



HAL
open science

Manipulation de contenu 3D sur des surfaces tactiles

Aurélie Cohé

► **To cite this version:**

Aurélie Cohé. Manipulation de contenu 3D sur des surfaces tactiles. Interface homme-machine [cs.HC].
Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2012. Français. NNT: . tel-00789111

HAL Id: tel-00789111

<https://theses.hal.science/tel-00789111>

Submitted on 15 Feb 2013

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.

N° d'ordre : 4689

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1

ÉCOLE DOCTORALE DE MATHÉMATIQUES ET
D'INFORMATIQUE

par **Aurélie Cohé**

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : INFORMATIQUE

Manipulation de contenu 3D sur des surfaces tactiles

Soutenue le : 13 décembre

Après avis des rapporteurs :

Joaquim Jorge . Professeur
Laurence Nigay . Professeur

Devant la commission d'examen composée de :

Christophe Schlick	Professeur	Président
Joaquim Jorge .	Professeur	Rapporteur
Laurence Nigay .	Professeur	Rapporteur
Caroline Appert .	Chargé de recherche	Examineur
Hélène Sauzéon .	Maître de conférence	Examineur
Pascal Guitton .	Professeur	Directeur de Thèse
Martin Hachet .	Chargé de recherche	Co-Directeur de Thèse

- 2012 -

Remerciements

Je souhaite tout d'abord mes directeurs de thèse Martin et Pascal pour m'avoir permis d'effectuer cette thèse, mais également pour leurs grandes qualités humaines, au travers de leur capacité d'écoute, de leur gentillesse et de leur vision toujours positive, qui m'ont aidé tout au long de ma thèse. Je les remercie aussi pour m'avoir montré leur vision de la recherche, mais également pour m'avoir permis d'orienter mes travaux vers ce qui me plaisait le plus.

Je souhaite également remercier les rapporteurs de ma thèse Laurence NIGAY et Joaquim JORGE pour avoir analysé mes travaux. Merci aux examinateurs de ma thèse Caroline APPERT, Hélène SAUZEON et Christophe SCHLICK, ainsi que Laurence NIGAY et Joaquim JORGE, pour les discussions que nous avons eu durant la soutenance, et m'ont ainsi apporté un regard nouveau sur mes travaux.

Merci aux membres de CapSciences, et plus particulièrement à Sebastian CURSAN, qui m'ont offert une place où effectuer mes expérimentations, ainsi que pour leur ouverture d'esprit vis-à-vis des expérimentations effectuées avec le grand public. Merci également à tous les visiteurs de CapSciences qui ont accepté de participer à mes expériences, et m'ont permis d'aboutir aux travaux exposés dans ce manuscrit, et ce dans une atmosphère très conviviale.

Merci à Immersion, et plus particulièrement à Jean-Baptiste de la RIVIERE, pour leur intérêt vis-à-vis de la recherche et les discussions lors des réunions du projet InSTInCT. Merci à Géry CASIEZ, Laurent GRISONI et Anthony MARTINET pour leur collaborations et les diverses discussions concernant nos projets de recherche respectifs.

Merci à Inria et l'ANR pour avoir financé ma thèse, et au LaBRI pour m'avoir accueilli dans ses locaux.

Merci à SriramSUBRAMANIAN qui m'a accueilli pendant un mois dans son laboratoire et m'a prodigué une nouvelle vision de la recherche. Je le remercie également pour les discussions constructives que nous avons eu.

Merci à tous les membres de l'équipe IParla (ainsi que ses deux équipes-

fillesPotioc et Manao), dont Pascal, Gaël, Florent, Florian, Jérémey,Sebastian et bien d'autres,pour leur gentillesse et leur bonne humeur, qui m'ont permis de travailler dans un environnement très agréable pendant ces trois années. Un grand merci à Benoit BOSSAVIT pour sa bonne humeur, sa motivation et pour son soutien permanent. Merci également à Nicolas MELLADO, avec qui j'ai partagé le même bureau, et les différentes phases de nos thèses dans une ambiance très amical. Merci à Pauline DAVIGNON pour son aide lors des expérimentations, toujours effectuées dans la bonne humeur. Un merci particulier à Jérôme BARIL et à Romain PACANOWSKI pour leur aide précieuse sur mes derniers travaux de recherche, et pour avoir relu plusieurs fois mes articles en essayant d'appréhender un domaine extérieur au leur, tout en commentant mes travaux avec sérieux et une exigence à la hauteur de celle qu'ils requièrent pour leur propres travaux.

Je souhaite également remercier les personnes que j'ai rencontrées au cours de ma thèse en dehors de l'équipe et avec qui j'ai passé des moments très amusants. Ainsi, je remercie Aurélie, Alice, Aymeric, Antoine, David et Emmanuel. Merci également à Marie-Claire, Patrick, Nathalie, Claire, Pascal, Gabin et Anaïs pour leur gentillesse et leur bonne humeur. Enfin, je souhaite remercier ma famille, plus particulièrement mes parents, mon frère, ma sIJur, Yann, Etsuko, Claude et Yvette pour leur soutien. Merci plus particulièrement à ma mère pour toujours avoir montré son intérêt pour mes travaux et m'avoir toujours encouragé dans ce que je souhaitais faire.

Merci à tous ceux que je n'ai pas cités ici mais qui ont fait partie de ma vie pendant ma thèse.

Résumé

Les surfaces tactiles ayant connu un grand essor ces dernières années, le grand public les utilise quotidiennement pour de multiples tâches, telles que la consultation d'e-mail, la manipulation de photos, *etc.* En revanche, très peu d'applications 3D existent sur ces dispositifs, alors que de telles applications pourraient avoir un grand potentiel dans des domaines variés, telles que la culture, l'architecture, ou encore l'archéologie. La difficulté majeure pour ce type d'applications est d'interagir avec un espace défini en trois dimensions à partir d'une modalité d'interaction définie en deux dimensions. Les travaux effectués dans cette thèse explorent l'association entre surfaces tactiles et manipulation de contenu 3D pour le grand public. Les premières études ont été réalisées afin de comprendre comment l'utilisateur réagit pour manipuler un objet virtuel 3D avec une surface tactile sans lui imposer de techniques d'interaction particulières. De par les connaissances acquises sur les utilisateurs, les travaux suivants présentent l'élaboration de nouvelles techniques d'interaction ainsi que leur évaluation.

Mots-clés : interfaces utilisateurs 3D, écran multipoint, étude utilisateur, utilisation de la pression, design centré utilisateur, widget de transformation 3D, affichage stéréoscopique, comparaison de périphériques

Abstract

Since the emergence of tactile surfaces in recent years, the general public uses them every day for multiple tasks, such as checking email, photo manipulation, and so on. However, very few 3D applications on these devices exist, although such applications may have great potential in various fields, such as culture, architecture, or archeology. The major difficulty for such applications is to interact with a defined space in three dimensions from an interaction modality defined in two dimensions. Work in this thesis explores the association between tactile surfaces and manipulation of 3D content for the general public. The first studies were conducted to understand how the user tends to manipulate a 3D virtual object with a touch surface without imposing specific interaction techniques. Throughout knowledge gained by users, the following works are developing new interaction techniques and their evaluation.

Keywords : 3D User Interface, multitouch screen, user study, pressure-based gestures, user-centered design, 3D transformation widget, stereoscopic display, device comparison

Table des matières

Introduction	1
I Etat de l'art	5
1 Surfaces tactiles	7
1.1 Dispositifs matériels existants	7
1.1.1 Historique	7
1.1.2 Technologies mises en jeu	9
1.1.3 Configurations géométriques	14
1.2 Caractéristiques physiologiques	16
1.2.1 Paramètres associés à l'utilisation du doigt	16
1.2.2 Caractéristiques physiologiques de la main	21
1.2.3 Fatigue musculaire	22
1.3 Techniques d'interaction avec du contenu 2D	22
1.3.1 Adaptation des interfaces souris aux surfaces tactiles	23
1.3.2 Langage de gestes	24
1.3.3 Manipulation versus séparation de plusieurs degrés de liberté	25
1.3.4 Utilisation de paramètres avancés	27
1.4 Bilan	29
2 Interaction 3D	31
2.1 Problématiques liées à l'interaction 3D	31
2.1.1 Sélection et manipulation	32
2.1.2 Navigation	37
2.1.3 Contrôle du système	39
2.1.4 Périphériques d'entrée à trois dimensions	39
2.2 Techniques d'interaction associant 3D et surfaces tactiles	40
2.2.1 Manipulation d'objets 3D	41
2.2.2 Autres interactions 3D	44

2.3	Bilan	45
II	Comprendre l'utilisateur	47
3	Compréhension des gestes	49
3.1	Étude préliminaire	50
3.1.1	Protocole	50
3.1.2	Analyse des résultats	51
3.1.3	Conclusion	51
3.2	Étude des gestes pour la manipulation d'objets 3D	52
3.2.1	Protocole expérimental	52
3.2.2	Classification de gestes	54
3.2.3	Stratégies	58
3.2.4	Comportements communs	64
3.3	Comparaison avec les gestes à la souris	67
3.3.1	Protocole expérimental	67
3.3.2	Analyse des dimensions de la taxonomie	68
3.3.3	Classification	70
3.3.4	Stratégies	72
3.4	Discussion et conclusion	73
3.4.1	Compréhension des utilisateurs	73
3.4.2	Comparaison entre les gestes à la souris et avec l'écran tactile	74
3.4.3	Implications pour le design	75
3.4.4	Limitations et travaux futurs	76
4	Analyse de l'utilisation de la pression	79
4.1	Étude sensori-motrice du contrôle de la pression	81
4.1.1	Protocole expérimental	81
4.1.2	Contrôle de la force de pression	81
4.1.3	Contrôle continu de la pression	83
4.1.4	Discussion	86
4.2	Utilisation de la pression pour la manipulation d'objets 3D	87
4.2.1	Protocole expérimental	87
4.2.2	Étude de la pression moyenne	88
4.2.3	Discussion	93
4.3	Conclusion, limitations et travaux futurs	94
III	Techniques d'interaction et usages	97
5	Création d'un widget de manipulation d'objets 3D	99
5.1	Conception	100

5.1.1	Rotation	101
5.1.2	Translation	103
5.1.3	Changement d'échelle	104
5.1.4	Caractéristiques supplémentaires	105
5.2	Bilan	107
5.2.1	Premier retours utilisateurs	107
5.2.2	Un widget adapté aux surfaces tactiles	108
5.2.3	Conclusion	109
6	Usages et applications	111
6.1	Évaluation d'un périphérique	111
6.1.1	Présentation	111
6.1.2	Premiers retours utilisateurs	114
6.1.3	Bilan	116
6.2	Comparaison de périphériques	117
6.2.1	Protocole expérimental	118
6.2.2	Évaluation et perspectives	120
	Conclusion	121
	Résumé des contributions	121
	Perspectives	122
IV	Annexes	125
A	Compréhension des gestes : résultats détaillés	127
B	Comparaison de périphériques : tutoriels	133
	Publications de l'auteur	135

Introduction

Les systèmes tactiles ont connu un grand essor auprès du grand public depuis l'apparition des smartphones il y a quelques années. L'un des avantages des interfaces tactiles vient du caractère direct de l'interaction qu'elles offrent, contrairement au clavier et à la souris. Ainsi, l'utilisateur touche directement l'écran ou déplace son doigt sur celui-ci pour sélectionner un élément, le déplacer ou déclencher une action.

Aujourd'hui, la plupart des techniques d'interaction sur écrans tactiles proposées dans les produits grand public sont de nature bidimensionnelle, c'est-à-dire des interactions qui ont lieu dans un espace défini en deux dimensions, telles que la visualisation interactive de photos ou de cartes en deux dimensions. Dans cette thèse, nous nous intéressons principalement aux interactions qui ont lieu dans un espace de données défini en trois dimensions. Les applications concernent une multiplicité de domaines : jeux vidéo, conception architecturale, aménagement intérieur d'une maison, *etc.* Dans tous ces exemples, il est nécessaire de manipuler des objets tridimensionnels ou de se déplacer dans un environnement à trois dimensions. De nombreuses autres applications 3D peuvent bénéficier à la communication et la visualisation de données, et notamment dans les espaces d'exposition où le grand public vient découvrir des présentations déployées sous forme d'applications tridimensionnelles interactives. Par exemple, dans un musée où la manipulation d'objets réels peut être critique (fragilité, disponibilité, *etc.*), il est intéressant de permettre à l'utilisateur de manipuler des répliques virtuelles de ces objets. L'utilisateur peut alors manipuler les pièces de toute taille telles que des statues, regarder leurs détails, *etc.* Cependant, l'interaction avec du contenu 3D à partir d'une surface tactile est difficile et nécessite d'être étudiée. En effet, tandis que les surfaces tactiles offrent une correspondance directe entre l'espace d'interaction et l'espace de visualisation (bijection) pour l'interaction avec du contenu bidimensionnel, il n'est pas évident de manipuler la troisième dimension en utilisant des entrées à deux dimensions uniquement. De plus, l'utilisation des surfaces tactiles pour

la manipulation de contenu 3D a très peu été explorée, bien que les surfaces tactiles offrent de nombreux avantages, telles que les entrées multipoints.

L'un des principaux objectifs de cette thèse est de favoriser l'émergence de nouveaux types d'applications qui permettront à un large public de mieux comprendre, mieux apprendre, mieux analyser ou encore mieux concevoir. Les systèmes tactiles multipoints offrant la possibilité d'interagir avec de nombreux degrés de liberté, nous nous intéressons à ces interfaces pour offrir plus de facilités lors de l'interaction avec du contenu 3D. En effet, l'interaction 3D est aujourd'hui principalement dédié aux experts. Or, nous pensons qu'elle peut jouer un rôle majeur pour la communication entre les personnes, incluant les personnes novices. Pour atteindre cet objectif, l'étude des utilisateurs dans des contextes de manipulation 3D, la création de nouvelles techniques d'interaction et l'évaluation de ces dernières sont donc essentielles.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet InSTInCT¹, financé par l'Agence nationale de la recherche (ANR). Ce projet est constitué de deux partenaires académiques, les équipes Inria Iparla, nouvellement Potioc², et Mint³, de la société expert en solutions de réalité virtuelle Immersion⁴ et de Cap Sciences⁵, musée qui a pour vocation la diffusion du savoir scientifique. Il se déroule au sein de l'équipe Potioc, dont l'objectif général est d'ouvrir les technologies 3D interactives au plus grand nombre afin de permettre à chacun de mieux comprendre, créer, se divertir, ou communiquer. Pour cela, l'équipe cherche à améliorer les processus d'interaction entre des utilisateurs et des environnements 3D interactifs via la conception, le développement, et l'évaluation d'interfaces utilisateur 3D à destination du grand public.

Ce mémoire est exposé en trois parties. Afin de mieux comprendre le contexte et les domaines de recherche liés au sujet, une première partie présente l'état de l'art des domaines relatifs au sujet traité. D'une part, nous présenterons les travaux liés aux surfaces tactiles (Chapitre 1), en introduisant les dispositifs matériels existants, les caractéristiques physiologiques mis en jeu lors de leur utilisation et ce qu'elles apportent pour l'interaction 2D. D'autre part, nous présenterons les travaux relatifs à la 3D afin d'exposer les problématiques liées à l'interaction 3D et en présentant les travaux existants mêlant surfaces tactiles et manipulation de contenu 3D (Chapitre 2).

L'utilisateur étant au coeur du processus d'interaction, il est essentiel de l'intégrer dans le développement du design des interfaces. Ainsi, la deuxième partie aborde les expérimentations conduites dans le but de comprendre au mieux l'utilisateur dans des tâches de manipulation d'objets 3D. Ainsi, nous présenterons les travaux effectués sur la compréhension des gestes des

1. <http://anr-instinct.capsciences.net>

2. <http://team.inria.fr/potioc/>

3. <http://www.lifl.fr/mint/>

4. <http://www.immersion.fr/>

5. <http://www.cap-sciences.net/>

utilisateurs pour manipuler un objet 3D sur une surface tactile (Chapitre 3) ; puis, nous explorerons comment l'utilisateur contrôle la pression de manière continue lors d'un déplacement du doigt sur une surface tactile, ainsi que la façon dont il utilise la pression dans un contexte 3D (Chapitre 4).

Enfin, la troisième partie de cette thèse traite de la mise en place de techniques d'interaction et des usages auprès du grand public. De par les problèmes et les connaissances exposés dans l'état de l'art et les résultats sur le comportement des utilisateurs, nous avons introduit une technique d'interaction permettant la manipulation d'un objet 3D suivant neuf degrés de liberté (Chapitre 5) et avons évalué l'apport d'un nouveau dispositif permettant de combiner des interactions colocalisées avec un affichage stéréoscopique (Chapitre 6).

Première partie

Etat de l'art

Surfaces tactiles

Ce mémoire étant consacré à l'étude de l'interaction avec du contenu tridimensionnel sur surfaces tactiles, il convient de définir différentes notions concernant ces dispositifs. Les dispositifs tactiles peuvent être directs ou indirects. Ils sont dits **directs** (*e.g.*, les écrans tactiles) lorsque le dispositif d'affichage et le dispositif de pointage sont les mêmes, sinon ils sont dits **indirects** (*e.g.*, les pavés tactiles). Un écran tactile est donc composé de deux couches différentes :

- un dispositif matériel de pointage, qui reçoit et détermine les points de contact,
- un dispositif d'affichage qui affiche les informations à l'utilisateur.

De plus, les dispositifs tactiles sont dits **monopoints** s'ils détectent uniquement un élément, tel qu'un doigt ou un stylet, et **multipoints** (*multitouch* en anglais) lorsqu'ils détectent plusieurs éléments.

Dans ce chapitre, nous présenterons en premier lieu les principaux dispositifs matériels existants, puis les implications physiologiques que leur utilisation engendre, ainsi que leur apport pour l'interaction au travers des travaux existants concernant l'interaction avec du contenu bidimensionnel.

1.1 Dispositifs matériels existants

1.1.1 Historique

Tout comme la souris, environ trente ans se sont écoulés entre le moment où l'écran tactile a été inventé et celui où il a été commercialisé et utilisé à grande échelle.

Dispositifs monopoints

Le premier dispositif tactile fut développé par Hugh Le Caine, Don Buchla et Bob Moog, reposant sur des capteurs capacitifs de petite taille sen-

sibles à la pression (cf. Figure 1.1). Le but de ce système était de contrôler le timbre et le volume d'un instrument de musique. C'est en 1972, suite à des recherches menés dans un laboratoire de l'université d'Illinois, qu'a été commercialisé par IBM le premier écran tactile : Plato IV (cf. Figure 1.1). La surface était une surface monopoint, précurseur de la technologie infrarouge (cf. Section 1.1.2), constituée de mailles d'un quadrillage de 16 colonnes sur 16 lignes. Parallèlement, en 1971, Sam Hurst conçoit le premier écran à technologie résistive (cf. Section 1.1.2). En 1978, Chris Herot et Guy Weinzapfel [HW78] créent une surface monopoint capable de détecter huit signaux différents (la position du doigt sur l'écran, sa force et les couples engendrés selon les axes définis dans le repère local de l'écran) offrant la possibilité de créer des techniques d'interaction plus riches par l'exploitation d'autres dimensions que la position du doigt sur l'écran.

