi.org/10.1037/0096-1523.21.3.451).
- [88] G. Julian LEPINSKI, Tovi GROSSMAN et George FITZMAURICE. « The Design and Evaluation of Multitouch Marking Menus ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '10. Atlanta, Georgia, USA : ACM, 2010, p. 2233–2242. ISBN : 978-1-60558-929-9. DOI : [10.1145/1753326.1753663](https://doi.org/10.1145/1753326.1753663). URL : <http://doi.acm.org.gate6.inist.fr/10.1145/1753326.1753663>.

- [89] Rock LEUNG, Karon MACLEAN, Martin Bue BERTELSEN et Mayukh SAUBHASIK. « Evaluation of Haptically Augmented Touchscreen Gui Elements Under Cognitive Load ». In : *Proceedings of the 9th International Conference on Multimodal Interfaces*. ICMI '07. Nagoya, Aichi, Japan : ACM, 2007, p. 374–381. ISBN : 978-1-59593-817-6. DOI : [10 . 1145 / 1322192 . 1322258](https://doi.org/10.1145/1322192.1322258). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1322192.1322258>.
- [90] Yi-Chi LIAO, Yi-Ling CHEN, Jo-Yu LO, Rong-Hao LIANG, Liwei CHAN et Bing-Yu CHEN. « EdgeVib : Effective Alphanumeric Character Output Using a Wrist-Worn Tactile Display ». In : *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '16. Tokyo, Japan : ACM, 2016, p. 595–601. ISBN : 978-1-4503-4189-9. DOI : [10 . 1145 / 2984511 . 2984522](https://doi.org/10.1145/2984511.2984522). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2984511.2984522>.
- [91] Yi-Chi LIAO, Yen-Chiu CHEN, Liwei CHAN et Bing-Yu CHEN. « Dwell+ : Multi-Level Mode Selection Using Vibrotactile Cues ». In : *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '17. Québec City, QC, Canada : ACM, 2017, p. 5–16. ISBN : 978-1-4503-4981-9. DOI : [10 . 1145 / 3126594 . 3126627](https://doi.org/10.1145/3126594.3126627). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3126594.3126627>.
- [92] Shu-Yang LIN, Chao-Huai SU, Kai-Yin CHENG, Rong-Hao LIANG, Tzu-Hao KUO et Bing-Yu CHEN. « Pub - Point Upon Body : Exploring Eyes-free Interaction and Methods on an Arm ». In : *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '11. Santa Barbara, California, USA : ACM, 2011, p. 481–488. ISBN : 978-1-4503-0716-1. DOI : [10 . 1145 / 2047196 . 2047259](https://doi.org/10.1145/2047196.2047259). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2047196.2047259>.
- [93] Eleanor A MAGUIRE, Elizabeth R VALENTINE, John M WILDING et Narinder KAPUR. « Routes to remembering : the brains behind superior memory ». In : *Nature neuroscience* 6.1 (2003), p. 90.
- [94] Sylvain MALACRIA, Joey SCARR, Andy COCKBURN, Carl GUTWIN et Tovi GROSSMAN. « Skillometers : Reflective Widgets That Motivate and Help Users to Improve Performance ». In : *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '13. St. Andrews, Scotland, United Kingdom : ACM, 2013, p. 321–330. ISBN : 978-1-4503-2268-3. DOI : [10 . 1145 / 2501988 . 2501996](https://doi.org/10.1145/2501988.2501996). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2501988.2501996>.
- [95] Sylvain MALACRIA, Alix GOCUEY, Gilles BAILLY et Géry CASIEZ. « Multi-touch Trackpads in the Wild ». In : *Actes De La 28IÈMe ConfÉrence Francophone Sur L'Interaction Homme-Machine*. IHM