Dispositifs multipoints

En 1982, Nimish Mehta [Meh82] conçoit la première surface détectant plusieurs doigts. Il s'agit d'une surface multipoint composée d'un panneau en verre dépoli dont les propriétés optiques sont telles que l'on peut capturer des taches noires dont la taille reflète la force de pression exercé par le doigt, et ce à l'aide d'une caméra située à l'arrière ce panneau. Cette technologie peut non seulement capturer les ombres des doigts, mais également celles des objets. Deux ans plus tard, la société Bell Labs crée le premier écran multipoint. Son fonctionnement s'appuie sur un tableau transparent constitué de plusieurs capteurs capacitifs, posé sur un écran cathodique, offrant alors la possibilité de manipuler des objets graphiques avec plusieurs doigts. Dans les années qui suivirent, de nombreuses autres surfaces tactiles font leur apparition, telles qu'une surface multipoint capable d'indiquer la position et la force appliquées pour chaque doigt [LBS85, BHR85], une surface reposant sur des capteurs optiques (*the Sensor Frame* [McA86], introduit par Paul McAvinney) ou encore, une table avec un système de projection frontale (*Digital Desk* [Wel91], cf. Figure 1.1).

Émergence des surfaces tactiles

En 1991 apparaît la technologie bidirectionnelle, introduite par Bill Buxton et Brad A. Myers [BM86]. La technologie bidirectionnelle correspond à la création d'un écran tactile en un unique élément pour l'entrée et la sortie. Jusqu'à présent, tous les systèmes avaient deux couches bien distinctes, une pour recevoir les événements tactiles, et une seconde pour afficher les résultats. Le développement des surfaces tactiles continue dans les années 90 avec, entre autres, des interfaces reconnaissant plusieurs périphériques physiques [FIB95], ou une interface déformable qui reprend sa forme d'origine si aucune force n'est appliquée [Sin97].

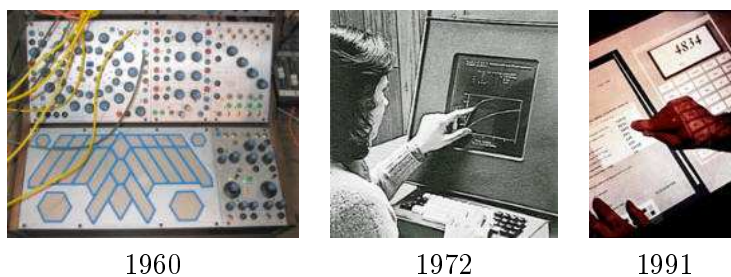


FIGURE 1.1: Exemples de systèmes tactiles créés de 1960 à 1991 : premier système tactile [Bux] créé en 1960, Plato IV [Bux] en 1972 et Digital Desk [Wel91] en 1991.

En 2001, Paul Dietz et Darren Leigh créent le *DiamondTouch* [DL01], capable de distinguer les doigts et les mains d'une personne, ainsi que des gestes complexes. Ainsi, certains paramètres tels que la direction ou la vitesse des doigts, peuvent maintenant être pris en compte. En 2002, *SmartSkin* est créée et permet de détecter de multiples positions de mains, ainsi que leur forme [Rek02] (cf. Figure 1.2). En 2005, un nouveau système multipoint dont les principaux atouts sont sa facilité de réalisation et son moindre coût est développé par Jefferson Han [Han05] (cf. Figure 1.2). Finalement, la sortie de l'iPhone proposé par Apple en 2007 [App] (cf. Figure 1.2) contribuera à la démocratisation des surfaces tactiles auprès du grand public, l'iPhone étant le premier téléphone à écran tactile multipoint.



FIGURE 1.2: Exemples de systèmes tactiles créés de 2002 à 2007 : SmartSkin [Rek02] créé en 2002, Système de J. Han [Han05] en 2005 et l'iPhone en 2007 [App].

1.1.2 Technologies mises en jeu

Les équipements d'interaction tactile existant aujourd'hui s'appuient sur plusieurs types de technologies ayant chacune leurs avantages et leurs inconvénients. Nous présentons ici les cinq technologies les plus courantes.

Technologie capacitive

Il s'agit de la technologie la plus ancienne. La surface de l'écran possède un revêtement conducteur métallique. Une tension est ensuite appliquée dans ce revêtement, créant ainsi un champ électrique uniforme. Lorsque le doigt entre en contact avec la surface, certaines de ces charges lui sont transférées, créant ainsi un déficit quantifiable. La valeur de courant mesurée aux travers de condensateurs disposés sur toute la surface est alors proportionnelle à la distance par rapport au point de contact (cf. Figure 1.3). De nombreux smartphones et tablettes reposent sur cette technologie, dont l'iPhone d'Apple, ou le Galaxy S2 et la Galaxy Tab développés par Samsung.

Les principaux atouts de cette technologie sont son temps de réponse et sa capacité à laisser passer la lumière, assurant ainsi une bonne luminosité. Par contre, elle est difficilement exploitable pour des écrans de taille supérieure à 20 pouces. Le deuxième inconvénient vient du fait que le contact doit être effectué avec une surface conductrice, condamnant ainsi l'utilisation de gants par exemple.

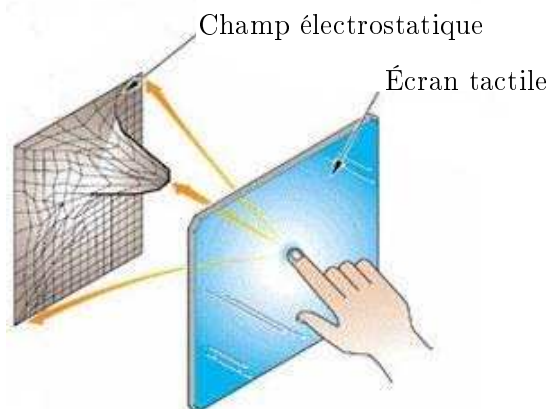


FIGURE 1.3: Technologie capacitive [sita].

Technologie résistive

Cette technologie repose sur un empilement de couches dont deux sont conductrices et séparées par une couche d'isolant. Lorsque l'utilisateur pose son doigt sur la surface ayant pour propriété d'être flexible, les deux couches conductrices sont mises en contact sous la pression du doigt, créant ainsi un courant électrique. La position du doigt est ainsi détectée par la mesure des tensions résultantes (cf. Figure 1.4).

Sa résistance et son prix constituent les principaux atouts de cette technologie. De plus, il n'y a aucune contrainte sur les dispositifs de pointage, offrant ainsi la possibilité d'utiliser des stylets ou les doigts. Néanmoins, cette technologie a pour inconvénient de réduire la luminosité de l'écran.

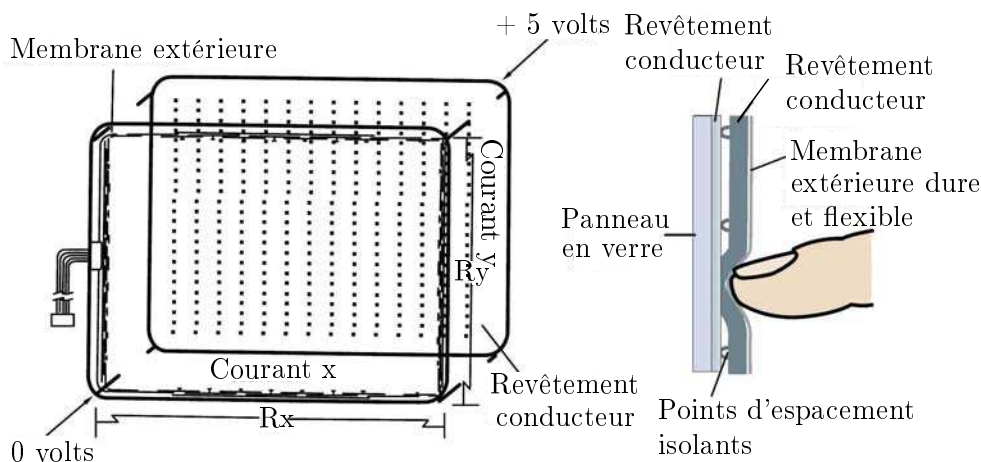


FIGURE 1.4: Technologie résistive [sit01].

Technologie FTIR

La technologie FTIR (Frustrated Total Internal Reflexion) consiste à placer une ou plusieurs caméras infrarouges derrière une surface semi-transparente. Un faisceau infrarouge se propage dans un matériau réfléchissant à la surface de l'écran. Un contact du doigt perturbe la propagation du faisceau infrarouge, provoquant une déviation de ce dernier. Une analyse de la provenance du faisceau via les caméras infrarouges permet de déterminer la localisation du doigt.

Cette technologie a été développée par Han en 2005 [Han05] et est utilisée pour plusieurs produits commerciaux (Surface de Microsoft [Mic], CubeTile développé par Immersion [dIRKOD08]). Elle a non seulement pour avantage d'être facile à fabriquer à moindre coût, mais également, de détecter la taille et la forme du contact. Ainsi, tout type d'objets peut être détecté. Cependant, elle possède souvent un temps de latence, dû aux traitements vidéos, et nécessite un certain volume.

Technologie à ondes de surface

Un ensemble d'ondes ultrasoniques est diffusé sur la surface via des transducteurs piézoélectriques. Lorsque le doigt entre en contact avec cette dernière, une perturbation est créée, permettant ainsi la localisation du doigt via la redirection des ondes par des réflecteurs vers des transducteurs de réception, placés à l'opposé des transducteurs d'émission. La position du doigt est mesurée par une analyse du temps d'arrivée de l'onde, celle-ci étant déterminée avec précision du fait que la vitesse de propagation et la taille de l'écran sont connues (cf. Figure 1.5).

De plus, la distance entre le doigt et l'écran peut également être mesurée.

En effet, lorsque le doigt entre en contact avec l'écran, cela provoque une absorption d'une partie de l'onde. Ainsi, la composante de profondeur peut être déduite de la quantité d'énergie atténuée. En plus de cela, cette technologie a pour avantage d'assurer une bonne luminosité de l'écran. Cependant, elle est sensible aux rayures et aux poussières.

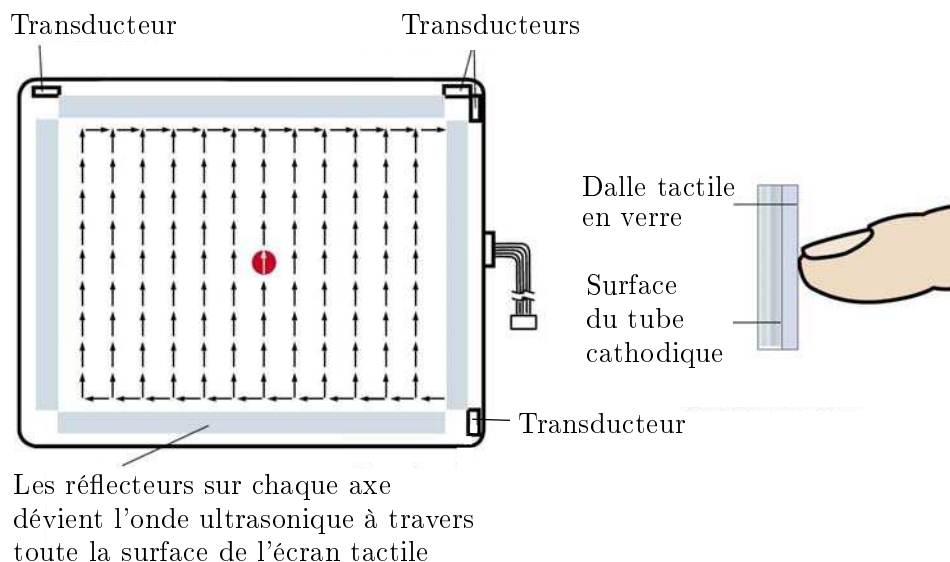


FIGURE 1.5: Technologie à ondes de surface [sit01].

Technologie à infrarouges

Des diodes infrarouges et des photo-transistors sont disposés sur les bords de l'écran, émettant ainsi un rayonnement lumineux. Le contact du doigt avec ce rayonnement provoque une modification de la réflexion lumineuse. La position du doigt est alors déduite par l'analyse de cette perturbation, détectée à l'aide d'une caméra (cf. Figure 1.6).

L'avantage majeure de cette technologie est qu'elle peut être installée sur n'importe quel type d'écran. Cependant, elle souffre d'un coût élevé et d'une précision relativement faible.

Bilan

Du fait de leur prix, les technologies capacitives et résistives sont les plus répandues. Mais, elles ont pour inconvénient d'être fragiles et de posséder une durée de vie limitée. La technologie à infrarouges a pour principal caractère de détecter le point de contact avant qu'il n'y ait contact, ce qui peut constituer un défaut lorsque nous souhaitons qu'il y ait détection uniquement lorsqu'il y a contact. Quant à la technologie à ondes de surface, elle

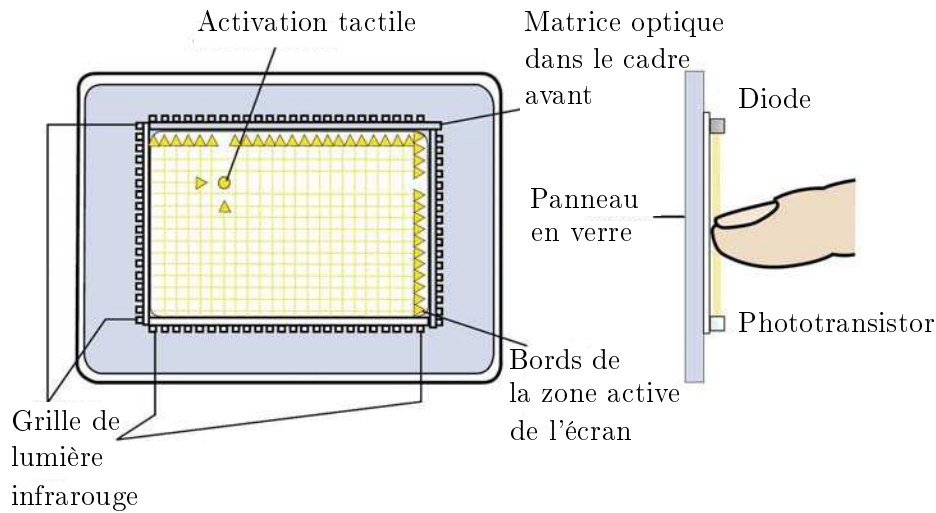


FIGURE 1.6: Technologie à infrarouges [sit01].

est très sensible aux légères perturbations, dues à la poussière par exemple. Finalement, la technologie FTIR possède un faible prix et une facilité de mise en œuvre, mais est peu répandue et nécessite un certain volume. Les principaux avantages et inconvénients de chaque technologie sont présentés dans la table 1.1.

Technologie	Avantages	Inconvénients
Capacitive	Luminosité Temps de réponse	Fragilité Longévité Pointeur conducteur
Résistive	Prix Tous types de pointeurs Temps de réponse	Peu lumineux Fragilité Longévité
FTIR	Prix Simple à mettre en œuvre	Peu répandue Volumineux
Ondes de surfaces	Luminosité Longévité	Sensibles aux rayures et poussières
Infrarouges	Luminosité Longévité Tous type de pointeurs	Détecte le contact avant le toucher Temps de réponse

TABLE 1.1: Avantages et inconvénients de chaque technologie.

Ces dernières années, d'autres technologies, moins courantes, voient le jour, apportant de nouvelles propriétés, telles que la sensation de textures (tablette tactile Senseg, [AGS⁺11]), des surfaces flexibles [RP09] ou encore la création de touches en reliefs [HH09].

1.1.3 Configurations géométriques

Les surfaces tactiles ne sont pas toutes planes. En effet, plusieurs formes d'interfaces tactiles ont été créées : des tables à un écran telles que celles exposées dans la Section 1.1 ou deux écrans [WLF⁺06, STC⁺09], des souris évoluées [VIR⁺09] et des interfaces sphériques [BWB08] ou cubiques [dIRKOD08].

Les interfaces tactiles communément utilisés actuellement sont planaires et peuvent être de divers formats. Il y a principalement trois types de dalles tactiles sur le marché :

- les **smartphones** (« téléphones intelligents » en français), de la dimension de la main. L'utilisateur peut ainsi le tenir et interagir avec d'une seule main,
- les **tablettes tactiles**, de taille environ égale à une feuille de format A4. Elles ont l'avantage d'être plus grandes que les smartphones, permettant ainsi une interaction à deux mains, tout en étant portables,
- les **tables tactiles**, de la dimension d'une table. Elles permettent d'interagir de manière collaborative, mais ont l'inconvénient de ne pas être portables.



FIGURE 1.7: Exemple de systèmes tactiles.

Les smartphones sont les dalles tactiles les plus communes. Il existe également d'autres types de dispositifs tactiles tels que des écrans de grande taille placés verticalement, notamment utilisés pour effectuer des présentations devant un public.

Le caractère tridimensionnel des interfaces à géométrie 3D est intéressant pour la manipulation d'objets 3D, apportant des repères tridimensionnels à la fois dans les environnements réel et virtuel. En effet, une des difficultés majeures de l'interaction 3D vient du fait que le périphérique d'entrée est défini dans un espace en deux dimensions.

Ainsi, De La Rivière *et al.* [dIRKOD08] ont créé le CubTile, interface cubique dont chaque face est composée d'un écran tactile. L'utilisateur peut alors effectuer des translations et des rotations sur un objet 3D en interagissant sur les faces. Ainsi, l'utilisateur change de dimension dans l'espace en

changeant la face sur laquelle il interagit, favorisant ainsi la correspondance entre le mouvement effectué par l'utilisateur sur la surface et celui de l'objet virtuel. De même, Benko *et al.* [BWB08] et Grossman *et al.* [GWB04] proposent des interfaces sphériques tactiles. Tandis que Benko *et al.* [BWB08] l'ont exploité avec du contenu bidimensionnel affiché sur la surface, Grossman *et al.* [GWB04] l'ont exploité pour la manipulation de contenu 3D via une visualisation stéréoscopique à l'intérieur de la sphère (cf. Figure 1.8). Ils proposent entre autres, de définir un axe avec un doigt, et de faire tourner l'objet autour d'un axe partant de la position du doigt vers le centre de la sphère. Ces périphériques ont pour avantage d'apporter une interaction plus directe avec le contenu tridimensionnel. Cependant, les auteurs du CubTile reporte que le caractère géométrique de l'interface cause des problèmes de fatigue dus au fait que la main n'ait pas d'appui. D'autre part, Villar *et al.* [VIR⁺09] proposent une amélioration de la souris en proposant diverses formes de souris composées de surfaces multipoints, ce qui assure le confort de l'utilisateur et permet d'augmenter le nombre de degrés de liberté du périphérique.