- '16. Fribourg, Switzerland : ACM, 2016, p. 19–24. ISBN : 978-1-4503-4243-8. DOI : [10.1145/3004107.3004113](https://doi.org/10.1145/3004107.3004113). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3004107.3004113>.
- [96] Jean M MANDLER, Dale SEEGMILLER et Jeanne DAY. « On the coding of spatial information ». In : *Memory & Cognition* 5.1 (1977), p. 10–16.
- [97] Timothy P McNAMARA, James K HARDY et Stephen C HIRTLE. « Subjective hierarchies in spatial memory. » In : *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition* 15.2 (1989), p. 211.
- [98] MICROSOFT. *Microsoft Kinect*. 2017. URL : <http://www.xbox.com/xbox-one/accessories/kinect>.
- [99] George A. MILLER. « The magical number seven, plus or minus two : some limits on our capacity for processing information. » In : *Psychological review* 63.2 (1956), p. 81. DOI : [10.1037/h0043158](https://doi.org/10.1037/h0043158).
- [100] Seyed Yaghoub MOUSAVI, Renae LOW et John SWELLER. « Reducing cognitive load by mixing auditory and visual presentation modes. » In : *Journal of educational psychology* 87.2 (1995), p. 319. DOI : [10.1037/0022-0663.87.2.319](https://doi.org/10.1037/0022-0663.87.2.319).
- [101] Miguel A. NACENTA, Yemliha KAMBER, Yizhou QIANG et Per Ola KRISTENSSON. « Memorability of Pre-designed and User-defined Gesture Sets ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '13. New York, NY, USA : ACM, 2013, p. 1099–1108. ISBN : 978-1-4503-1899-0. DOI : [10.1145/2470654.2466142](https://doi.org/10.1145/2470654.2466142). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2470654.2466142>.
- [102] Miguel A. NACENTA, Yemliha KAMBER, Yizhou QIANG et Per Ola KRISTENSSON. « Memorability of Pre-designed and User-defined Gesture Sets ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '13. Paris, France : ACM, 2013, p. 1099–1108. ISBN : 978-1-4503-1899-0. DOI : [10.1145/2470654.2466142](https://doi.org/10.1145/2470654.2466142). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2470654.2466142>.
- [103] Mathieu NANCEL et Michel BEAUDOUIN-LAFON. *Extending Marking Menus with Integral Dimensions : Application to the Dartboard Menu*. Rapp. tech. Technical report 1503. LRI, 2008.
- [104] K. L. NORMAN. *The Psychology of Menu Selection : Designing Cognitive Control at the Human/Computer Interface*. Norwood, NJ, USA : Ablex Publishing Corp., 1991.
- [105] Kent L NORMAN. *The psychology of menu selection : Designing cognitive control at the human/computer interface*. Intellect Books, 1991.

- [106] Ian OAKLEY, DoYoung LEE, MD. Rasel ISLAM et Augusto ESTEVES. « Beats : Tapping Gestures for Smart Watches ». In : *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '15. Seoul, Republic of Korea : ACM, 2015, p. 1237–1246. ISBN : 978-1-4503-3145-6. DOI : [10.1145/2702123.2702226](https://doi.org/10.1145/2702123.2702226). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2702123.2702226>.
- [107] Uran OH, Shaun K. KANE et Leah FINDLATER. « Follow That Sound : Using Sonification and Corrective Verbal Feedback to Teach Touchscreen Gestures ». In : *Proceedings of the 15th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*. ASSETS '13. Bellevue, Washington : ACM, 2013, 13 :1–13 :8. ISBN : 978-1-4503-2405-2. DOI : [10.1145/2513383.2513455](https://doi.org/10.1145/2513383.2513455). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2513383.2513455>.
- [108] Allan PAIVIO. « Abstractness, imagery, and meaningfulness in paired-associate learning ». In : *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 4.1 (1965), p. 32 –38. ISSN : 0022-5371. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(65\)80064-0](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(65)80064-0). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022537165800640>.
- [109] Allan PAIVIO. *Imagery and verbal process*. New York, USA : Holt, Rinehart et Winston, 1971.
- [110] Allan PAIVIO, Timothy B ROGERS et Padric C SMYTHE. « Why are pictures easier to recall than words? » In : *Psychonomic Science* 11.4 (1968), p. 137–138.
- [111] Pekka PARHI, Amy K. KARLSON et Benjamin B. BEDERSON. « Target Size Study for One-handed Thumb Use on Small Touchscreen Devices ». In : *Proceedings of the 8th Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services*. MobileHCI '06. Helsinki, Finland : ACM, 2006, p. 203–210. ISBN : 1-59593-390-5. DOI : [10.1145/1152215.1152260](https://doi.org/10.1145/1152215.1152260). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1152215.1152260>.
- [112] Emanuel PARZEN. « On Estimation of a Probability Density Function and Mode ». In : *Ann. Math. Statist.* 33.3 (sept. 1962), p. 1065–1076. DOI : [10.1214/aoms/1177704472](https://doi.org/10.1214/aoms/1177704472). URL : <https://doi.org/10.1214/aoms/1177704472>.
- [113] Thomas V. PERNER. « What's wrong with Bonferroni adjustments ». In : *British Medical Journal* 316.7139 (1998), p. 1236–1238. ISSN : 0959-8138. DOI : [10.1136/bmj.316.7139.1236](https://doi.org/10.1136/bmj.316.7139.1236). eprint : <http://www.bmj.com/content/316/7139/1236>. URL : <http://www.bmj.com/content/316/7139/1236>.
- [114] Simon T. PERRAULT, Eric LECOLINET, Yoann Pascal BOURSE, Shengdong ZHAO et Yves GUIARD. « Physical Loci : Leveraging Spatial, Object and Semantic Memory for Command Se-

- lection ». In : *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '15. Seoul, Republic of Korea : ACM, 2015, p. 299–308. ISBN : 978-1-4503-3145-6. DOI : [10.1145/2702123.2702126](https://doi.org/10.1145/2702123.2702126). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2702123.2702126>.
- [115] Martin PIELOT, Anastasia KAZAKOVA, Tobias HESSELMANN, Wilko HEUTEN et Susanne BOLL. « PocketMenu : Non-visual Menus for Touch Screen Devices ». In : *Proceedings of the 14th International Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services*. MobileHCI '12. San Francisco, California, USA : ACM, 2012, p. 327–330. ISBN : 978-1-4503-1105-2. DOI : [10.1145/2371574.2371624](https://doi.org/10.1145/2371574.2371624). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2371574.2371624>.
- [116] Stuart POOK, Eric LECOLINET, Guy VAYSSEIX et Emmanuel BARRILLOT. « Control Menus : Execution and Control in a Single Interactor ». In : *CHI '00 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. CHI EA '00. The Hague, The Netherlands : ACM, 2000, p. 263–264. ISBN : 1-58113-248-4. DOI : [10.1145/633292.633446](https://doi.org/10.1145/633292.633446). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/633292.633446>.
- [117] Michael R. RAUGH et Richard C. ATKINSON. *A mnemonic method for the acquisition of a second-language vocabulary*. Stanford, CA, USA : Inst. for Math. Studies in the Social Sciences – Stanford University, 1974.
- [118] Amir RAZ, Mark G PACKARD, Gerianne M ALEXANDER, Jason T BUHLE, Hongtu ZHU, Shan YU et Bradley S PETERSON. « A slice of π : An exploratory neuroimaging study of digit encoding and retrieval in a superior memorist ». In : *Neurocase* 15.5 (2009), p. 361–372. DOI : [10.1080/13554790902776896](https://doi.org/10.1080/13554790902776896).
- [119] Yosra REKIK, Radu-Daniel VATAVU et Laurent GRISONI. « Understanding Users' Perceived Difficulty of Multi-Touch Gesture Articulation ». In : *Proceedings of the 16th International Conference on Multimodal Interaction*. ICMI '14. Istanbul, Turkey : ACM, 2014, p. 232–239. ISBN : 978-1-4503-2885-2. DOI : [10.1145/2663204.2663273](https://doi.org/10.1145/2663204.2663273). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2663204.2663273>.
- [120] George ROBERTSON, Mary CZERWINSKI, Kevin LARSON, Daniel C. ROBBINS, David THIEL et Maarten van DANTZICH. « Data Mountain : Using Spatial Memory for Document Management ». In : *Proceedings of the 11th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '98. San Francisco, California, USA : ACM, 1998, p. 153–162. ISBN : 1-58113-034-1. DOI : [10.1145/288392.288596](https://doi.org/10.1145/288392.288596). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/288392.288596>.