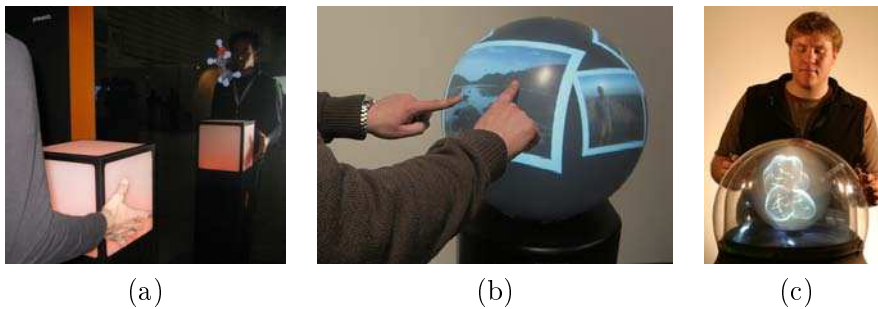


FIGURE 1.8: Systèmes tactiles à géométrie 3D : CubTile [dlRKOD08] (a), sphère de Benko *et al.* [BWB08] (b) et sphère de Grossman *et al.* [GWB04] (c).

L'un des avantages dont bénéficient les écrans tactiles est de pouvoir agir de manière colocalisée avec les objets affichés. Or, cette faculté constitue également un inconvénient du fait que les doigts masquent une partie de l'écran. Ainsi, Wigdor *et al.* [WLF⁺06] et Shen *et al.* [STC⁺09] ont proposé une configuration géométrique permettant de limiter le problème d'occultation. Le dispositif résultant est composé d'un écran tactile sur la face arrière et un sur la face avant du périphérique (cf. Figure 1.9(a)). Cette configuration permet de passer outre le problème de masquage de la surface par la main en agissant à partir de l'arrière du périphérique tout en bénéficiant d'une interaction directe.

Un des problèmes des écrans tactiles vient du manque de sensations haptiques, telles que celles ressenties sur un boutons physique [BHR85]. Ce défaut impose à l'utilisateur d'être plus attentif sur les autres types de retours,



FIGURE 1.9: Systèmes tactiles avec écrans avant et arrière [WLF⁺06] (a) et avec boutons physiques [HH09] (b, sans utilisation de pression à gauche et avec à droite).

tels que les retours visuels ou sonores. Par exemple, lorsqu'un utilisateur écrit avec un clavier virtuel sans retours, via des vibrations par exemple, il sait que le caractère est pris en compte seulement lorsqu'il voit la lettre apparaître sur l'écran. Comme l'a montré Forlines *et al.* [FB08] en utilisant des retours haptiques afin de confirmer qu'une action a été effectuée, l'utilisateur passe plus rapidement à l'action suivante grâce à une confirmation plus rapide sur l'aboutissement de la tâche précédente. Ainsi, pour assurer la sensation de pression, Harrison *et al.* [HH09] ont utilisé des surfaces tactiles souples pour créer l'illusion de boutons physiques en appliquant une force de pression de l'air à l'endroit du bouton virtuel (cf. Figure 1.9(b)). Ce procédé permet également d'ajouter et de modifier la position des boutons physiques à l'endroit en appliquant ou non la force de pression à l'emplacement souhaité.

1.2 Caractéristiques physiologiques

L'étude de l'interaction via des surfaces tactiles nécessite une connaissance au préalable des caractéristiques physiologiques des parties du corps impliquées dans l'utilisation de ces dispositifs. Ainsi, dans cette partie, nous nous intéressons aux paramètres associés à l'utilisation du doigt, de la main et de l'implication de l'utilisation des deux mains d'un point de vue anatomique.

1.2.1 Paramètres associés à l'utilisation du doigt

La main est un mécanisme complexe composé de nombreux degrés de liberté. Au total, vingt-trois degrés de liberté ont été identifiés selon des analyses médicales et anatomiques [And92]. Lorsqu'un doigt entre en contact avec une surface tactile, seule la position du point de contact sur l'écran est généralement prise en compte par les surfaces les plus communes. D'autres paramètres peuvent également être détectés, tels que l'orientation de la surface de contact du doigt sur l'écran ou la pression exercée par le doigt.

Position du doigt

L'emplacement du doigt sur la surface tactile est souvent utilisé pour sélectionner un objet ou une action ou pour déplacer un objet, qui reste sous le doigt. Il permet également d'exploiter la **vitesse de déplacement**, apportant un paramètre intéressant à prendre en compte pour l'interaction sur des surfaces tactiles. La vitesse de déplacement est notamment utilisée pour le déplacement du curseur via un pavé tactile indirect : lorsque l'utilisateur déplace lentement son doigt d'une certaine distance, le curseur se déplace moins que lorsque il le déplace rapidement, de la même distance.

D'une part, l'utilisation de la position du doigt a pour avantage de faire le lien très rapide entre ce qui est vu par l'utilisateur et ce qu'il va touché sur l'écran pour sélectionner un élément en le touchant directement (on parle alors de **colocalisation**). Kin *et al.* [KAD09] ont notamment montré que, pour des utilisateurs novices, la sélection à partir d'une surface multipoint est environ deux fois plus rapide qu'avec une souris, et ce en majorité grâce au caractère direct de l'interaction. De plus, William Buxton [BFH⁺83] voit un intérêt supplémentaire du fait qu'elle offre la possibilité d'effectuer des **gestes** avec la main, apportant ainsi une interaction plus « naturelle ». À noter que nous appelons interaction « naturelle », une interaction proche d'un comportement de la vie réelle. D'autre part, la vitesse de déplacement est intéressante pour éviter les problèmes de fatigue lorsque la position du doigt engendrerait trop de déplacements du bras, lors de l'utilisation des écrans large par exemple.

Cependant, la colocalisation comprend deux défauts majeurs. D'une part, **le doigt est imprécis** dû à sa taille sur la surface, contrairement à la souris où la précision est d'un pixel près. En particulier, Holz et Baudisch [HB11] ont étudié ce problème et indiquent que des systèmes optiques pourraient être plus favorables pour la précision plutôt que les systèmes basés sur la surface de contact du doigt (cf. Figure 1.10). D'autre part, l'interaction directe souffre du problème d'**occultation** de l'affichage. Afin de pallier ce problème, plusieurs chercheurs ont créé des méthodes reposant à la fois sur une interaction directe et indirecte pour bénéficier des avantages liés à l'interaction directe et de la précision de l'interaction indirecte [VB07, RHL08, PWS88] (cf. Figure 1.11(a)). Cependant, il perd l'avantage lié à la colocalisation qui est de pouvoir désigner plus rapidement l'objet avec lequel l'utilisateur souhaite interagir [MO98].

D'autres études ont proposé d'utiliser une combinaison de contrôles directs et indirects. Malik *et al.* [ML04] ont conçu un moyen d'interaction d'objets 2D sur pavé tactile où une représentation de la main de l'utilisateur est créée dans le monde virtuel (cf. Figure 1.11(b)). Ainsi, l'utilisateur n'a pas de problème d'occultation, notamment en utilisant des effets de transparence sur la main. De plus, la sensation d'immersion est plus aboutie du fait qu'il y ait la représentation de sa main dans le monde virtuel. De même,

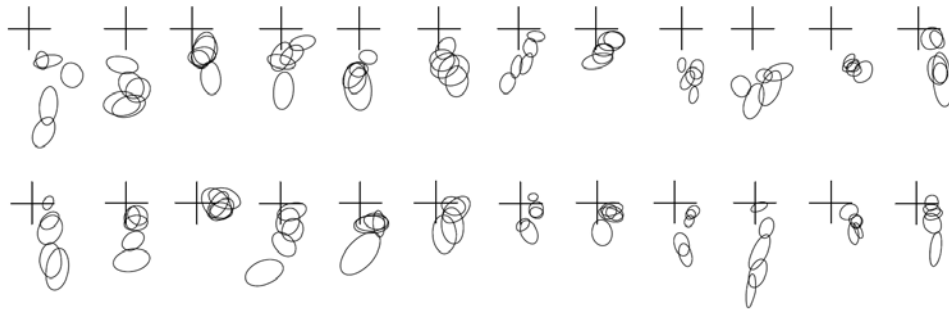
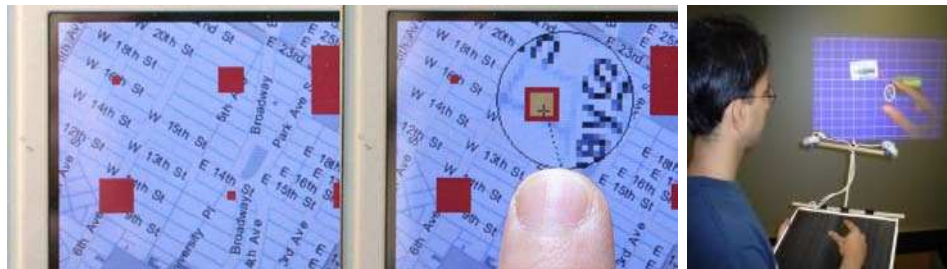


FIGURE 1.10: Précision du doigt : la croix représente la cible que devait toucher les utilisateurs, chaque ellipse représente la zone de contact du doigt pour un utilisateur. Chaque croix représente une orientation différente du doigt [HB11].

Wigdor *et al.* [WLF⁺06] et Shen *et al.* [STC⁺09] proposent de placer une surface tactile derrière l'écran afin de bénéficier de la colocalisation sans avoir de problème d'occultation. L'utilisateur agit alors depuis l'arrière du périphérique (cf. Figure 1.9(a)).



(a) A gauche, visualisation d'une carte. A droite, contact avec le doigt et agrandissement de la zone de contact (b) Affichage de la main en transparence dans la scène virtuelle

FIGURE 1.11: Colocalisation et problème d'occultation. Solutions proposées par Vogel et Baudisch [VB07] via l'agrandissement de la zone occultée (a) et par Malik *et al.* [ML04] via la virtualisation de la main de l'utilisateur (b).

Pression

Lors de l'appui du doigt sur une surface tactile, le doigt exerce une certaine **force** sur la surface. Cette force est mesurable par certaines surfaces tactiles, telle que celle présentée par Rosenberg et Perlin [RP09]. Nous distinguons alors deux catégories de force de pression : la **force normale**, composante de la force exercée par le doigt orthogonalement à l'écran, et la

force tangentielle, composante de la force exercée par le doigt dans le plan de l'écran. La figure 1.12 montre une représentation des forces normales et tangentielles, ainsi qu'une schématisation de la mesure de chacune d'entre elles.

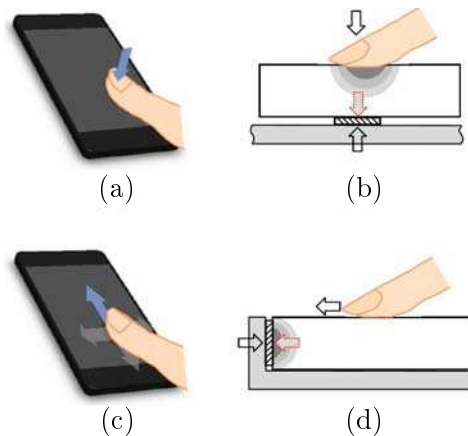


FIGURE 1.12: Schémas représentant la façon d'appliquer une force normale (a) (respectivement tangentielle (c)) et comment elle est mesurée (b) (respectivement (d)) [LLL⁺12].

Le travail de Herot et Weinzapfel [HW78] est l'un des premiers à étudier l'utilisation de la pression pour des interfaces utilisateurs. Ils ont informellement testé la capacité des utilisateurs à contrôler la position et la vitesse d'un curseur, ainsi que la manipulation d'un objet 2D. Ils concluent que la précision du contrôle de ces paramètres est suffisante pour l'interaction homme-machine, et ce d'autant plus quand un **retour visuel en temps réel et continu** est fourni.

Les surfaces capables de détecter la pression étant en phase d'émergence, nous observons une augmentation du nombre d'études concernant l'utilisation de la pression sur surfaces tactiles. Récemment, Wilson *et al.* [WSB10] étudient la pression pour une tâche de sélection et indiquent que les utilisateurs peuvent contrôler la pression avec une **haute précision** et ce d'autant plus avec l'aide d'un retour visuel adapté. De plus, ils indiquent que les utilisateurs sont capables de distinguer jusqu'à dix niveaux de pression de manière précise. Par la suite, Wilson *et al.* [WBH11] ont comparé le contrôle de positionnement de la pression et de vitesse de la pression dans une tâche de sélection, ainsi que l'effet de la marche, sur un périphérique mobile. Ils en ont conclu que les utilisateurs contrôlent mieux la vitesse de pression pour une position assise que pendant la marche et que la mobilité de l'utilisateur augmente de manière significative le nombre d'erreurs et le temps de sélection. Finalement, Stewart *et al.* [SRKE10] explorent le contrôle de la

pression dans une utilisation sur périphériques mobiles. Ils en déduisent que la pression peut être utilisée **sans retour visuel tout en n’affectant pas le temps de sélection**, mais que cela affecte la précision.

Toutes ces études concernent le contrôle de la pression de manière discrète, et non de façon continue. Seules quelques rares travaux concernent l’utilisation de la pression de manière continue. Srinivasan et Chen [SC93] se sont intéressés à l’importance du retour tactile pour le contrôle de la pression avec un doigt immobile de manière continue. L’étude est réalisée sur trois utilisateurs qui doivent appliquer une force continue avec et sans retour visuel selon trois forces différentes, puis une force linéairement croissante et sinusoïdale avec retours visuels et selon trois variations de force différentes. Le retour visuel consiste à afficher une courbe représentant la pression en temps réel. Ils déduisent de cette étude que le taux de force à appliquer n’a pas d’impact significatif dans les tâches de contrôle de la pression linéairement croissante et dans le contrôle sinusoïdal pour une amplitude de 0.5N. Pour les sinusoïdes à plus fortes amplitudes et pour les autres conditions, plus la force est élevée, plus l’erreur est grande. Ils remarquent également que la moyenne d’erreurs est plus grande pour le contrôle sinusoïdal de la pression. Dans cette étude, le doigt est immobile et le retour visuel indique en temps réel à l’utilisateur s’il réussit à contrôler la pression. L’utilisateur peut donc la réajuster durant le test. Il serait intéressant d’étudier le contrôle de la pression lorsque le doigt se déplace et au contrôle continu de la pression avec un retour visuel moins explicite sur leur succès quant au test. Récemment, Lee *et al.* [LLL⁺12] se sont intéressés au **contrôle de la force tangentielle** de manière continue sur périphérique mobile selon la direction du doigt en mouvement et la pose de la main. Ils déduisent de leur expérience que la position n’a pas d’influence sur cette force, contrairement à la direction.

Autres paramètres avancés

Lorsque le doigt entre en contact avec un écran tactile, la **taille et l’orientation de la surface de contact** constituent des paramètres supplémentaires exploitables pour la conception de techniques d’interaction.

Cao *et al.* [CWB⁺] exploitent notamment la surface de contact de la main en proposant des interactions différentes selon la dimension de la surface de contact. Wang *et al.* [WCRI09] ont proposé de déterminer l’orientation des doigts en deux dimensions autour de l’axe défini orthogonalement par rapport au plan de l’écran. Pour cela, ils détectent la direction du doigt à partir de la forme de la surface de contact, puis calcule continuellement son orientation en fonction des modifications appliquées sur la forme de la surface de contact. De même, Roudaut *et al.* [RLG] proposent d’utiliser l’orientation du doigt autour de l’axe défini par celui-ci et de le distinguer des glissements du doigts sur la surface sans rotation du doigt, apportant une dimension supplémentaire par rapport aux contrôles de positions standards sur la surface.

De plus, Holz et Baudisch [HB10] proposent d'utiliser l'**empreinte digitale** et l'utilisent notamment pour augmenter la précision des surfaces tactiles.

1.2.2 Caractéristiques physiologiques de la main

Nous avons vu précédemment les différents paramètres mesurables lors de l'interaction d'un doigt sur une surface. Ici, nous nous intéressons aux conséquences de l'utilisation de plusieurs doigts d'une même main et aux implications de l'utilisation des deux mains.

Degré de liberté de la main

La main étant constitué de cinq doigts, nous pourrions penser, *a priori*, que nous pouvons exploiter cinq fois le nombre de paramètres impliqués lors de l'utilisation d'un doigt sur une surface tactile. Cependant, le nombre de degrés de liberté de la main est limité.

Wang et al. [WR09] ont notamment étudié les propriétés utilisables pour des interactions multipoints. Selon eux, la forme, la taille de la surface et l'orientation des doigts sont des points d'entrées utiles et efficaces pour le design de gestes naturels multipoints. Ils précisent, cependant, que la surface des doigts ne devrait pas être prise en compte lorsque d'autres doigts de la même main sont mis en jeu. En effet, le changement de position d'un doigt peut entraîner le changement de position des autres doigts de la même main. Par exemple, le déplacement de l'auriculaire provoque généralement un déplacement involontaire de l'annulaire. Ils indiquent également que l'annulaire, l'index et le majeur sont les doigts les plus précis, et que l'auriculaire est difficile à utiliser pour les tâches d'interactions.

Interaction bi-manuelle

L'utilisation des deux mains permet de bénéficier d'une plus grande efficacité physique, mais également d'apporter une référence proprioceptive de l'une par rapport à l'autre. En effet, selon un des articles de Tomer Moscovich [Mos06], l'utilisation des deux mains permet de séparer plus facilement les degrés de liberté, et ainsi de bénéficier d'une plus grande efficacité physique. Par exemple, le mouvement de deux doigts d'une même main est plus difficile à séparer que le mouvement de deux mains. Leganchuk *et al.* [LZB98] indique également une efficacité cognitive plus importante pour les tâches complexes car l'utilisateur visualise mieux les points qu'il contrôle. De plus, selon Hauptman [Hau89], la plupart des personnes utilisent intuitivement et préfèrent se servir de leurs deux mains et de leurs doigts dans toutes les directions pour la manipulation d'un cube affiché sur un écran, plutôt que l'utilisation de la parole ou d'associations de paroles et de gestes. Ainsi, les utilisateurs ont tendance à vouloir appliquer des métaphores gestuelles pour déplacer les objets virtuels, tels qu'ils le font dans le monde réel.

L'utilisation de deux mains permet également d'avoir une référence spatiale de l'une par rapport à l'autre [Gui87]. Pour illustrer ceci, JanMohamed *et al.* [JZM] ont montré qu'il était plus aisé, pour des droitiers, d'atteindre une cible située sur une surface plane avec son index droit lorsque l'index de la main gauche est placée sur cette cible. Toutefois, selon Guiard [Gui87], la main gauche et la main droite évoluent dans des échelles temporelles et spatiales différentes. La main non-dominante évoluerait dans une échelle macro-métrique, alors que la main droite évoluerait dans une échelle micrométrique. Enfin, l'utilisation de plusieurs points de contacts semble préférable que ce soit pour des tâches séquentielles ou parallèles [BM86], avec une contrainte pour les tâches symétriques qui est de garder les deux mains dans le champ visuel [BH00].