- [121] George ROBERTSON, Maarten van DANTZICH, Daniel ROBBINS, Mary CZERWINSKI, Ken HINCKLEY, Kirsten RISDEN, David THIEL et Vadim GOROKHOVSKY. « The Task Gallery : A 3D Window Manager ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '00. The Hague, The Netherlands : ACM, 2000, p. 494–501. ISBN : 1-58113-216-6. DOI : [10.1145/332040.332482](https://doi.org/10.1145/332040.332482). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/332040.332482>.
- [122] Simon ROBINSON, Céline COUTRIX, Jennifer PEARSON, Juan Rosso, Matheus Fernandes TORQUATO, Laurence NIGAY et Matt JONES. « Emergeables : Deformable Displays for Continuous Eyes-Free Mobile Interaction ». In : *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '16. San Jose, California, USA : ACM, 2016, p. 3793–3805. ISBN : 978-1-4503-3362-7. DOI : [10.1145/2858036.2858097](https://doi.org/10.1145/2858036.2858097). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2858036.2858097>.
- [123] Murray ROSENBLATT. « Remarks on Some Nonparametric Estimates of a Density Function ». In : *Ann. Math. Statist.* 27.3 (sept. 1956), p. 832–837. DOI : [10.1214/aoms/1177728190](https://doi.org/10.1214/aoms/1177728190). URL : <https://doi.org/10.1214/aoms/1177728190>.
- [124] Volker ROTH et Thea TURNER. « Bezel Swipe : Conflict-free Scrolling and Multiple Selection on Mobile Touch Screen Devices ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '09. Boston, MA, USA : ACM, 2009, p. 1523–1526. ISBN : 978-1-60558-246-7. DOI : [10.1145/1518701.1518933](https://doi.org/10.1145/1518701.1518933). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1518701.1518933>.
- [125] Volker ROTH et Thea TURNER. « Bezel Swipe : Conflict-free Scrolling and Multiple Selection on Mobile Touch Screen Devices ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '09. New York, NY, USA : ACM, 2009, p. 1523–1526. ISBN : 978-1-60558-246-7. DOI : [10.1145/1518701.1518933](https://doi.org/10.1145/1518701.1518933). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1518701.1518933>.
- [126] Anne ROUDAUT, Gilles BAILLY, Eric LECOLINET et Laurence NIGAY. « Leaf Menus : Linear Menus with Stroke Shortcuts for Small Handheld Devices ». In : *Proceedings of the 12th IFIP TC 13 International Conference on Human-Computer Interaction : Part I*. INTERACT '09. Uppsala, Sweden : Springer-Verlag, 2009, p. 616–619. ISBN : 978-3-642-03654-5. DOI : [10.1007/978-3-642-03655-2_69](https://doi.org/10.1007/978-3-642-03655-2_69). URL : https://doi.org/10.1007/978-3-642-03655-2_69.
- [127] Anne ROUDAUT, Andreas RAU, Christoph STERZ, Max PLAUTH, Pedro LOPES et Patrick BAUDISCH. « Gesture Output : Eyes-free Output Using a Force Feedback Touch Surface ». In : *Pro-*

- ceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '13. Paris, France : ACM, 2013, p. 2547–2556. ISBN : 978-1-4503-1899-0. DOI : [10.1145/2470654.2481352](https://doi.org/10.1145/2470654.2481352). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2470654.2481352>.
- [128] Quentin ROY, Sylvain MALACRIA, Yves GUIARD, Eric LECOLINET et James EAGAN. « Augmented Letters : Mnemonic Gesture-based Shortcuts ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '13. Paris, France : ACM, 2013, p. 2325–2328. ISBN : 978-1-4503-1899-0. DOI : [10.1145/2470654.2481321](https://doi.org/10.1145/2470654.2481321). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2470654.2481321>.
- [129] Vít RUSNÁK, Caroline APPERT, Olivier CHAPUIS et Emmanuel PIETRIGA. « Designing Coherent Gesture Sets for Multi-scale Navigation on Tabletops ». In : *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '18. Montreal QC, Canada : ACM, 2018, 142 :1–142 :12. ISBN : 978-1-4503-5620-6. DOI : [10.1145/3173574.3173716](https://doi.org/10.1145/3173574.3173716). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3173574.3173716>.
- [130] Joey SCARR, Andy COCKBURN, Carl GUTWIN et Philip QUINN. « Dips and Ceilings : Understanding and Supporting Transitions to Expertise in User Interfaces ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '11. Vancouver, BC, Canada : ACM, 2011, p. 2741–2750. ISBN : 978-1-4503-0228-9. DOI : [10.1145/1978942.1979348](https://doi.org/10.1145/1978942.1979348). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1978942.1979348>.
- [131] Joey SCARR, Andy COCKBURN, Carl GUTWIN et Andrea BUNT. « Improving Command Selection with CommandMaps ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '12. Austin, Texas, USA : ACM, 2012, p. 257–266. ISBN : 978-1-4503-1015-4. DOI : [10.1145/2207676.2207713](https://doi.org/10.1145/2207676.2207713). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2207676.2207713>.
- [132] Joey SCARR, Andy COCKBURN, Carl GUTWIN et Sylvain MALACRIA. « Testing the Robustness and Performance of Spatially Consistent Interfaces ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '13. Paris, France : ACM, 2013, p. 3139–3148. ISBN : 978-1-4503-1899-0. DOI : [10.1145/2470654.2466430](https://doi.org/10.1145/2470654.2466430). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2470654.2466430>.
- [133] Joey SCARR, Carl GUTWIN, Andy COCKBURN et Andrea BUNT. « StencilMaps and EphemeralMaps : Spatially Stable Interfaces That Highlight Command Subsets ». In : *Behav. Inf. Technol.* 34.11 (nov. 2015), p. 1092–1106. ISSN : 0144-929X. DOI : [10.1080/0144929X.2015.1046927](https://doi.org/10.1080/0144929X.2015.1046927). URL : <http://dx.doi.org/10.1080/0144929X.2015.1046927>.

- [134] Richard A. SCHMIDT, Timothy Donald LEE et al. *Motor control and learning : A behavioral emphasis*. T. 4. Champaign, IL, USA : Human kinetics, 2005.
- [135] Katherine SCHRAMM, Carl GUTWIN et Andy COCKBURN. « Supporting Transitions to Expertise in Hidden Toolbars ». In : *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '16. San Jose, California, USA : ACM, 2016, p. 4687–4698. ISBN : 978-1-4503-3362-7. DOI : [10.1145/2858036.2858412](https://doi.org/10.1145/2858036.2858412). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2858036.2858412>.
- [136] Marcos SERRANO, Eric LECOLINET et Yves GUIARD. « Bezel-Tap Gestures : Quick Activation of Commands from Sleep Mode on Tablets ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '13. New York, NY, USA : ACM, 2013, p. 3027–3036. ISBN : 978-1-4503-1899-0. DOI : [10.1145/2470654.2481421](https://doi.org/10.1145/2470654.2481421). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2470654.2481421>.
- [137] Marcos SERRANO, Eric LECOLINET et Yves GUIARD. « Bezel-Tap Gestures : Quick Activation of Commands from Sleep Mode on Tablets ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '13. Paris, France : ACM, 2013, p. 3027–3036. ISBN : 978-1-4503-1899-0. DOI : [10.1145/2470654.2481421](https://doi.org/10.1145/2470654.2481421). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2470654.2481421>.
- [138] Marcos SERRANO, Anne ROUDAUT et Pourang IRANI. « Visual Composition of Graphical Elements on Non-Rectangular Displays ». In : *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '17. Denver, Colorado, USA : ACM, 2017, p. 4405–4416. ISBN : 978-1-4503-4655-9. DOI : [10.1145/3025453.3025677](https://doi.org/10.1145/3025453.3025677). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3025453.3025677>.
- [139] Marcos SERRANO, Khalad HASAN, Barrett ENS, Xing-Dong YANG et Pourang IRANI. « Smartwatches + Head-Worn Displays : the "New" Smartphone ». In : *ACM Workshop on Mobile Collocated Interaction (W28 - CHI 2015)*. Seoul, KR : ACM, 2015, p. 1–5. URL : <http://oatao.univ-toulouse.fr/15288/>.
- [140] Gaganpreet SINGH, William DELAMARE et Pourang IRANI. « D-SWIME : A Design Space for Smartwatch Interaction Techniques Supporting Mobility and Encumbrance ». In : *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '18. Montreal QC, Canada : ACM, 2018, 634 :1–634 :13. ISBN : 978-1-4503-5620-6. DOI : [10.1145/3173574.3174208](https://doi.org/10.1145/3173574.3174208). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3173574.3174208>.