1.2.3 Fatigue musculaire

La fatigue musculaire est une caractéristique importante à prendre en compte lors de la conception d'une interface physique ou d'une technique d'interaction. Ainsi, Ahlström *et al.* [ALM92] ont étudié l'angle d'inclinaison idéal d'un écran tactile fixe pour une tâche de sélection selon les angles suivants : 0° , $22,5^\circ$, 30° , 45° , 60° et 90° . Ils en ont conclu qu'un angle d'inclinaison de 90° entraîne des erreurs de précision, et que les angles préférés des utilisateurs sont ceux de $22,5^\circ$ et 30° . Toutefois, Schultz [Sch98] a montré qu'il n'y a pas d'angle d'inclinaison optimal pour un écran tactile correspondant à tous les utilisateurs. Il s'est appuyé sur Humanscale [DTB81], définissant des propriétés humaines tel que l'intervalle d'angles de tête où l'utilisateur ne ressent aucune fatigue, pour définir l'angle optimal. Ainsi, il en déduit que le meilleur angle dépend de la hauteur de la tête de l'utilisateur par rapport à l'écran. Il indique que l'angle d'inclinaison des yeux doit être inférieur à 35° et celui de la tête à 30° car ces intervalles définissent les zones de mouvements faciles des yeux, respectivement de la tête.

Des problèmes de fatigue peuvent également être engendrés par des techniques d'interaction. Certaines personnes devant utiliser leur ordinateur plusieurs heures par jour, il est indispensable que la technique conçue ne provoque pas de problèmes de fatigue. Ces problèmes peuvent, par exemple, être engendrés par une pression forte exercée à long terme ou par de nombreux gestes des bras [WR09]. Ils peuvent également être occasionnés par l'inconfort de la position de l'utilisateur, ce qui est par exemple le cas lorsque l'utilisateur n'a pas la possibilité de poser ses mains ou ses bras [dIRKOD08].

1.3 Techniques d'interaction avec du contenu 2D

Comme indiqué dans la section précédente, de nombreuses propriétés physiologiques sont mises en jeu lors de l'utilisation de surfaces tactiles. Nous nous intéressons ici aux études mettant à profit ces caractéristiques pour

l'interaction avec du contenu 2D, les espaces de travail les plus communs étant en deux dimensions.

1.3.1 Adaptation des interfaces souris aux surfaces tactiles

Les espaces de travail actuels sont généralement composés d'un environnement en deux dimensions avec lequel nous pouvons interagir à partir d'un clavier et d'une souris. La souris étant donc le périphérique le plus communément utilisé, de nombreux travaux se sont concentrés sur l'élaboration de techniques d'interaction permettant d'interagir à partir d'entrées tactiles avec les interfaces existantes, c'est-à-dire initialement conçues pour la souris. Ainsi, Matejka *et al.* [MGLF09] proposent d'émuler une souris à molette à partir d'entrées multipoints, chaque bouton de la souris virtuel étant émulé via le nombre de doigts posés sur la surface ou via un geste défini (cf. Figure 1.18).

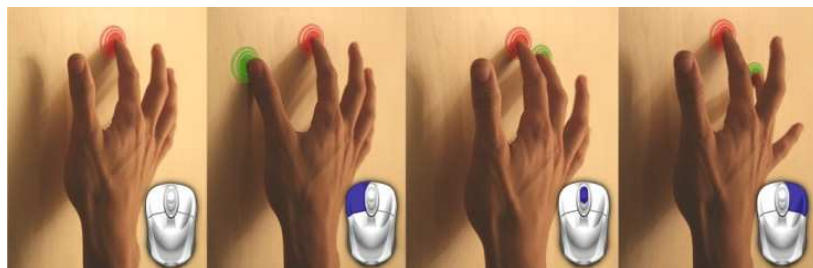


FIGURE 1.13: Exemple d'émulation de souris à partir d'entrées multipoints. Chaque combinaison de doigt correspond à l'activation d'un bouton différent [MGLF09]

D'autre part, toujours dans le but d'interagir avec les environnements existants, plusieurs études portent sur l'augmentation de la précision des interactions avec le doigt, la souris étant plus précise que le doigt. C'est en 1988 que Potter *et al.* [PWS88] propose que le curseur soit placé à une certaine distance du point de contact, ainsi la sélection bénéficie de la rapidité de l'interaction directe et de la précision de l'interaction indirecte. D'autres techniques ont ensuite été introduites sur le même principe. En 2007, Vogel et Baudsich [VB07] présentent une méthode qui consiste à afficher de manière agrandie la zone occultée par le doigt. L'utilisateur peut alors glisser le doigt pour contrôler de manière indirecte un curseur situé dans cette zone d'agrandissement. D'autres méthodes ont été introduites pour augmenter la précision, tel que *TapTap* de Roudaut *et al.* [RHL08]. L'utilisateur sélectionne la zone où le point sélectionné se situe, un agrandissement de la surface occultée par le doigt est alors créé, puis l'utilisateur sélectionne le point de manière plus précise via l'agrandissement.

En 2006, Benko *et al.* [BWB06] proposent diverses solutions s'appuyant

sur l'utilisation de deux doigts, tels que le positionnement du curseur à mi-distance entre deux doigts posés sur la surface (cf. Figure 1.18(a)), l'utilisation d'un doigt pour spécifier une zone approximative et l'utilisation d'un second pour sélectionner de manière précise dans un agrandissement de cette zone (cf. Figure 1.18(b)) ou encore l'utilisation d'un menu pour définir la vitesse du curseur avec un doigt et le déplacement du deuxième pour déplacer le curseur (cf. Figure 1.18(c)).

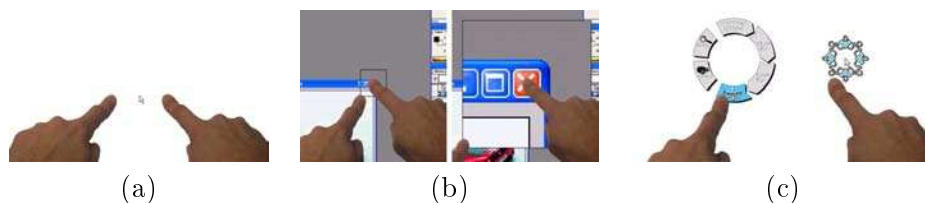


FIGURE 1.14: Exemples de techniques proposées par Benko *et al.* [BWB06] pour augmenter la précision de la sélection en utilisant deux doigts : positionnement du curseur à mi-distance entre deux doigts posés sur la surface (a), agrandissement d'une zone via un doigt et sélection du point d'intérêt via le deuxième doigt (b), utilisation d'un menu définissant la vitesse du curseur avec un doigt et déplacement avec un deuxième doigt (c).

1.3.2 Langage de gestes

Le fait que le périphérique d'entrée soit une partie du corps humain et non un objet facilite l'interaction avec des gestes [WEH01]. Ainsi, de nombreuses études se sont intéressées à l'établissement de langage de gestes, notamment dans le but de différencier les actions entre elles. Par exemple, l'un des gestes les plus connus correspond à rapprocher deux doigts l'un de l'autre pour dézoomer. La plupart des langages de gestes pour surfaces tactiles ont été **définis par les concepteurs**, chaque geste correspondant à une action définie, que ce soit pour l'accès et le contrôle de plusieurs parties d'un écran géant [MRB05], pour la manipulation d'une carte [TSGF06], ou pour la manipulation d'objets 2D de manière personnelle [Rek02, WB03, WSR⁺06] ou collaborative [MHPW06].

Plutôt que de créer un vocabulaire de gestes arbitraires selon l'avis des concepteurs, un ensemble de travaux s'est basé sur l'observation de gestes, non guidés, pour la définition d'un ensemble de gestes le plus approprié possible **conçu via la connaissance acquise sur le comportements des utilisateurs**. Par exemple, Wobbrock *et al.* [WMW09] ont mis en place une étude pour comprendre comment les utilisateurs interagissent sur une surface avec des actions de contrôles standards telles que la suppression, la copie de fichiers ou la manipulation d'images. De même, Epps *et al.* [ELW06] ont

étudié la façon dont les utilisateurs exploitent la forme qu'ils peuvent faire adopter à leurs mains afin d'appliquer des actions de contrôles standards (couper, zoomer, *etc.*). De façon analogue, Koskinen *et al.* [KLH08] ont étudié les préférences des utilisateurs et les associations sur les mouvements des mains pour comprendre ce qui est *naturel* et *confortable*. De plus, certains travaux s'intéressent à l'**apprentissage de gestes par le système** pour que l'utilisateur puisse lui-même définir les gestes qu'ils associent à telle ou telle action [DK, KY97, KT88]. Ceci comprend notamment de pouvoir interpréter des gestes plus ou moins proches, ou plus ou moins petits [AB10].

Finalement, Tomer Moscovich [Mos09] utilise les gestes, non pas en les associant à une action donnée, mais pour améliorer l'efficacité de la sélection à partir d'un écran tactile. Pour augmenter la précision de la sélection avec un doigt, il propose une interaction où l'utilisateur touche la surface à proximité de l'élément qu'il souhaite sélectionner de façon imprécise, puis de glisser son doigt suivant une direction définie par le widget à activer (cf. Figure 1.16). Ainsi, il devient par exemple plus aisé de sélectionner des boutons côte à côte. Les boutons étant généralement agrandis pour la sélection via les doigts, ce design permet de conserver une petite taille des boutons afin de garder un nombre d'informations importantes sur l'écran.



FIGURE 1.15: Widget de sélection proposé par Moscovich [Mos09]. A gauche, sélection imprécise du bouton souhaitée du fait de l'occultation de la zone de contact du doigt. A droite, l'utilisation des widgets proposés permet une sélection précise par l'utilisation de gestes.

1.3.3 Manipulation versus séparation de plusieurs degrés de liberté

Manipulation de plusieurs degrés de liberté et colocalisation

La colocalisation est très utilisée lors de l'interaction avec un écran tactile. Elle est surtout utilisée pour simuler un comportement proche de ce que l'utilisateur connaît dans le monde réel, du fait qu'il touche ce qu'il veut manipuler, sans à avoir à apprendre à utiliser la technique d'interaction.

Parmi les diverses techniques de manipulation s'appuyant sur la colocalisation, la technique nommée actuellement *RST* (*Rotations, Scaling, and Translations* en anglais, soit Rotations, Changement d'échelle et Translations

en français) est l'une des plus connues employant la colocalisation pour la manipulation d'objets 2D et nécessite l'utilisation de deux doigts [KFBB97]. Lorsque les doigts posés sur un objet 2D se déplacent dans le même sens en suivant une droite, il y a translation, lorsqu'ils tournent, il y a rotation, et lorsqu'ils s'écartent ou s'approchent les uns des autres, il y a agrandissement ou rétrécissement de l'objet. Ainsi, en utilisant l'orientation et la position des doigts, l'utilisateur peut effectuer les opérations de translations, de rotations et de changements d'échelle de façon simultanée.

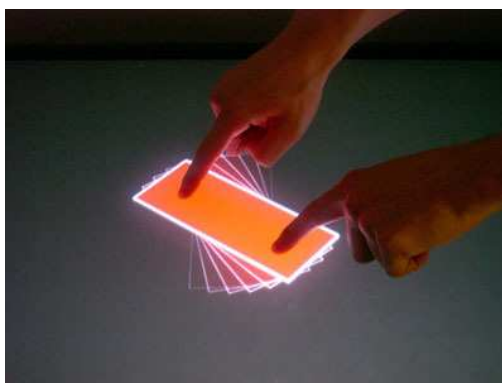


FIGURE 1.16: Rotation effectuée avec la technique RST, les deux doigts restent colocalisés avec les points sélectionnés sur l'objet [sitb].

En 2005, Kruger *et al.* [KCST05] ont proposé *RNT* (*Rotate and Translate* en anglais, soit Rotation et Translation en français), une technique permettant de contrôler les rotations et les translations d'un objet 2D à partir d'un point de contact uniquement, le but étant d'avoir une technique disponible sur le plus de surfaces possibles, y compris les surfaces monopoints, très répandues à l'époque. Si l'utilisateur touche l'objet en son centre, il y a translation uniquement, tandis que s'il touche un coin de l'objet et se déplace, l'objet va se déplacer en effectuant une rotation, comme le ferait une feuille de papier qu'on glisserait sur une table.

De plus, Igarashi *et al.* [IMH05] exploitent la colocalisation pour la déformation d'objets. Le déplacements des doigts provoque une déformation calculée de telle sorte que chaque doigt reste colocalisée et qu'il y ait minimisation de la distorsion de chaque triangle du maillage qui définit l'objet 2D.

Séparation des degrés de liberté

Certaines études se sont intéressées à la séparation des degrés de liberté au détriment de l'aspect « naturelle » de l'interaction. Nacenta *et al.* [NBBW09] propose notamment de découper l'objet manipulé en plusieurs

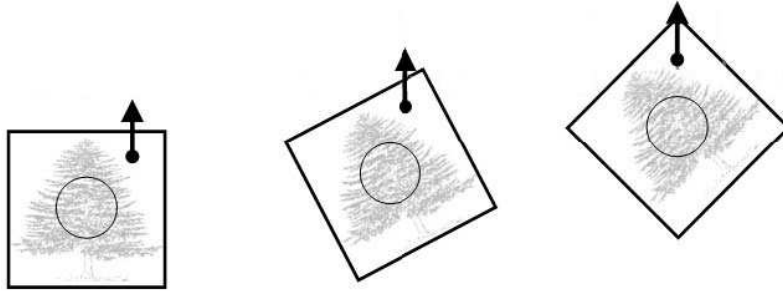


FIGURE 1.17: Technique proposée par Kruger *et al.* [KCST05].

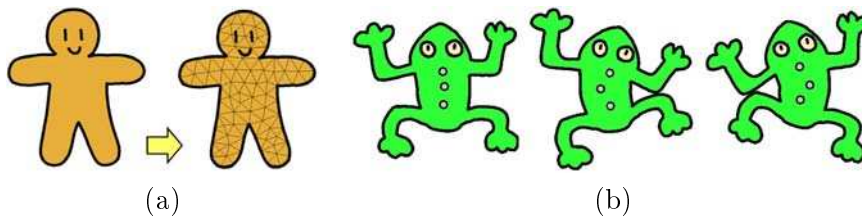


FIGURE 1.18: Exemple de maillage d'un objet 2D (a) et déformation de Igarashi *et al.* [IMH05], les points représentent la position des doigts (b).

zones dédiées à des actions bien spécifiques. Par exemple, lorsque l'utilisateur touche un coin de l'objet, celui-ci va subir une rotation, tandis que s'il touche un autre coin, l'objet va subir une translation. De manière intéressante, ils montrent que les **interactions sans séparation des degrés de liberté peuvent être plus rapides** que les périphériques standards, mais qu'elles **posent des problèmes de précision**. En effet, ils remarquent dans leur étude, qu'avec la technique RST, le changement d'angle d'un objet entraîne souvent un changement d'échelle involontaire. Knoedel et Hachet [KH11] ont également montré que les utilisateurs ont tendance à utiliser les rotations et les translations de manière conjointe en appliquant la technique RST, alors que les changements d'échelle sont effectués de manière dissociée. De plus, Moscovich et Hugues [MH06] indiquent également dans l'une de leurs études que l'utilisation des divers degrés de liberté de manière simultanée fait perdre en précision.

1.3.4 Utilisation de paramètres avancés

Quelques travaux se sont également intéressés à l'utilisation de paramètres avancés, telles que la pression ou la surface de contact, pour la manipulation de contenu bidimensionnel.

Exploitation de la pression

De nombreux écrans tactiles capables de détecter la pression ayant émergé depuis peu, plusieurs études récentes portent sur l'utilisation de la pression du doigt. D'une part, certaines études ont démontré que plusieurs niveaux de pression étaient contrôlables de manière **discrète** (cf. section 1.2.1). Brewster et Hugues [BH09] ont exploré la pression pour la saisie de texte. Si la pression est élevée, la lettre entrée est une majuscule, sinon c'est une minuscule. De plus, ils comparent deux techniques pour interagir avec la pression avec un clavier standard, en condition assise et en train de marcher. Dans cette étude, les techniques basées sur la pression surpassent l'utilisation du clavier standard pour la saisie de texte sur périphérique mobile à la fois quand l'utilisateur se déplace et lorsqu'il est immobile.

D'autre part, certaines études portent sur le contrôle de la pression de manière **continue**. Baglioni *et al.* [BMLG11] ont exploité la pression pour améliorer les fonctionnalités de scrolling sur des écrans tactiles en changeant la vitesse de scroll en fonction de la pression appliquée par un doigt immobile. De même, Rekimoto et Schwesig [RS06] présentent un système permettant de détecter la pression et de fournir un retour tactile. Ils ont utilisé cela pour l'émulation de boutons contrôlables selon plusieurs niveaux de pression et le scroll de carte avec un changement continu d'échelle.

De plus, deux récentes études portent sur l'**association de la pression avec les gestes**. Harrison *et al.* [HH12] ont proposé de combiner le geste avec l'utilisation de la pression exercée sur la surface pour des applications tels que le contrôle du volume ou de la luminosité, des manipulations précises pour résoudre les problèmes d'imprécision dus à la taille des doigts ou pour changer de mode (le déplacement du doigt après la sélection d'un objet avec une pression standard permet de le déplacer, alors qu'une forte pression permet de le dupliquer). Heo et Lee [HL11] ont proposé un ensemble de cinq gestes basés sur la pression, ainsi que les icônes associés, en la décomposant en forces normale et tangentielle, afin d'augmenter les possibilités d'interaction avec des écrans tactiles. Ils ont effectué un test de faisabilité sur cinq personnes et ont conclu que la technique proposée permet de distinguer les différents gestes, bien qu'ils aient la même trajectoire.

Autres paramètres avancés

Des paramètres moins courants ont également été explorés afin d'enrichir l'interaction sur surfaces tactiles. Comme vu précédemment, Holz et Baudisch [HB10] proposent par exemple d'utiliser l'empreinte digitale pour augmenter la précision de la sélection. D'autres travaux proposent d'exploiter l'orientation des doigts pour connaître la zone occultée par la main et la position de l'utilisateur par rapport à la surface ou pour la sélection d'objets 2D [WCRI09, WR09]. Cao *et al.* [CWB⁺] ont également proposé d'utiliser la

forme de la surface de contact pour la manipulation d'objets 2D, la surface de contact étant proportionnelle à la force virtuelle appliquée sur l'objet.

1.4 Bilan

Les surfaces tactiles existent depuis plus de trente ans, mais leur utilisation s'est généralisée depuis quelques années seulement avec l'apparition des smartphones. Quelques chercheurs se sont intéressés à des configurations géométriques plus complexes qu'un simple écran tactile, et ce afin de pallier des problèmes d'occultation ou dans l'objectif d'apporter une plus grande facilité d'interaction, et notamment via des surfaces à géométrie 3D pour l'interaction avec du contenu tridimensionnel.