- [141] Alexa F. SIU, Eric J. GONZALEZ, Shenli YUAN, Jason GINSBERG, Allen ZHAO et Sean FOLLMER. « shapeShift : A Mobile Table-top Shape Display for Tangible and Haptic Interaction ». In : *Adjunct Publication of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '17. Quebec City, QC, Canada : ACM, 2017, p. 77–79. ISBN : 978-1-4503-5419-6. DOI : [10.1145/3131785.3131792](https://doi.org/10.1145/3131785.3131792). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3131785.3131792>.
- [142] Lionel STANDING. « Learning 10000 pictures ». In : *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 25.2 (1973), p. 207–222. DOI : [10.1080/14640747308400340](https://doi.org/10.1080/14640747308400340). eprint : <https://doi.org/10.1080/14640747308400340>. URL : <https://doi.org/10.1080/14640747308400340>.
- [143] STUDENT. « The Probable Error of a Mean ». In : *Biometrika* 6.1 (1908), p. 1–25. ISSN : 00063444. URL : <http://www.jstor.org/stable/2331554>.
- [144] Wolfgang STUERZLINGER, Olivier CHAPUIS, Dusty PHILLIPS et Nicolas ROUSSEL. « User Interface FaçAdes : Towards Fully Adaptable User Interfaces ». In : *Proceedings of the 19th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '06. Montreux, Switzerland : ACM, 2006, p. 309–318. ISBN : 1-59593-313-1. DOI : [10.1145/1166253.1166301](https://doi.org/10.1145/1166253.1166301). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1166253.1166301>.
- [145] Chen SUN, Yang WANG et Jun ZHENG. « Dissecting pattern unlock : The effect of pattern strength meter on pattern selection ». In : *Journal of Information Security and Applications* 19.4-5 (2014), p. 308–320.
- [146] Stefan TILKOV et Steve VINOSKI. « Node.js : Using JavaScript to build high-performance network programs ». In : *IEEE Internet Computing* 14.6 (2010), p. 80–83.
- [147] Endel TULVING et al. « Episodic and semantic memory ». In : *Organization of memory* 1 (1972), p. 381–403.
- [148] Md. Sami UDDIN, Carl GUTWIN et Andy COCKBURN. « The Effects of Artificial Landmarks on Learning and Performance in Spatial-Memory Interfaces ». In : *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '17. Denver, Colorado, USA : ACM, 2017, p. 3843–3855. ISBN : 978-1-4503-4655-9. DOI : [10.1145/3025453.3025497](https://doi.org/10.1145/3025453.3025497). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3025453.3025497>.
- [149] Md. Sami UDDIN, Carl GUTWIN et Andy COCKBURN. « The Effects of Artificial Landmarks on Learning and Performance in Spatial-Memory Interfaces ». In : *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '17. New York, NY, USA : ACM, 2017, p. 3843–3855. ISBN : 978-

- 1-4503-4655-9. DOI : [10.1145/3025453.3025497](https://doi.org/10.1145/3025453.3025497). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3025453.3025497>.
- [150] Md. Sami UDDIN, Carl GUTWIN et Benjamin LAFRENIERE. « HandMark Menus : Rapid Command Selection and Large Command Sets on Multi-Touch Displays ». In : *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '16. Santa Clara, California, USA : ACM, 2016, p. 5836–5848. ISBN : 978-1-4503-3362-7. DOI : [10.1145/2858036.2858211](https://doi.org/10.1145/2858036.2858211). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2858036.2858211>.
- [151] UNITY. *Unity3D*. 2017. URL : <https://unity3d.com/>.
- [152] VALVE. *HTC Vive*. 2017. URL : <https://www.vive.com/>.
- [153] Velko VECHEV, Alexandru DANCU, Simon T. PERRAULT, Quentin ROY, Morten FJELD et Shengdong ZHAO. « Movespace : On-body Athletic Interaction for Running and Cycling ». In : *Proceedings of the 2018 International Conference on Advanced Visual Interfaces*. AVI '18. Castiglione della Pescaia, Grosseto, Italy : ACM, 2018, 28 :1–28 :9. ISBN : 978-1-4503-5616-9. DOI : [10.1145/3206505.3206527](https://doi.org/10.1145/3206505.3206527). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3206505.3206527>.
- [154] W.N. VENABLES et B.D. RIPLEY. *Modern Applied Statistics with S*. 4^e éd. 1431-8784. Springer-Verlag New York, 2002. ISBN : 978-0-387-95457-8.
- [155] Norman G. VINSON. « Design Guidelines for Landmarks to Support Navigation in Virtual Environments ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '99. Pittsburgh, Pennsylvania, USA : ACM, 1999, p. 278–285. ISBN : 0-201-48559-1. DOI : [10.1145/302979.303062](https://doi.org/10.1145/302979.303062). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/302979.303062>.
- [156] Daniel VOGEL et Patrick BAUDISCH. « Shift : A Technique for Operating Pen-based Interfaces Using Touch ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '07. San Jose, California, USA : ACM, 2007, p. 657–666. ISBN : 978-1-59593-593-9. DOI : [10.1145/1240624.1240727](https://doi.org/10.1145/1240624.1240727). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1240624.1240727>.
- [157] Julie WAGNER, Eric LECOLINET et Ted SELKER. « Multi-finger Chords for Hand-held Tablets : Recognizable and Memorable ». In : *Proceedings of the 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '14. Toronto, Ontario, Canada : ACM, 2014, p. 2883–2892. ISBN : 978-1-4503-2473-1. DOI : [10.1145/2556288.2556958](https://doi.org/10.1145/2556288.2556958). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2556288.2556958>.