Plusieurs paramètres contrôlables avec le doigt peuvent être exploités lors de l'interaction sur surfaces tactiles, par exemple la position du doigt, la dimension et la taille de la surface de contact ou la force de pression exercée sur la surface. Cependant, l'interaction avec un écran tactile souffre du problème d'occultation de la zone d'affichage par la main, et de l'imprécision due à la taille du doigt. De plus, l'interaction avec une main et deux mains correspondent à deux problèmes bien différents. En effet, les deux mains sont perçues différemment par les utilisateurs et ont des rôles qui leur sont plus ou moins adaptés. Les problèmes anatomiques sont également à prendre en compte dans la conception de technologies ou de technique d'interaction. La fatigue est par exemple un élément important. Ainsi, des gestes amples sont à éviter pour des actions régulières par exemple.

De plus, les écrans tactiles sont associés à une interaction « naturelle » par le biais de la colocalisation d'une part, et par la possibilité de faire des gestes avec les doigts, et non à partir d'un périphérique matériel, d'autre part. Tandis que la colocalisation et la manipulation de plusieurs degrés de liberté apportent un caractère plus « naturel » à l'interaction, la séparation des degrés de liberté peut apporter une plus grande efficacité suivant l'action à effectuer. De manière générale, la manipulation de plusieurs degrés de liberté est plus efficace en terme de temps, alors que la séparation des degrés de liberté permet une plus haute précision.

Finalement, de nombreuses techniques d'interaction pour écrans tactiles ont été conçues pour pallier des problèmes de précision et d'occultation. Ces problèmes sont relatifs à des environnements qui ont à l'origine été créés pour des interactions avec la souris. Ainsi, la souris étant plus précise que le doigt, certaines études ont eu pour objectif de rapprocher la précision de l'interaction avec le doigt à celle de l'interaction avec la souris. Inversement, les surfaces tactiles ont pour avantage de faciliter les gestes, contrairement à la souris où le contrôle des courbures est plus difficile. En outre, les techniques d'interaction doivent être adaptées à chaque périphérique selon ces avantages et ces inconvénients. De plus, nous pouvons remarquer que les paramètres

plus rarement enregistrés par les surfaces tactiles, ont été peu explorés. Très peu d'études exploitent la taille ou l'orientation de la surface de contact par exemple. Actuellement, plusieurs sociétés s'intéressent à l'utilisation de pression sur surfaces tactiles, et quelques études portant sur ce paramètre ont vu le jour, mais elle reste très peu explorée, notamment de manière continue.

Interaction 3D

Dans le chapitre précédent, nous avons défini les principales technologies tactiles existantes, les implications physiologiques mises en jeu dans leur utilisation, ainsi que leur apport pour l'interaction. Ce mémoire étant consacré à l'étude de l'interaction avec du contenu tridimensionnel via des surfaces tactiles, dans ce chapitre, nous nous intéresserons plus particulièrement à l'interaction avec du contenu tridimensionnel.

Dans un premier temps, nous aborderons les problématiques liées à l'interaction avec du contenu tridimensionnel de manière générale. Puis, dans un deuxième temps, nous nous consacrerons à l'étude des travaux existants concernant l'interaction 3D avec des surfaces tactiles.

2.1 Problématiques liées à l'interaction 3D

Le problème majeur provenant de l'interaction avec du contenu tridimensionnel vient du fait que les périphériques les plus couramment utilisés, tels que la souris et l'écran tactile, ne disposent que d'un espace d'entrée à deux dimensions uniquement, tandis que l'espace de sortie est à trois dimensions. Il est donc nécessaire de créer des techniques d'interaction permettant la manipulation d'objets 3D via ces périphériques. En effet, un point ou un segment définis dans l'espace d'entrée à deux dimensions correspond à une infinité de points et de segments dans l'espace tridimensionnel.

Selon Bowman *et al.* [BKLP01], la plupart des tâches d'interaction 3D se divise en trois catégories : l'une définissant la sélection et la manipulation, la deuxième la navigation, et enfin, la troisième le contrôle du système. Nous étudierons donc les techniques d'interaction associées à ces tâches en exposant les techniques les plus couramment utilisées, principalement créées pour des interactions via la souris. La manipulation d'objets 3D étant le sujet principal de cette thèse, nous exposerons plus brièvement les tâches de sélection, de navigation et de contrôle du système. Finalement, nous aborderons l'utilisation des périphériques d'entrée à trois dimensions afin de déterminer

les avantages et les inconvénients de leur utilisation par rapport aux périphériques d'entrée à deux dimensions.

Tout d'abord, la notion de repère se doit d'être définie. Effectivement, la manipulation d'objets 3D et la navigation dans un environnement 3D s'effectuent généralement selon un repère donné. Quatre types de repères sont couramment utilisés (cf. figure 2.1), tous correspondant à des repères cartésiens :

- Le **repère modèle ou repère local d'un objet** : correspond à un repère centré sur l'objet dont les axes sont suivant l'orientation de l'objet ;
- Le **repère monde** : correspond à un repère global à la scène définissant l'environnement, deux axes définissent le sol de l'environnement 3D et un axe est orthogonal au plan défini par le sol.
- Le **repère caméra** : le point de vue courant est considéré comme l'origine du repère, deux axes sont définis dans le plan de la caméra et un axe est orthogonal à ce plan.
- Le **repère écran** : deux axes sont définis dans le plan de l'écran suivant chaque côté de celui-ci et un axe est orthogonal à ce plan. Il est notamment utile pour connaître la position d'un pixel dans le plan de l'écran, ainsi que sa profondeur.

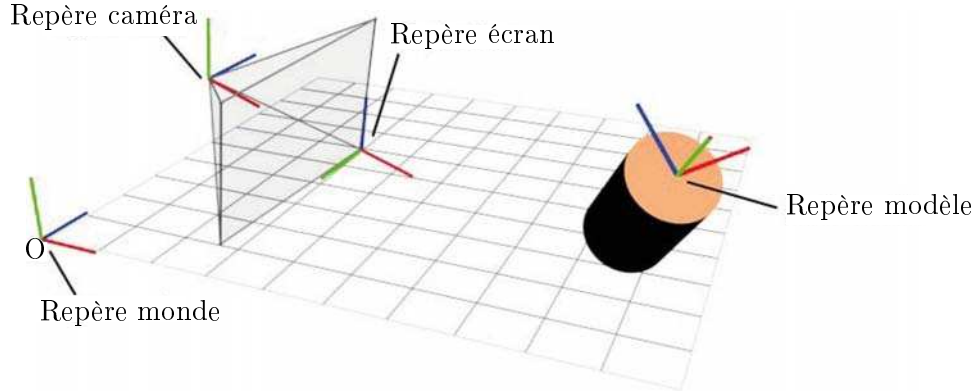


FIGURE 2.1: Repères couramment utilisés [D09].

Dans le cas du repère écran, nous définissons l'axe z comme l'axe orthogonal au plan de l'écran et, x et y comme les axes définis dans ce plan. La notion de repère étant définie, nous nous intéressons plus particulièrement aux tâches d'interaction 3D.

2.1.1 Sélection et manipulation

La sélection d'un objet est requise avant toute manipulation de ce dernier. Elle permet d'identifier quel objet l'utilisateur souhaite manipuler parmi

l'ensemble de ceux de la scène 3D. La sélection via des périphériques d'entrées à deux dimensions se fait généralement par sélection de la cible à l'aide d'un pointeur, tels que la souris ou le doigt. Une fois l'objet sélectionné, la manipulation de ce dernier se décompose en trois transformations primaires : la translation, la rotation et le changement d'échelle (***Rotation, Scale, Translation (RST)*** en anglais). D'autres manipulations plus complexes existent, comme la déformation par exemple. Dans le cadre cette thèse, nous nous concentrerons sur les tâches primaires exposées ci-dessus.

En 1986, Nielson et Olsen [NO87] font parties des premiers chercheurs à s'intéresser aux transformations 3D via un périphérique d'entrée à deux dimensions, la souris. D'une part, ils proposent de définir un point 3D via l'utilisation d'un ***widget***, élément d'une interface graphique avec lequel l'utilisateur peut interagir pour accéder à des actions données. Le widget défini par Nielson et Olsen correspond à trois flèches représentant l'espace 3D. Les auteurs proposent de décomposer l'espace en six zones correspondant aux déplacements selon les trois axes du widgets dans un sens et dans le sens opposé (cf. figure 2.2(a)). Les déplacements dans ces zones permet ainsi de définir des déplacements du widget dans l'espace, la position du widget correspondant à la position du point 3D. D'autre part, ils proposent d'**utiliser les informations que fournit l'objet**. Ainsi, pour les translations selon un axe, si un utilisateur sélectionne deux points à proximité d'une arête d'un cube, c'est-à-dire que la projection des points sur l'écran correspondent à des points à proximité de l'arête du cube, le système va effectuer une translation selon l'axe défini par l'arête et allant d'une distance égale à celle entre le premier point et le deuxième point (cf. figure 2.2(b)). De même, si l'utilisateur sélectionne deux points d'une face d'un cube, la translation s'effectuera dans le plan défini par la face et selon le vecteur allant du premier point au deuxième point (cf. figure 2.2(c)). Nielson et Olsen définissent des systèmes similaires pour les rotations et les changements d'échelles selon un axe et dans un plan via la définition par l'utilisateur de trois points du cube.

En 1992, Conner *et al.* [CSH⁺92] proposent des widgets 3D centrés sur l'objet et composés de plusieurs poignées pour la manipulation d'objet 3D (RST), ainsi que pour la déformation (cf. Figure 2.3). L'utilisateur sélectionne ces poignées pour effectuer les transformation souhaitées, le choix de la transformation étant effectuée selon le bouton de la souris maintenu par l'utilisateur.

Les rotations

Des études sont essentiellement basées sur le cas des rotations 3D. En 1988, Chen *et al.* [CMS88] font parties des premiers chercheurs à étudier le contrôle de rotations 3D à partir de périphériques d'entrées à deux dimensions de manière directe. Ils ont notamment introduit la sphère virtuelle

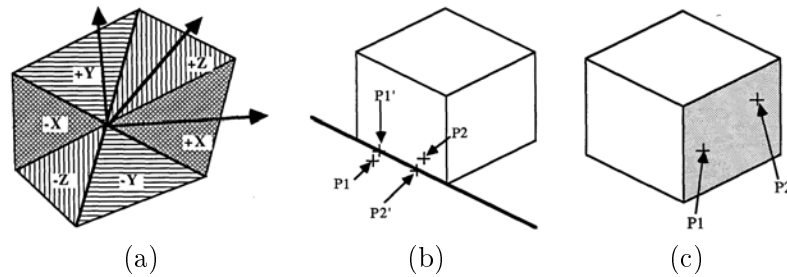


FIGURE 2.2: Techniques de manipulation 3D proposées par Nielson et Olsen : découpage de l'espace en six pour la définition d'un point 3D (a), définition de deux points $P1$ et $P2$ pour la translation selon un axe, $P1'$ et $P2'$ étant les points définissant le vecteur de la translation résultante (b) et définition de deux points sur une face du cube pour la translation dans un plan (c) [NO87].

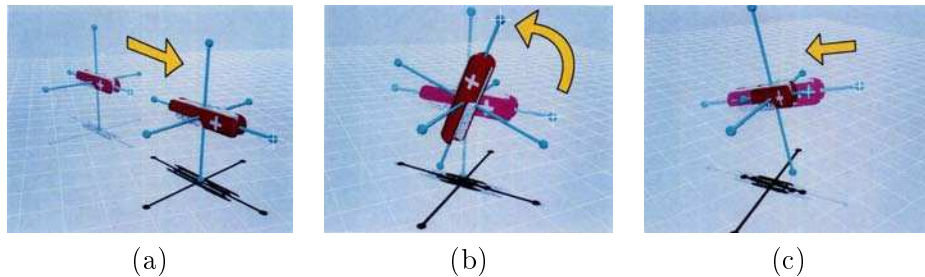


FIGURE 2.3: Techniques de manipulation 3D proposées par Conner *et al.* s'appuyant sur un widget composé de poignées et sur le changement de mode de transformation via les différents boutons de la souris : la sélection d'un axe du widget permet la translation de celui-ci (a), la rotation (b) ou le changement d'échelle (c) [CSH⁺92].

(*Virtual Sphere*, en anglais), qui est définie comme une sphère englobant l'objet. L'utilisateur peut alors déplacer l'objet en faisant tourner cette sphère à partir d'un curseur. Pour cela, l'utilisateur sélectionne un point de la sphère, et, lors du déplacement, le point sélectionné reste colocalisé avec la position du curseur. Quatre ans plus tard, Shoemake [Sho92] améliore cette technique en introduisant la technique *Arcball*, qui consiste à orienter l'objet, et non une sphère additionnelle, de manière colocalisée avec la souris. Ainsi, il s'agit d'une *Virtual Sphere* dont le centre correspond au centre de l'objet et dont le rayon est égal à la distance entre le point sélectionné et le centre de l'objet.

Les translations

D'autres études sont principalement basées sur le cas des translations 3D. De la même façon que Nielson et Olsen, Bier [Bie87] s'intéresse, en 1986, au problème de positionnement 3D via des périphériques 2D. Ils proposent l'utilisation de **widgets**. Ainsi, il introduit les *Skitters*, qui sont des curseurs 3D permettant de définir une position et une orientation, et les *Jacks*, repères permettant d'assembler des objets.

D'autres études consistent à **contraindre la position de l'objet** en fonction de la position du curseur sur l'écran et de la scène 3D. En 1990, Bier [Bie90] introduit le concept de *snap-dragging* pour la 3D, qu'il avait initialement introduit pour la 2D quatre ans auparavant [BS86]. Cela consiste à déplacer le curseur de l'utilisateur vers des points particuliers. On pourrait l'apparenter à un mécanisme de magnétisme. Par exemple, si l'utilisateur approche un premier objet au niveau d'un deuxième objet, l'objet manipulé va s'aligner avec le second objet au niveau du point sous le curseur. Il indique également dans son étude que cette méthode est plus rapide que l'utilisation des *Skitters* et des *Jacks* pour l'assemblage d'objets. En 2005, Oh et Suerzlinger [OS05] proposent une technique basée sur le même concept que Bier [Bie90] en prenant en compte non pas le point sous le curseur, mais la surface entière, pour éviter des problèmes de collision. De façon assez similaire au concept introduit par Bier [Bie90], Bukowski et Séquin [BS95] proposent une technique combinant du *snap-dragging* et une simulation de la gravité. L'objet glisse le long de la surface de l'objet le plus proche, excepté le cas où l'utilisateur glisse l'objet jusqu'au bord d'une surface. Dans ce cas, l'objet tombe pour simuler la gravité. Ceci permet d'obtenir un comportement plus naturel. Cette catégorie de techniques reposant sur un mécanisme de magnétisme a pour avantage de placer les objets plus rapidement les uns par rapport aux autres. Cependant, elle ne permet pas de positionner l'objet librement dans la scène, c'est-à-dire sans qu'il soit contre un autre objet.

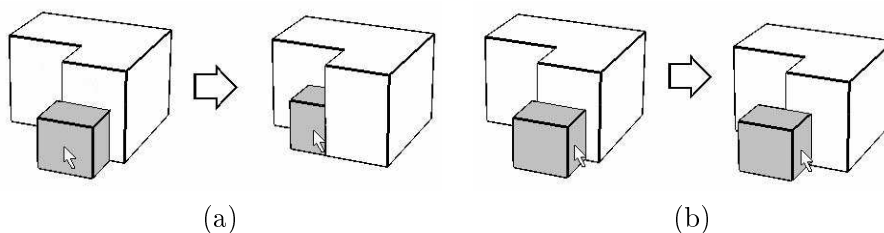


FIGURE 2.4: Technique consistant à contraindre la position de l'objet introduite par Bier [Bie90] (a) et par Oh et Suerzlinger [OS05] [OS05].

Une autre technique consiste à **diviser l'écran en quatre vues**, une vue orthogonale pour chaque plan de l'espace cartésien centré sur l'objet,

et une vue en perspective. Lors d'une étude menée par Oh et Suerzlinger [OS05], cette méthode a été démontrée comme plus rapide que la méthode proposée basée sur des translations imposées par le système par contrainte. Par contre, les auteurs indiquent que les utilisateurs percevaient mieux la position de l'objet 3D avec leur méthode qu'avec celle reposant sur les quatre vues. Il est important de noter que les utilisateurs étaient des novices en 3D.

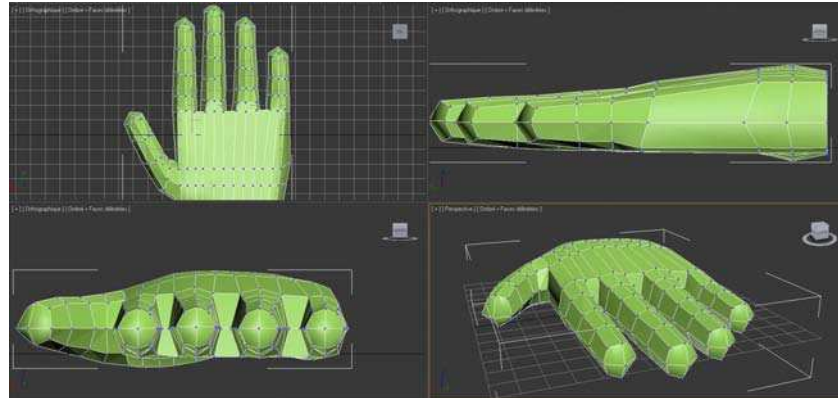


FIGURE 2.5: Division de l'écran en quatre vues : une en perspective (en bas, à droite) et chacune des autres dans chaque plan définissant le repère [sitc].

Techniques des logiciels de modélisation d'aujourd'hui

Les principaux outils existant aujourd'hui pour manipuler un objet 3D se trouvent dans les logiciels de modélisation 3D. Ils s'appuient principalement sur des widgets de transformations. L'un des plus connus est notamment le widget du logiciel d'animation 3D d'Autodesk, Maya [Aut](cf. figure 2.6). Il est constitué des trois axes du repère par trois flèches, chacune ayant un cube au milieu. Des cercles centrés sur l'origine du repère permettent de représenter les cercles de rotations. La translation selon un axe donné s'effectue après avoir sélectionné la flèche correspondante, la rotation après avoir sélectionné le cercle de rotation correspondant et le changement d'échelle après avoir sélectionné le cube situé sur l'axe correspondant. Cette technique repose donc sur la séparation des degrés de liberté. Elle permet ainsi une grande précision, mais requiert de nombreuses manipulations. Les designers ont pour habitude d'utiliser le widget pour les rotations, ainsi que la décomposition en plusieurs vues pour les translations.

Il existe également des widgets se basant sur une boîte englobant l'objet, dans le logiciel Maya [Aut] par exemple. Ce type d'interaction a été introduite par Houde en 1992 [Hou92]. De manière intéressante, Singh *et al.* [RSB08] ont récemment proposé de manipuler des objets 3D (RST) en effectuant des gestes au préalable pour définir le widget qu'il souhaite utiliser, chaque

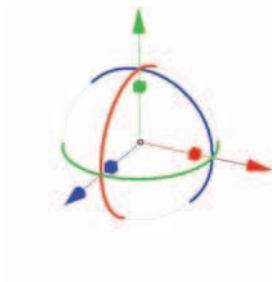


FIGURE 2.6: Outil de manipulation du logiciel de modélisation Maya [Aut] : widget composé des trois widgets de translations, rotations et changements d'échelle.

geste correspondant à l'appel d'un widget de manipulation. Ils indiquent également suite à une étude, que les utilisateurs ont besoin d'un certain temps d'adaptation.