- [158] Julie WAGNER, Mathieu NANCEL, Sean G. GUSTAFSON, Stéphane HUOT et Wendy E. MACKAY. « Body-centric Design Space for Multi-surface Interaction ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '13. Paris, France : ACM, 2013, p. 1299–1308. ISBN : 978-1-4503-1899-0. DOI : [10.1145/2470654.2466170](https://doi.org/10.1145/2470654.2466170). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2470654.2466170>.
- [159] Elizabeth K WARRINGTON et Tim SHALLICE. « Category specific semantic impairments ». In : *Brain* 107.3 (1984), p. 829–853.
- [160] Martin WEIGEL, Vikram MEHTA et Jürgen STEIMLE. « More Than Touch : Understanding How People Use Skin As an Input Surface for Mobile Computing ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '14. Toronto, Ontario, Canada : ACM, 2014, p. 179–188. ISBN : 978-1-4503-2473-1. DOI : [10.1145/2556288.2557239](https://doi.org/10.1145/2556288.2557239). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2556288.2557239>.
- [161] Martin WEIGEL, Tong LU, Gilles BAILLY, Antti OULASVIRTA, Carmel MAJIDI et Jürgen STEIMLE. « iSkin : Flexible, Stretchable and Visually Customizable On-Body Touch Sensors for Mobile Computing ». In : *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '15. Seoul, Republic of Korea : ACM, 2015, p. 2991–3000. ISBN : 978-1-4503-3145-6. DOI : [10.1145/2702123.2702391](https://doi.org/10.1145/2702123.2702391). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2702123.2702391>.
- [162] Martin WEIGEL, Aditya Shekhar NITTALA, Alex OLWAL et Jürgen STEIMLE. « SkinMarks : Enabling Interactions on Body Landmarks Using Conformal Skin Electronics ». In : *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '17. Denver, Colorado, USA : ACM, 2017, p. 3095–3105. ISBN : 978-1-4503-4655-9. DOI : [10.1145/3025453.3025704](https://doi.org/10.1145/3025453.3025704). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3025453.3025704>.
- [163] Frank WILCOXON. « Individual comparisons by ranking methods ». In : *Biometrics bulletin* 1.6 (1945), p. 80–83.
- [164] Jacob O. WOBROCK, Brad A. MYERS et John A. KEMBEL. « EdgeWrite : A Stylus-based Text Entry Method Designed for High Accuracy and Stability of Motion ». In : *Proceedings of the 16th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '03. Vancouver, Canada : ACM, 2003, p. 61–70. ISBN : 1-58113-636-6. DOI : [10.1145/964696.964703](https://doi.org/10.1145/964696.964703). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/964696.964703>.
- [165] Jacob O. WOBROCK, Htet Htet AUNG, Brandon ROTHROCK et Brad A. MYERS. « Maximizing the Guessability of Symbolic Input ». In : *CHI '05 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. CHI EA '05. Portland, OR, USA : ACM, 2005, p. 1869–1872. ISBN : 1-59593-002-7. DOI : [10.1145/1056808](https://doi.org/10.1145/1056808).