2.1.2 Navigation

La navigation correspond à des déplacements dans une scène 3D, et donc à effectuer des translations et des rotations du point de vue. La navigation peut être décomposée en deux catégories : l'exploration, qui consiste à se déplacer dans un environnement 3D de manière globale, et l'observation de modèle 3D, qui nécessite généralement des déplacements autour de l'objet uniquement.

Dans un premier temps, nous exposerons les principales classes de techniques de navigation, puis nous présenterons diverses techniques pour l'exploration d'une part, et l'observation d'autre part. De nombreuses techniques de navigation ayant été introduites et la navigation n'étant pas l'objet principal de cette thèse, nous ne présenterons que les plus communes.

Techniques courantes de navigation

Les techniques les plus couramment utilisés pour la navigation sont :

- **Panning** : La caméra effectue des translations dans le plan de l'écran.
- **Zoom** : La caméra effectue des translations suivant l'axe orthogonal au plan de l'écran.
- **Orbit** : La caméra tourne autour d'un point de la scène 3D.
- **Look around** : La caméra tourne sur elle-même.
- **Flying** : La caméra se déplace dans le plan défini par sol de l'environnement virtuel et tourne sur elle-même.

Les trois premières techniques sont généralement utilisées pour l'observation d'un objet, tandis que les deux dernières correspondent principalement à des tâches de navigation dans un environnement virtuel.

Exploration

Dans la plupart des jeux vidéos 3D sur ordinateur de bureau, la navigation se fait à l'aide du clavier et de la souris via une composition des techniques de *Look around* et de *Flying*. Les translations sont effectuées via les touches directionnelles du clavier, chaque flèche correspondant à la direction de la translations, et les rotations via les déplacements de la souris. Chaque degré de liberté est donc séparé.

Le principe est similaire pour les jeux vidéos sur consoles. L'interaction se fait à l'aide de deux joysticks, l'un contrôlant les déplacements de la caméra et le deuxième contrôlant les rotations, et s'appuie sur les techniques de *Look around* et de *Flying*.

Les jeux vidéos sur téléphone tactile sont principalement une virtualisation des joysticks sur l'écran. Cela génère deux défauts majeurs : d'une part, les joysticks sont situés sur l'écran, ainsi l'utilisateur laisse les doigts sur ces derniers tout le long de l'interaction, ce qui occulte une grande partie de l'écran ; d'autre part, les joysticks virtuels perdent l'avantage du retour élastique vers la position d'origine du joystick qui aide au contrôle. Ceci indique que de nombreuses investigations sont à mener dans ce domaine.

Observation

La technique la plus couramment utilisé pour observer un objet est l'utilisation de la *trackball*. Cette méthode est proche de la *Virtual Sphere* introduite par Chen *et al.* [CMS88], et se nomme *Virtual Trackball*. La différence majeure réside dans le fait que ce n'est pas l'objet qui est déplacé lors du déplacement du curseur, mais la caméra. Cette dernière se déplace le long de la sphère virtuelle. Généralement, la sphère est centrée sur la scène ou l'objet à observer et le rayon est égal à la distance entre le centre de la scène et la position de la caméra (cf. Blender [Ble], Maya [Aut]). Cependant, la *trackball* souffre du problème relatif à la distance fixe de la caméra par rapport au centre de l'objet. En effet, si l'objet est de forme allongée par exemple, la caméra sera située trop loin ou trop proche de l'objet selon la position sur la sphère. Ainsi, certains chercheurs se sont intéressés à l'adaptation de la distance de la caméra en fonction de l'objet. Certains chercheurs se sont donc intéressés à l'étude de la scène 3D pour le positionnement contraint de la caméra [HCS96, HW97, BL99, BK01, KKS⁺05]. Dernièrement, Khan *et al.* [KKS⁺05] ont notamment proposé *HoverCam*, qui consiste à garder une distance fixe par rapport à la surface de l'objet (cf. Figure 2.7).

Certains chercheurs se sont également intéressés à la navigation via l'utilisation de gestes [IKMT98, ZF99]. Par exemple, Igarashi [IKMT98] propose de dessiner le chemin par lequel va passer la caméra, celui-ci étant calculé suivant la projection du geste dans l'environnement virtuel. De nombreuses autres techniques de navigation ont également été proposées, mais ne seront

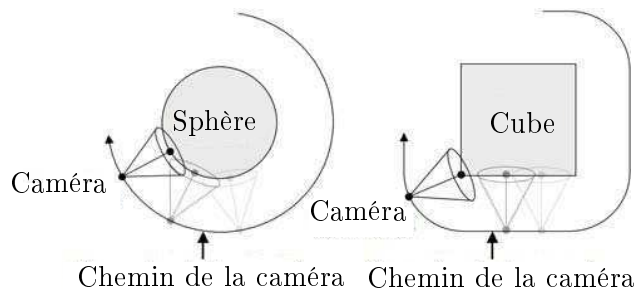


FIGURE 2.7: HoverCam : technique introduite par Khan *et al.* [KKS⁺05] permettant d’inspecter un objet en prenant en compte sa forme. La caméra se déplace autour de l’objet 3D en prenant en compte la distance par rapport à la surface de ce dernier.

pas exposées, la navigation étant peu abordée dans le cadre de cette thèse.

2.1.3 Contrôle du système

Le contrôle du système fait référence à une tâche où une commande est effectuée pour changer l’état du système. La plupart des changements de contrôles dans les applications bureautiques dédiées à une interaction à la souris et au clavier est effectuée au moyen de boutons et de menus (cf. Word, Excel, *etc.*). Quant au contrôle de système à partir d’un écran tactile, l’interaction se fait également via des boutons ou des menus (cf. iPhone [App]), mais également via des gestes. En effet, de nombreux travaux proposent de changer de mode en imposant à l’utilisateur d’apprendre un langage de gestes, chaque geste correspondant à un mode différent, que ce soit en 2D [MGLF09, MRB05, TSGF06, Rek02, WB03, WSR⁺06] vu dans le chapitre précédent dans la section 1.3 ou en 3D que nous développerons dans la section suivante 2.2 [KMB⁺11].

2.1.4 Périphériques d’entrée à trois dimensions

Diverses études sont basées sur l’utilisation de périphériques d’entrée à trois dimensions pour manipuler des objets virtuels. L’espace d’entrée et de sortie étant de mêmes dimensions, nous pouvons penser que la manipulation serait ainsi plus aisée.

Certaines oeuvres cinématographiques, tel que *Minority Report*, montrent des personnes interagissant avec leur main dans l’air. Bollensdorff *et al.* [ON09] ont notamment étudié des tâches de pointage 3D à partir de la position de la main dans l’air, et ont montré que les gestes dans l’air pouvaient être plus intuitifs et faciles à apprendre que les techniques de pointage proposées avec les périphériques 3D usuels, telle que la souris 3D (*spacemouse*, en anglais). Cependant, ce type d’interaction souffre d’un problème majeur

qu'est la fatigue des bras. En effet, la fatigue est à prendre en compte lors de la conception d'une nouvelle forme d'interaction. Lors de l'utilisation d'une souris par exemple, le bras est posé sur la table et la main repose sur la souris, permettant ainsi une utilisation de longue durée [Zha98]. De plus, Bérard *et al.* [BIB⁺09] ont réalisé une étude pour comparé la souris et des périphériques 3D. Après avoir effectué une étude pour déterminer les techniques d'interaction les plus adéquates à chaque périphérique, ils ont étudié le stress et l'efficacité de chaque périphérique. Ils en ont conclu que la souris était plus efficace que les périphériques 3D pour des manipulations précises et ont montré que l'interaction dans l'air provoquait plus de stress aux utilisateurs que les périphériques posés sur les bureaux. Cependant, Zhai [Zha98] indique également que les périphériques d'entrées à six degrés de liberté sont à privilégier lorsqu'une vitesse élevée ou qu'un faible apprentissage est requis, lorsque la fatigue et la coordination ne sont pas les problèmes principaux. Les résultats concernant la moins bonne précision des périphériques 3D et des plus hautes performances en terme de rapidité ont également été confirmé pour les rotations par Hinckley *et al.* [HTP⁺97].

L'interaction avec des périphériques d'entrées à deux dimensions pour l'interaction 3D a donc un sens du fait que les périphériques 3D sont peu usuels et peu adaptés aux tâches courantes d'une part, et du fait que des périphériques 2D, telle que la souris, peuvent surpasser les périphériques 3D dans certains cas de manipulations 3D d'autre part. De plus, l'étude de ce type d'interaction est nécessaire étant donné les problèmes exposés dans cette partie, notamment dûs à la différence de dimensions d'entrée et de sortie. Notons cependant que certains chercheurs se sont intéressés à la combinaison de gestes dans l'air et de gestes effectués sur une surface tactile afin de bénéficier des avantages des périphériques d'entrée à deux dimensions et à trois dimensions [MJGJ11, DACJ12, DACJH12].

2.2 Techniques d'interaction associant 3D et surfaces tactiles

De nombreuses études ont été menées sur l'interaction 2D avec des surfaces tactiles, contrairement aux interactions 3D. Nous nous intéressons plus particulièrement aux études concernant la manipulation d'objets 3D (RST), étant donné qu'il s'agit du coeur de cette thèse. Nous présenterons ensuite quelques travaux s'intéressant à d'autres techniques d'interaction 3D via des surfaces tactiles, telles que la navigation dans un environnement virtuel ou la déformation d'objets 3D.

C'est en 1997 que Zeleznik *et al.* [ZFS97] ont étudié des techniques utilisant deux curseurs dans le but de déterminer le potentiel de l'interaction à deux mains pour interagir avec du contenu 3D. Ces techniques permettent alors d'effectuer des translations, des rotations et des changements d'échelles

d'un objet 3D ou de contrôler la position, le zoom et l'orientation du point de vue. Ils tirent avantage de la colocalisation des deux curseurs en proposant de sélectionner un point de pivot à l'aide de la main non dominante et de manipuler l'objet ou la caméra avec la main dominante. L'objet ou la caméra subit alors les translations et rotations de telle sorte que les deux doigts soient colocalisés avec les points initialement sélectionnés.

2.2.1 Manipulation d'objets 3D

Hancock *et al.* [HCC07] ont introduit des techniques qui s'appuient sur une interaction simulant une faible profondeur (cf. Figure 2.8). Ils supposent que, si l'utilisateur poussait un objet loin dans la profondeur, il pourrait être perturbé par le fait que son doigt ne pousse pas l'objet au niveau de l'affichage. L'utilisateur peut donc agir sur cinq degrés de liberté : trois pour les rotations dans l'espace et deux pour les translations dans le plan de la table. Ils définissent des interactions à l'aide d'un, deux ou trois points de contact. Concernant l'utilisation d'un seul doigt, le point de contact est colocalisé. Lors des mouvements du doigt, l'objet tourne jusqu'à ce que le point sélectionné soit proche de la surface. Ensuite, une translation est appliquée à l'objet. Le problème de cette technique vient du fait qu'il est difficile de séparer les translations et les rotations. Concernant l'utilisation de deux doigts, le premier doigt est utilisé pour effectuer des translations dans le plan de l'écran ou une rotation autour de l'axe de profondeur. L'utilisateur peut se servir d'un deuxième doigt pour les autres rotations. De la même manière que pour la technique précédente, il est difficile de faire des translations sans rotations. Concernant l'utilisation de trois doigts, le premier doigt est utilisé pour les translations. Lorsqu'il y a deux points de contact d'une même main, il y a rotation autour de l'axe de profondeur. Lorsqu'ils y a deux points de contact, mais un de chaque main, ce sont les autres rotations qui sont mises en jeu. Cette dernière technique permet alors de séparer les degrés de liberté pour un meilleur contrôle.

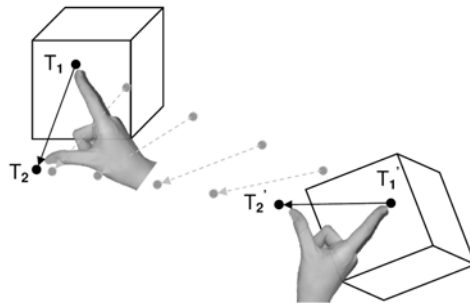


FIGURE 2.8: Technique à deux doigts utilisant une faible profondeur de Hancock *et al.* [HCC07].

Hancock *et al.* [HtCC09] ont ensuite créé d'autres techniques s'appuyant sur un environnement 3D simulant la gravité. L'espace est vue de haut. Les techniques proposées permettent d'interagir de manière colocalisée avec un ou deux doigts, offrant ainsi la possibilité d'effectuer des translations et des rotations (cf. Figure 2.9). De plus, lorsque l'utilisateur ne touche plus l'objet, celui-ci tombe du fait de la gravité simulée dans l'environnement virtuel.

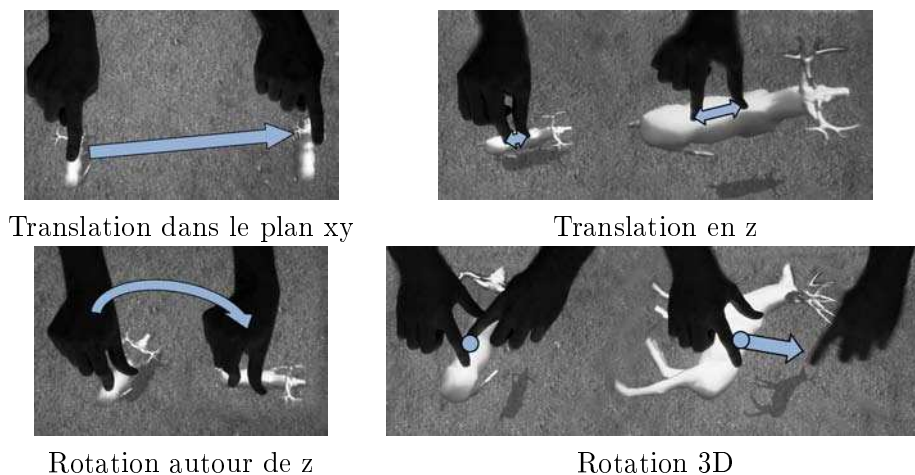


FIGURE 2.9: Techniques utilisant la gravité de Hancock *et al.* [HtCC09].

Reisman *et al.* [RDH09] ont proposé une technique colocalisée sur plusieurs doigts par l'introduction d'un ensemble de contraintes, formulé comme un problème quadratique pour effectuer des rotations, des changements d'échelle et des translations (cf. Figure 2.10). Pour les rotations, l'utilisateur peut, par exemple, définir un axe avec deux doigts qu'il laisse fixes et tourner l'objet via un troisième doigt. Cette technique souffre également du problème lié au fait que l'espace du périphérique d'entrée est de deux dimensions alors que l'espace de sortie est en trois dimensions. En effet, dans le cas d'une rotation où le doigt est initialement positionné au bord de l'objet, le système proposé ne peut pas différencier le sens de rotation.



FIGURE 2.10: Technique colocalisée de Reisman *et al.* [RDH09].

Martinet *et al.* [MCG10b] ont suggéré de poser un doigt sur l'objet virtuel pour lui appliquer des translations dans le plan de l'écran et un autre doigt en dehors de l'objet pour lui appliquer des translations dans l'axe perpendiculaire au plan de l'écran (cf. Figure 2.11). Dans leur approche, les rotations

sont appliquées avec deux doigts, par l'aide d'un solveur de contraintes, décrit dans [RDH09], pour calculer la position de l'objet manipulé.



FIGURE 2.11: Z-technique de Martinet *et al.* Le doigt situé sur l'objet le déplace dans le plan de l'écran, tandis que celui en dehors permet de le déplacer en profondeur via des mouvements verticaux [Mar11].

Martinet *et al.* [MCG10a] ont ensuite comparé les techniques de Hancock *et al.* [HCC07, HtCC09] avec une nouvelle technique qu'ils ont introduite 3DS, qui s'appuie sur la séparation des degrés de liberté. Ils concluent de leur étude que la séparation des degrés de liberté améliore la facilité et les performances.

De la Rivière *et al.* [dIRKOD08] ont exploité la forme cubique du CubTile pour la manipulation d'objets 3D. Ils proposent d'effectuer des translations en déplaçant dans la même direction un doigt sur chacune de deux faces opposées. Pour les rotations, ils proposent de déplacer dans des directions opposées un doigt sur chacune de deux faces opposées ou d'effectuer des cercles dans le même sens de rotation (cf. Figure 2.12).

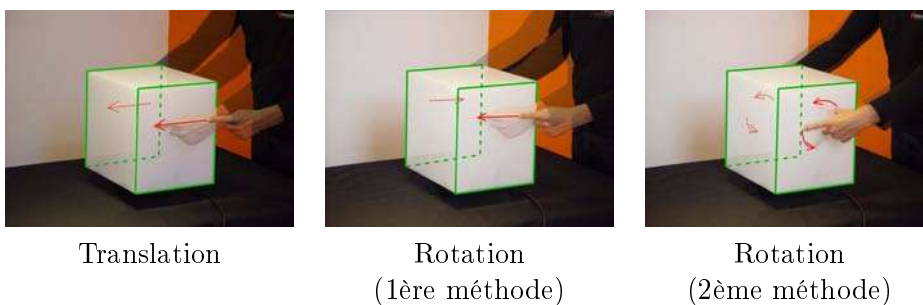


FIGURE 2.12: Techniques de manipulation via le CubTile de De La Rivière *et al.* [dIRKOD08].

Enfin, Kin *et al.* [KMB⁺11] ont développé un ensemble de gestes qui permet de lever l'ambiguïté sur la transformation souhaitée lors de la manipulation de l'objet 3D. Cela suggère alors à l'utilisateur d'apprendre un langage de gestes défini par les concepteurs (cf. Figure 2.13).