1057043. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1056808.1057043>.
- [166] Robert XIAO, Teng CAO, Ning GUO, Jun ZHUO, Yang ZHANG et Chris HARRISON. « LumiWatch : On-Arm Projected Graphics and Touch Input ». In : *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '18. Montreal QC, Canada : ACM, 2018, 95 :1–95 :11. ISBN : 978-1-4503-5620-6. DOI : [10.1145/3173574.3173669](https://doi.org/10.1145/3173574.3173669). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3173574.3173669>.
- [167] Frances YATES. *The Art of Memory*. London : Random House UK, 1992.
- [168] Shumin ZHAI, Per Ola KRISTENSSON, Caroline APPERT, Tue Haste ANDERSON et Xiang CAO. « Foundational Issues in Touch-Surface Stroke Gesture Design – An Integrative Review ». In : *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction* 5.2 (2012), p. 97–205. ISSN : 1551-3955. DOI : [10.1561/1100000012](https://doi.org/10.1561/1100000012). URL : <http://dx.doi.org/10.1561/1100000012>.
- [169] Shengdong ZHAO, Maneesh AGRAWALA et Ken HINCKLEY. « Zone and Polygon Menus : Using Relative Position to Increase the Breadth of Multi-stroke Marking Menus ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '06. Montré#233;al, Qu#233;bec, Canada : ACM, 2006, p. 1077–1086. ISBN : 1-59593-372-7. DOI : [10.1145/1124772.1124933](https://doi.org/10.1145/1124772.1124933). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1124772.1124933>.
- [170] Shengdong ZHAO et Ravin BALAKRISHNAN. « Simple vs. Compound Mark Hierarchical Marking Menus ». In : *Proceedings of the 17th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '04. Santa Fe, NM, USA : ACM, 2004, p. 33–42. ISBN : 1-58113-957-8. DOI : [10.1145/1029632.1029639](https://doi.org/10.1145/1029632.1029639). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1029632.1029639>.
- [171] Shengdong ZHAO, Pierre DRAGICEVIC, Mark CHIGNELL, Ravin BALAKRISHNAN et Patrick BAUDISCH. « Earpod : Eyes-free Menu Selection Using Touch Input and Reactive Audio Feedback ». In : *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '07. San Jose, California, USA : ACM, 2007, p. 1395–1404. ISBN : 978-1-59593-593-9. DOI : [10.1145/1240624.1240836](https://doi.org/10.1145/1240624.1240836). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/1240624.1240836>.
- [172] Jingjie ZHENG, Xiaojun BI, Kun LI, Yang LI et Shumin ZHAI. « M3 Gesture Menu : Design and Experimental Analyses of Marking Menus for Touchscreen Mobile Interaction ». In : *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '18. Montreal QC, Canada : ACM, 2018, 249 :1–249 :14. ISBN : 978-1-4503-5620-6. DOI : [10.1145/3173574](https://doi.org/10.1145/3173574).

3173823. URL : <http://doi.acm.org/10.1145/3173574.3173823>.

- [173] Simone ZIMMERMANN, Sonja RÜMELIN et Andreas BUTZ. « I Feel It in My Fingers : Haptic Guidance on Touch Surfaces ». In : *Proceedings of the 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*. TEI '14. Munich, Germany : ACM, 2013, p. 9–12. ISBN : 978-1-4503-2635-3. DOI : [10.1145/2540930.2540938](https://doi.org/10.1145/2540930.2540938). URL : <http://doi.acm.org/10.1145/2540930.2540938>.

Titre : Techniques d'interaction exploitant la mémoire pour faciliter l'activation de commandes

Mots clés : Interaction humain-machine ; techniques d'interaction ; mémorisation ; commandes

Résumé : Pour contrôler un système interactif, un utilisateur doit habituellement sélectionner des commandes en parcourant des listes et des menus hiérarchiques. Pour les sélectionner plus rapidement, il peut effectuer des raccourcis gestuels. Cependant, pour être efficace, il doit mémoriser ces raccourcis, une tâche difficile s'il doit activer un grand nombre de commandes. Nous étudions dans une première partie les avantages des gestes positionnels (pointage) et directionnels (Marking menus) pour la mémorisation de commandes, ainsi que l'utilisation du corps de l'utilisateur comme surface d'interaction et l'impact de deux types d'aides sémantiques (histoires, images) sur l'efficacité à mémoriser. Nous montrons que les gestes positionnels permettent d'apprendre plus rapidement et plus facilement, et que suggérer aux utilisateurs de créer des histoires liées aux commandes améliore considérablement leurs taux de rappel. Dans une deuxième partie, nous présentons des gestes bi-positionnels qui permettent l'activation d'un grand nombre de commandes. Nous montrons leur efficacité à l'aide de deux contextes d'interaction : le pavé tactile d'un ordinateur portable (MarkPad) et une montre intelligente (SCM).

Title: Interaction Techniques Using Memory to Facilitate Command Activation

Keywords: Human-Computer Interaction; Interaction Techniques; Memorization; Commands

Abstract: To control an interactive system, users usually have to select commands by browsing lists and hierarchical menus. To go faster, they can perform gestural shortcuts. However, to be effective, they must memorize these shortcuts, which is a difficult task when activating a large number of commands. In a first part, we study the advantages of positional (pointing) and directional (Marking menus) gestures for command memorization, as well as the use of the user's body as an interaction surface and the impact of two types of semantic aids (stories, images) on the effectiveness to memorize. We show that positional gestures make learning faster and easier, and that suggesting to users to create stories related to commands significantly improves their recall rate. In the second part, we present bi-positional gestures that allow the activation of a large number of commands. We demonstrate their effectiveness using two interaction contexts: the touchpad of a laptop (MarkPad) and a smartwatch (SCM).