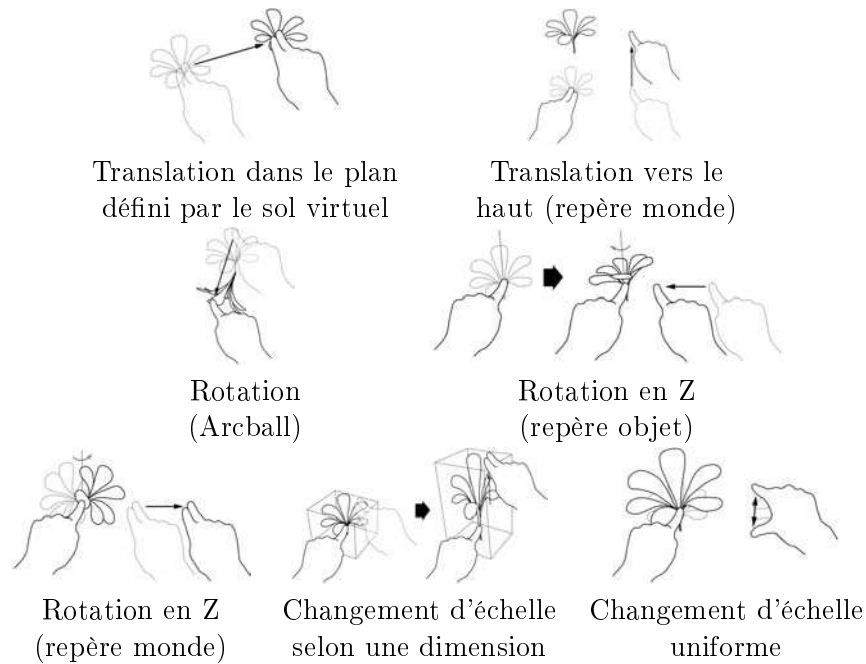


FIGURE 2.13: Langage de gestes de Kin *et al.* [KMB⁺11].

2.2.2 Autres interactions 3D

D'autres études portent également sur l'utilisation des surfaces tactiles pour des tâches 3D autres que la manipulation d'objets.

Par exemple, Kim *et al.* [KGMQ08] proposent de se déplacer dans un environnement virtuel en simulant une marche avec deux doigts sur une surface tactile. L'utilisateur peut donc effectuer des translations et des rotations du point de vue à l'aide de cette technique et contrôler la vitesse de déplacement en augmentant le rythme de la marche. Cette technique possède l'avantage de simuler un déplacement naturel, et requiert ainsi peu d'apprentissage.

De plus, quelques chercheurs se sont intéressés à l'utilisation des surfaces tactiles pour la déformation d'objets 3D. Gingold *et al.* [GDHZ06] proposent d'effectuer du positionnement et de la déformation de textures à partir d'entrées multipoints depuis un modèle 3D. L'utilisation des doigts de manière simultanée permet de manipuler plusieurs points de façon simultanée, et ainsi de définir des déformations complexes directement, plutôt qu'en plusieurs étapes. De même, Wilson *et al.* [WIH⁺08] proposent de manipuler et de déformer des objets 3D à partir de plusieurs points, et ce en simulant les forces physiques appliquées sur les objets virtuels, apportant ainsi du réalisme aux interactions 3D. Pour cela, ils utilisent des algorithmes permettant de calculer les interactions entre plusieurs objets physiques ou virtuels.

2.3 Bilan

L'interaction 3D se décompose en plusieurs parties : la sélection et la manipulation d'objets 3D, la navigation dans un environnement virtuel, ainsi que le contrôle du système. Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéresserons plus particulièrement à la manipulation d'objets 3D.

Les techniques les plus couramment utilisées se trouvent principalement dans les logiciels de modélisation, où les utilisateurs sont principalement des experts. Ainsi, l'efficacité de la technique est plus importante que la minimisation du temps d'apprentissage. De plus, ces outils ont été conçus pour une utilisation à la souris et requièrent une précision élevée, difficile à atteindre avec l'utilisation des doigts.

Quelques chercheurs se sont donc intéressés à la manipulation d'objets 3D via les surfaces tactiles. Certaines techniques proposées reposent sur le principe de colocalisation. Elles ont pour avantage d'offrir une plus grande rapidité de sélection, ainsi qu'une interaction plus « naturelle » du fait que l'objet reste sous les doigts, permettant ainsi un faible apprentissage. Cependant, ces travaux révèlent des ambiguïtés dans la manipulation, dû au fait que l'espace d'entrée est de dimension inférieure à l'espace de sortie. D'autres méthodes ont permis de lever ces ambiguïtés en associant un type de transformation à un geste donné. L'inconvénient est que ces langages ont été conçus par des concepteurs sans prendre en compte l'utilisateur, ceci imposant ainsi aux utilisateurs l'apprentissage de ces langages. Finalement, l'un des travaux s'intéressant à la manipulation 3D via des surfaces tactiles [DIRKOD08] propose une interface 3D afin d'éviter les problèmes liés à la différence du nombre de dimensions dans l'espace d'entrée et de sortie. Cependant, l'interface proposée cause des problèmes de fatigue pour une interaction de longue durée.

Aujourd'hui, l'interaction 3D est réservée aux experts. Pourtant, nous pensons qu'elle peut jouer un rôle majeur pour la communication entre les personnes (non experts en 3D). Nous souhaitons ouvrir la modélisation 3D à de nombreux utilisateurs non experts 3D. Cela pourrait par exemple permettre aux utilisateurs de transformer une idée qu'ils ont en tête en une scène 3D. Les écrans tactiles étant devenus communs et permettant de nouvelles interactions via l'utilisation de plusieurs points de contact, ils représentent une opportunité d'élargir les outils habituellement dédiés aux experts pour de nouveaux usages et de nouveaux contextes (par exemple, pour la mobilité et la communication). Ainsi, l'utilisateur étant un acteur majeur de l'interaction homme-machine, nous nous intéressons dans le chapitre suivant à l'étude du comportement des utilisateurs pour la manipulation d'objets via des écrans tactiles.

Deuxième partie

Comprendre l'utilisateur

Compréhension des gestes

Comme nous l'avons exposé dans l'état de l'art, diverses interfaces utilisateurs basées sur des gestes tactiles ont été proposées pour la manipulation d'objets 3D (cf. Section 2.2.1). Elles explorent diverses associations entre les gestes des doigts et les actions correspondantes dans l'environnement 3D. Cependant, ces interfaces ont été conçues sans étude formelle sur la façon dont les utilisateurs non-experts interagissent avec des objets 3D affichés sur écrans tactiles. En effet, les techniques d'interactions sur surfaces tactiles actuelles sont principalement inspirées de la méthode de manipulation usuelle à la souris : le glisser-déposer (*drag and drop* en anglais), méthode consistant à faire glisser l'objet manipulé jusqu'à sa position d'arrivée de manière colocalisée avec le curseur ou le système de pointage employé. De la même manière, les techniques existantes proposent généralement d'agir de manière colocalisée avec un ou plusieurs doigts. Nous pensons que les surfaces tactiles peuvent apporter de nouvelles façons d'interagir. L'avantage de la création de techniques d'interaction basés sur le comportement utilisateurs permet de favoriser la transparence de l'interface, c'est-à-dire de laisser les utilisateurs concentrés sur ce qu'ils souhaitent faire et non sur la façon d'interagir pour y parvenir.

Ainsi, nous explorons la façon dont les utilisateurs interagissent sur des objets 3D via un écran tactile sans technique imposée, de la même manière que certains travaux pour diverses tâches telles que des actions de contrôle standards via l'utilisation des doigts [WMW09] ou de la forme de la main [KLH08] sur surfaces tactiles. Nous nous intéressons plus particulièrement à la manipulation d'un cube, cet objet ayant pour avantage d'être simple, de représenter les trois axes d'un repère donné, et de correspondre à un objet de la vie réelle dont l'utilisateur connaît les propriétés physiques sur lesquels il peut s'appuyer pour interagir.

Dans un premier temps, nous nous intéressons au cas particulier des rotations via une utilisation monopoint. Dans un deuxième temps, nous étendons cette étude à une utilisation multipoints des rotations, translations et chan-

gements d'échelle. Puis, nous comparons ces gestes avec ceux effectués à la souris. Finalement, nous présentons une discussion générale sur la façon dont les utilisateurs interagissent avec un objet 3D et proposons un ensemble de pistes pour le design de futures interfaces.

3.1 Etude préliminaire

Dans une étude préliminaire, nous avons conduit une expérience afin de déterminer quels gestes effectuent les utilisateurs pour faire tourner un cube selon les trois axes de rotation du repère local de l'objet avec un doigt uniquement. Cette étude a pour but de déterminer des comportements non connus qui seraient dues à l'utilisation d'une surface tactile.

3.1.1 Protocole

Dans le cadre de notre expérimentation, nous avons divisé l'écran en deux parties. A gauche de l'écran, une vidéo montre un cube tournant selon l'un des trois axes du repère local de l'objet, et à droite, la première image de cette vidéo. Nous demandons ensuite au sujet d'effectuer le geste qui lui semble le plus approprié pour que le cube statique subisse la même rotation que celui de la vidéo (cf. figure 5.9).

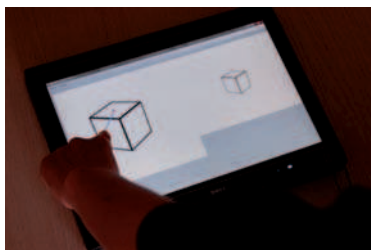


FIGURE 3.1: Dispositif utilisé dans l'étude des gestes « naturelles » pour la rotation d'un cube.

À la fin de chaque vidéo, nous demandons au sujet d'évaluer son degré d'accord avec les deux affirmations suivantes en utilisant des échelles de Likert, allant de 1, signifiant que l'utilisateur n'est pas du tout d'accord, à 7, signifiant que l'utilisateur est totalement d'accord :

- « Le geste que j'ai effectué est approprié pour effectuer la rotation demandée » (QT1),
- « Le geste était facile à effectuer » (QT2).

Chaque sujet a réalisé cette tâche sur trente vidéos correspondant aux trois rotations primaires dans les deux sens avec cinq points de vue différents. Cette étude a été réalisée sur dix sujets âgés de 22 à 50 ans (trois femmes et sept hommes) n'ayant pas d'expérience en modélisation 3D, afin d'éviter les gestes guidés par des habitudes.

3.1.2 Analyse des résultats

A partir des résultats obtenus (cf. Annexe A, Table A.1), nous observons que les gestes des utilisateurs s'appuient sur les arêtes qui apparaissent à l'intérieur de la projection 2D du cube, ce qui correspond à celles les plus proches de l'utilisateur. De plus, deux stratégies différentes ont été adoptées (cf. figure 3.2) :

- L'utilisateur effectue un geste suivant l'orientation 3D de la face touchée comme s'il attrapait le cube (stratégie de *Saisie* de l'objet),
- Il suit une direction tangente à la rotation, suivant l'arête ciblée, comme s'il poussait le cube (stratégie de *Poussée* de l'objet).

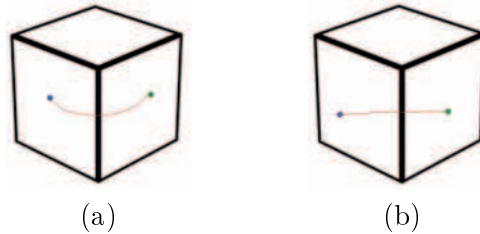


FIGURE 3.2: Trajectoires correspondant à la stratégie de *Saisie* (a) et à la stratégie de *Poussée* (b).

La première observation nous indique qu'il est préférable de traiter en priorité les arêtes apparaissant à l'intérieur de la projection 2D dans un algorithme de rotation. La deuxième observation nous permet de constater que les gestes sont basés sur des comportements physiques, comme nous l'attendions. Durant cette expérience, trois sujets ont utilisé la stratégie de *Saisie* uniquement, trois autres la stratégie de *Poussée* uniquement et quatre ont utilisé les deux selon le contexte. De plus, nous remarquons que les résultats obtenus à propos de la pertinence et de la facilité des gestes sont très élevés (entre 5.5 et 6.8), ce qui nous amène à penser qu'une approche basée sur les gestes pourrait être facilement comprise et utilisée.

3.1.3 Conclusion

Cette première analyse nous montre un comportement différent des utilisateurs par rapport aux méthodes d'interaction existantes créées par les concepteurs. Tandis que la stratégie de *Saisie* est similaire à l'existant, la stratégie de *Poussée* est singulière. Ainsi, nous nous intéressons à l'extension de cette étude pour tenter de déterminer d'autres comportements « naturels » suite à l'utilisation des surfaces tactiles pour la manipulations d'objets 3D.

3.2 Étude des gestes pour la manipulation d’objets 3D

Afin de déterminer les comportements « naturels » des utilisateurs pour la manipulation d’objets 3D, nous étendons l’étude précédente à l’utilisation multipoints des surfaces tactiles, et en élargissant le cadre des transformations en proposant des rotations, mais également des translations et des changements d’échelle.

3.2.1 Protocole expérimental

Matériel

L’environnement expérimental est composé d’une surface tactile TouchCo [RP09] de treize pouces, utilisée pour enregistrer les données d’entrée, et d’un vidéo-projecteur d’une résolution de 1280 par 800 pixels pour l’affichage (cf. Figure 3.3). La moitié de l’image est projetée sur toute la surface du TouchCo dans une zone d’interaction, et la seconde dans une zone de visualisation. Le projecteur est placée de façon perpendiculaire pour minimiser la distorsion de l’image.

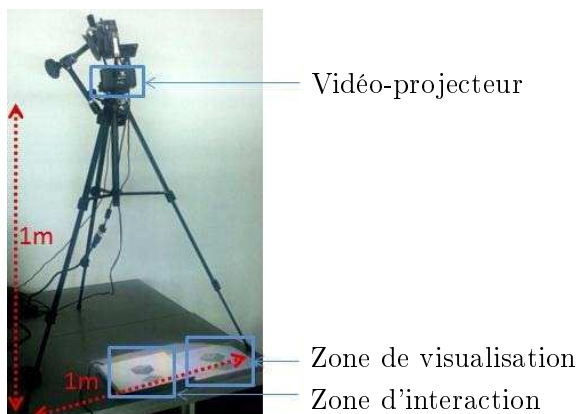


FIGURE 3.3: Dispositif expérimental.

Procédure

Pour procéder à l’expérimentation, nous avons mis en place la procédure suivante. Premièrement, nous invitons le participant à s’asseoir face à la zone d’interaction et à ajuster sa chaise. Ensuite, une vidéo de trois secondes montre une transformation sur un objet dans la zone de visualisation. Nous demandons alors à l’utilisateur d’effectuer un geste sur une image statique (la première image de la vidéo) affichée dans la zone d’interaction. Il est précisé à l’utilisateur qu’il doit effectuer le geste qui lui vient en premier à l’esprit pour la transformation donnée, et qu’il peut ainsi effectuer le même

geste pour des transformations différentes. Puis, l'utilisateur évalue son geste selon deux affirmations, similairement à [WMW09] :

- « Le geste que j'ai fait est pertinent compte tenu de la transformation souhaitée » (QT1),
- « Le geste que j'ai fait était facile à réaliser » (QT2).

Deux échelles de Likert à sept niveaux, allant de totalement en désaccord (1) à totalement d'accord (7) ont été utilisées pour évaluer ces affirmations. Ce procédé a été répété sur un ensemble de 27 vidéos, dans un ordre aléatoire. A la fin de l'expérience, nous avons interviewé chaque utilisateur pour obtenir des retours supplémentaires.

Les 27 vidéos correspondent à des transformations 3D (rotations, translations, changements d'échelle) sur un objet basique (un cube) suivant les trois axes du repère objet et pour trois points de vue, comme montré dans la Figure 3.4. Les rotations sont effectuées dans le sens trigonométrique avec un angle de 90° . Pour les changements d'échelle, le facteur d'échelle est de 150%. Les directions des translations sont les mêmes que ceux des axes de la Figure 3.4 et le déplacement est de deux fois la taille du cube. La taille minimale de la projection des arêtes sur l'écran est de 3.9 centimètres, permettant ainsi à l'utilisateur de sélectionner chaque élément sans hésiter et de manière distincte. Dans la scène 3D, la luminosité est créée par une lumière directionnelle localisée en haut de la scène et l'ombre de l'objet est projetée sur le sol, pour une meilleure perception du déplacement de l'objet. Par exemple, l'ombre aide à lever l'ambiguïté entre les translations et les changements d'échelle en profondeur. Notons que nous appelons *translation en profondeur* et *changement d'échelle en profondeur* les cas où la transformation est appliquée le long d'un axe aligné avec la direction de la vue, ce qui correspond ici aux transformations correspondantes selon l'axe z pour le point de vue (a). Des images statiques sont utilisées dans la zone d'interaction, et non des vidéos de la transformation, pour éviter que l'utilisateur ne choisisse un point d'ancrage sur l'objet et suive sa trajectoire tout au long de la transformation. Cela permet de concentrer l'étude sur la façon dont les utilisateurs contrôlent les entrées tactiles sans être influencés par les sorties.

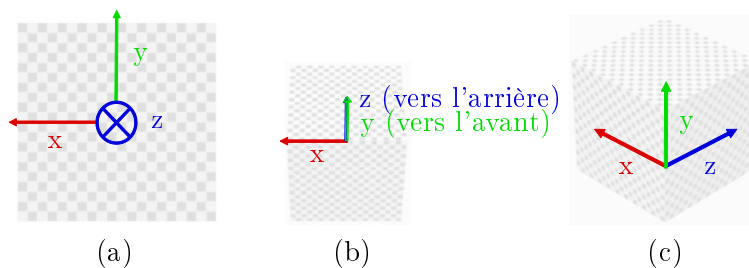


FIGURE 3.4: Points de vue utilisés pour l'expérience et repères objet correspondant.

Participants

Nous avons installé le système au musée scientifique Cap Sciences et avons demandé aux visiteurs s'ils souhaitaient participer à l'expérience. Seize sujets se sont portés volontaires, quatre hommes et douze femmes âgés de 19 à 60 ans (moyenne = 31.56, écart-type (σ) = 10.31). Chacun d'entre eux était droitier et tous avaient peu ou pas manipulé de surfaces tactiles ou des objets virtuels 3D auparavant. Nous avons choisi des utilisateurs novices pour limiter l'influence des gestes acquis lors de l'utilisation d'outils 3D. Les participants ont indiqué leur habitude des écrans tactiles avec une moyenne de 1.92 ($\sigma = 1.44$) et leur habitude de la 3D avec une moyenne de 1.37 ($\sigma = 0.68$), en utilisant une échelle de Likert à cinq niveaux allant de *jamais utilisé* (1) à *utilisé tous les jours* (5). Les participants venaient de divers horizons professionnels. Nous avons collecté 27 gestes par utilisateur, correspondant aux séquences de vidéos testées, ce qui représente 432 gestes au total. Onze d'entre eux ont été considérés comme erronés dû à des erreurs d'enregistrements liées à la sensibilité de la surface tactile.

3.2.2 Classification de gestes

Définition

Wobbrock *et al.* [WMW09] ont présenté une taxonomie pour les gestes appliqués sur surfaces tactiles dans un contexte 2D ou pour des actions de contrôles standards. Ils les ont classifiés en quatre paramètres : la *forme*, la *nature*, le *référentiel* et le *flux*. La *forme* indique si la position de la main et des doigts utilisés sont statiques ou en mouvement. La *nature* indique si le geste est symbolique, physique, métaphorique ou abstrait. Le *référentiel* indique si le geste est effectué par rapport à l'objet, par rapport au monde, totalement indépendant, ou ayant une dépendance mixte. Le *flux* spécifie si la réponse se produit après ou pendant que l'utilisateur interagit. Nous nous sommes inspirés de cette taxonomie pour étudier les gestes appliqués dans un contexte 3D. Comparé à Wobbrock *et al.* [WMW09], nous n'utilisons pas la même taxonomie car tous les gestes résultant de l'étude sont physiques, effectués par rapport à l'objet et continus. De plus, nous ne prenons pas en compte la forme de la main car nous voulons que nos résultats soient valides quelque soit la technologie tactile, incluant celles qui ne sont pas capables d'enregistrer le suivi d'un tel paramètre.

Ainsi, nous classifions les gestes selon les trois paramètres suivants : la *forme*, les *positions des points initiaux (PPIs)* et la *trajectoire* des doigts. La *forme* indique combien de doigts sont utilisés et si les entrées relatives sont statiques ou en mouvement. Les PPIs décrivent les positions des points initiaux par rapport au cube (sur un coin, sur une arête, sur une face ou extérieur au cube). Elles décrivent également la relation entre les éléments sélectionnés et la transformation appliquée. Par exemple, l'arête sélectionnée

est *orthogonale* à l'axe de la transformation (AT). Nous considérons une arête comme une PPI quand la distance entre le doigt et l'arête correspond à moins de la moitié de la taille moyenne du bout du doigt, ce qui correspond à neuf millimètres selon Dandekar *et al.* [DRS03]. La même distance est utilisée pour déterminer si une PPI est une arête ou une face. De plus, pour définir la position d'une face relativement à l'AT, nous utilisons le plan défini par la face comme référent. Quand une PPI est sur une face, nous considérons deux cas : la face est *orthogonale* ou *parallèle* à l'AT. La *trajectoire* définit si la trajectoire du doigt est colinéaire à la *direction de la transformation* (DT) et s'il y a une intersection entre la trajectoire et une arête du cube. La Figure 3.5 montre un exemple concret illustrant ces définitions.

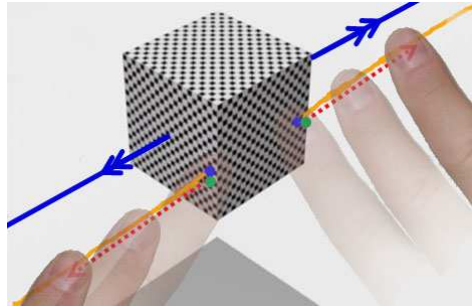


FIGURE 3.5: Exemple de changement d'échelle. La ligne bleue représente l'axe de transformation (AT), les flèches bleues la *direction de la transformation* (DT), les points verts la *position des points initiaux* ($PPIs$) et les flèches rouges la trajectoire. Dans cette exemple, la *forme* du geste correspond à *deux doigts en mouvement*, les $PPIs$ sont situées sur deux arêtes de la même face orthogonale à l'AT. De plus, la trajectoire du doigt est selon la DT .

Classification

Les résultats détaillés de cette classification sont présentés en annexe (cf. Annexe A, Table A.2). Les résultats révèlent que la grande majorité des gestes est appliquée avec un ou deux doigts en mouvement et sont appliqués dans la direction de la transformation. De plus, nous pouvons observer que les sujets ont tendance à sélectionner une face. Cette classification offre une vision globale des gestes appliqués par les participants. Nous nous concentrons sur la corrélation entre la *forme*, les $PPIs$ et la *trajectoire*, pour chacune des transformations.

Concernant les **rotations**, l'analyse des gestes des utilisateurs mène à l'émergence de dix catégories de gestes différentes, illustrées sur la Figure

3.6 (R1-R10) :

- Les gestes pour lesquels les trajectoires sont colinéaires aux DT (70.92%). Ces gestes sont arrondis :
 - R1 : La PPI est sur une face parallèle à l'AT (17.95%)
 - R2 : La PPI est sur une arête parallèle à l'AT (11.48%)
 - R3 : Les PPIs sont sur deux coins d'une arête (10.61%)
 - R4 : La PPI est extérieur au cube et la trajectoire intersecte le cube (10.05%)
 - R5 : La PPI est sur un coin (7.96%)
 - R6 : La PPI est sur une face orthogonale à l'AT (6.43%)
 - R7 : Les PPIs sont sur deux coins d'une diagonale d'une face orthogonale à l'AT (5.00%)
 - R8 : Les PPIs sont sur deux faces différentes, l'une orthogonale à l'AT et l'autre parallèle à celui-ci (1.43%)
- Les gestes pour lesquels la trajectoire n'est pas colinéaire à la DT (29.09%). Ces gestes sont droits. Les deux sous-catégories suivantes sont identifiables en observant plus particulièrement leur trajectoire :
 - R9 : les gestes qui sont tangents à un cercle centré sur l'AT correspondant à la rotation, au point d'intersection entre la trajectoire et une arête du cube orthogonale à l'AT (9.93%),
 - R10 : les gestes qui sont tangents à un cercle centré sur l'AT correspondant à la rotation, au point sélectionné (6.38%),

Tous les gestes peuvent être classés dans les catégories décrites ci-dessus. Notons que pour le cas des gestes droits, 12.77% des gestes peuvent se situer à la fois dans R9 et dans R10 du fait que la tangente au point sélectionné et la tangente au point d'intersection sont superposées.

11.27% des gestes sont composés d'un doigt statique et d'un doigt en mouvement. Pour les trois cas particuliers de transformations où l'AT est parallèle à l'écran, 19 gestes sur 46 ont été appliqués avec un geste droit avec une fin de trajectoire incurvée. Ces utilisateurs ont voulu distinguer la rotation de la translation quand la projection sur l'écran des cercles correspondant à la rotation sont droits. Tous les autres gestes sont droits dans ces cas.

Concernant **les changements d'échelle**, six catégories majeures, illustrées dans la Figure 3.7 apparaissent :

- S1 : Les PPIs sont sur une face parallèle à l'AT (36.57%)
- S2 : Les PPIs sont sur quatre coins d'une même face parallèle à l'AT (12.69%)
- S3 : Les PPIs sont sur une arête parallèle à l'AT (11.94%)
- S4 : Les PPIs sont sur deux faces, l'une orthogonale à l'AT et l'autre parallèle (10.45%)
- S5 : Les PPIs sont sur deux arêtes opposées orthogonales à l'AT et sur une même face parallèle à l'AT (8.21%)

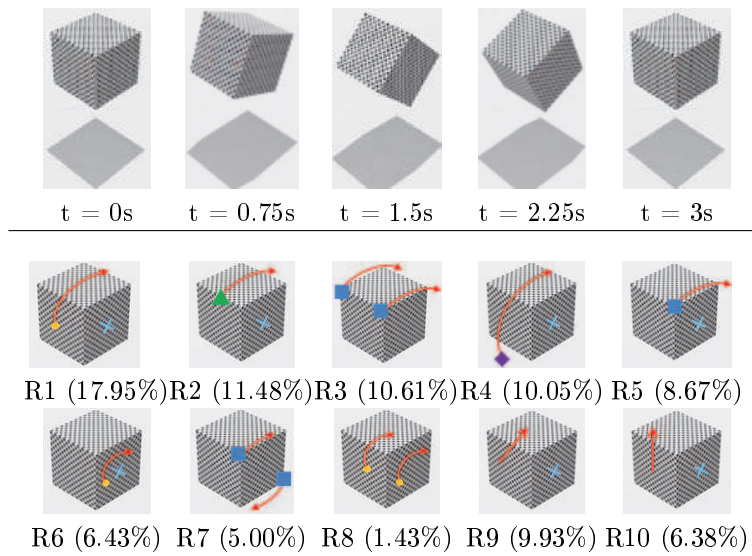


FIGURE 3.6: Catégories de gestes utilisées pour les rotations, représentées pour une transformation autour de l'axe x du point de vue (c). La première ligne illustre une séquence d'images de la transformation et la chronologie associée (t). La deuxième et la troisième lignes montrent les diverses catégories de gestes et leur taux d'utilisation. Les croix bleues indiquent l'utilisation optionnelle d'un doigt en position statique. Le triangles verts indiquent que la PPI est une arête, les points oranges une face, les carrés bleus un sommet et le losanges violets que la PPI est extérieure au cube.

– S6 : Les PPIs sont sur trois faces différentes (2.24%)

Notons que les gestes à deux doigts en mouvement correspondent à des gestes où les doigts restent groupés, et les deux chemins sont identiques par leur PPI et leur trajectoire (cf. Section 3.2.4). Ils représentent 96% des gestes. De plus, tous les gestes sont colinéaires à la DT, excepté ceux qui sont appliqués pour les changements d'échelle en profondeur. Ainsi, nous considérons seulement les PPIs pour détecter les catégories.

Excepté pour les changements d'échelle en profondeur, seulement quatre gestes n'appartiennent à aucune de ces catégories : un avait ses PPIs sur deux faces parallèles à l'AT, un sur trois coins, un sur une face orthogonale à l'AT et un autre en dehors du cube sans intersection avec le cube. Concernant le cas particulier du changement d'échelle en profondeur, tous les sujets sauf un ont appliqué un geste de pincements et ont reporté qu'ils l'assimilaient à la fonctionnalité de zoom pour les images 2D. Il est intéressant de remarquer que 78.16% des gestes ont été appliqués sur une face, des coins ou des arêtes appartenant à une face parallèle à l'AT.

Concernant les **translations**, cinq catégories émergent (cf. Figure 3.7) :

- T1 : La PPI est sur une face parallèle à l'AT et la trajectoire est colinéaire à la DT (34.04%)
- T2 : La PPI est sur une face orthogonale à l'AT et la trajectoire est colinéaire à la DT (28.38%)
- T3 : La PPI est extérieure au cube et la trajectoire est colinéaire à la DT et intersecte le cube (15.65%)
- T4 : La PPI est sur une arête parallèle à l'AT et la trajectoire est colinéaire à la DT (5.67%)
- T5 : La PPI est extérieure au cube et la trajectoire est colinéaire à la DT et n'intersecte pas le cube (4.96%)

De façon similaire aux changements d'échelle, les gestes à deux doigts en mouvement correspondent à des gestes où les doigts restent groupés (cf. Figure 3.11). Nous considérons que les gestes effectués avec un doigt en position statique pour la translation en profondeur correspondent à des gestes qui suivent la direction de la transformation, du fait que la projection de cette dernière correspond à un point. 11.37% des gestes ne sont pas classifiés dans ces cinq classes : un geste seulement a été effectué à l'aide de quatre doigts, deux seulement se sont appuyés sur les coins et les treize autres gestes sont des gestes singuliers effectués dans le cadre de la translation en profondeur.

En effet, un nombre important de gestes différents a été effectué pour ce cas particulier. Un utilisateur a créé son propre geste en effectuant un geste à deux doigts de l'extérieur du cube vers le centre de celui-ci, deux d'entre eux ont utilisé un doigt statique sur la face, quatre d'entre eux ont utilisé des gestes de pincements et les autres ont appliqué un geste du bas vers le haut.

3.2.3 Stratégies

Présentation

Nous définissons les stratégies comme une interprétation des modèles mentaux sur lesquels les utilisateurs basent leurs gestes. Cette interprétation vient d'observations, ainsi que des interviews des participants. Dans l'étude préliminaire (cf. Section 3.1), nous avons détecté deux stratégies différentes pour faire tourner un cube avec un doigt :

- Poussée : l'utilisateur sélectionne un point d'une face du cube et suit un chemin, ayant en tête que la projection 3D du point sélectionné reste sous son doigt.
- Saisie : l'utilisateur suit une trajectoire qui est tangente à la rotation souhaitée au point où la trajectoire entre en collision avec la projection d'une arête, comme s'il poussait le cube depuis cette arête.

Nous souhaitons généraliser les résultats précédents avec une analyse en profondeur des stratégies des utilisateurs pour les rotations, ainsi que pour les

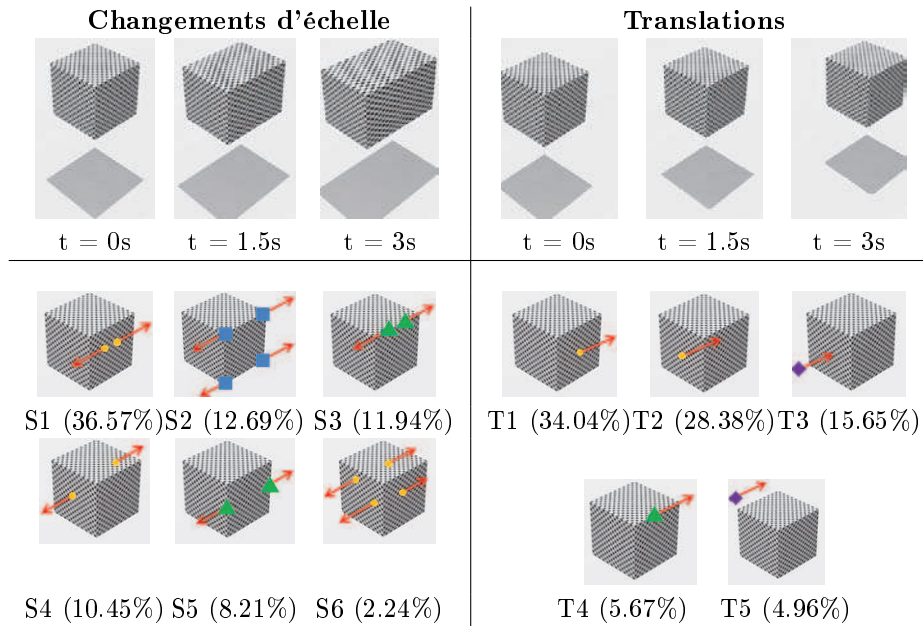


FIGURE 3.7: Catégories de gestes utilisées pour les changements d'échelle (S1 à S6, figures de gauche) et les translations (T1 à T5, figures de droite), représentées pour une transformation autour de l'axe z du point de vue (c). Les mêmes codes couleurs que la figure précédente sont employés.

changements d'échelle et les translations. Notons qu'aucun utilisateur n'a essayé d'utiliser une méthode d'interaction existante, telle que la *trackball virtuelle* [CMS88], probablement parce que tous les participants étaient des utilisateurs novices en applications 3D.

Catégories de gestes

Dans cette section, nous comparons les stratégies basées sur les scores de pertinence (QT1) et de facilité (QT2). Pour chaque comparaison, nous utilisons des tests du Khi-deux (χ^2) avec deux variables : les stratégies et les scores (bas ou élevés). Pour les scores, nous considérons comme bas les scores inférieurs à la médiane de l'ensemble des scores pour le paramètre considéré (pertinence ou facilité) et comme élevés ceux qui sont supérieurs à cette médiane. Dans les cas où le nombre de participants dans une cellule de la table de contingence est inférieur à cinq, nous utilisons le test de probabilité de Fisher (pF). De plus, un test de correction de Bonferroni a été appliqué dès que plus de deux stratégies sont concernées, pour les comparer deux à deux.

Concernant les **rotations**, les stratégies décrites dans la Section 3.1 peuvent être identifiées dans cette expérience. R1 est similaire à la stra-

tégie de *Saisie* et R9 à la stratégie de *Poussée*. Pour les deux, des propriétés additionnelles liées aux caractéristiques de la trajectoire peuvent être identifiées :

- ***Courbé*** : la trajectoire du geste est courbe. L'utilisateur suit la trajectoire du point sélectionné ou du point d'intersection entre la trajectoire du doigt et le cube.
- ***Droit*** : La trajectoire est droite. L'utilisateur touche le cube et lance l'objet. Ainsi, la trajectoire est tangente au point sélectionné pour la stratégie de *Saisie* ou tangente au point d'intersection entre la trajectoire du doigt et une arête du cube pour la stratégie de *Poussée*.

Par conséquent, nous redéfinissons les stratégies de *Saisie* et de *Poussée* comme suit :

- ***Saisie*** : L'utilisateur sélectionne un point sur la surface du cube et le déplace ensuite.
- ***Poussée*** : L'utilisateur commence son geste et l'objet se déplace après avoir été poussé, c'est-à-dire quand la trajectoire intersecte une arête orthogonale à l'AT.

De plus, pour tous les gestes appliqués avec un doigt statique et un doigt en mouvement, les utilisateurs indiquent l'AT avec le doigt statique et applique un mouvement avec le deuxième doigt, comme ils l'ont reporté dans les interviews. Nous appelons cette stratégie ***Avec Axe***.

Chaque catégorie de gestes peut être classifiée avec les stratégies décrites ci-dessus, et sont illustrées sur la Figure 3.8. R4 peut être associée à *CourbéEtSaisie*, R9 à *DroitEtPoussée*, R10 à *DroitEtSaisie* et les autres à *Courbé*. R1, R2, R4, R5, R6, R9 et R10 peuvent également être assimilées à la stratégie *Avec Axe* pour les gestes appliqués avec un doigt statique et un doigt en mouvement. Tous les gestes ayant une PPI sur le cube, et une trajectoire intersectant une arête du cube, sont soit des stratégies de *Saisie*, soit de *Poussée*, comme reporté dans les interviews des utilisateurs. Dans ces cas, il n'est pas possible de clairement identifier quelle stratégie est impliquée, comme la projection 3D du point initialement sélectionné peut être sur le cube (*Saisie*) ou non (*Poussée*). Cette ambiguïté, liée à l'aspect statique des images, se produit sur 54.23% des gestes.

La table 3.1 montre les résultats quantitatifs pour chaque stratégie. *CourbéEtSaisie* est la stratégie la plus utilisée. Nous supposons que ceci est dû aux habitudes avec l'interaction souris, où des paradigmes similaires sont utilisés. Toutes les autres techniques sont inhabituelles à la souris, telle que *Avec Axe*, où deux actions sont requises (un doigt définit l'axe et un autre effectue la transformation), or le caractère multipoint des surfaces tactiles permet aux utilisateurs de faire les deux à la fois. L'utilisation de la stratégie de *Poussée* peut être expliquée par la nature du geste, qui s'appuie sur des actions de la vie réelle. Les scores élevés pour la pertinence indiquent que les utilisateurs ont appliqué ces gestes avec confiance. De plus, les utilisateurs ont plus confiance avec la stratégie de *Poussée* qu'avec celle de *Saisie*

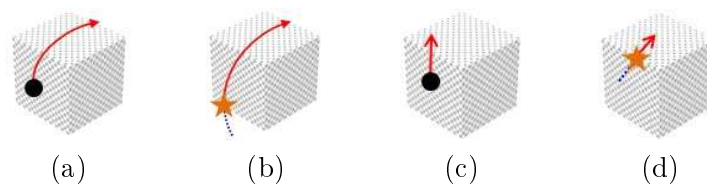


FIGURE 3.8: Stratégies pour les rotations : *CourbéEtSaisie* (a), *CourbéEtPoussée* (b), *DroitEtSaisie* (c) et *DroitEtPoussée* (d). Les lignes bleues en pointillés indiquent les cas où le doigt se déplace alors que le cube reste statique et les lignes rouges les cas où les deux se déplacent. Les étoiles indiquent les points d'impact entre le doigt et l'objet et les points noirs les cas où l'utilisateur sélectionne un point de l'objet.

($\chi^2 = 5.15, p < 0.05$). Les scores pour la facilité révèlent que les gestes reposant sur la stratégie *Droit* ont été perçus comme plus faciles à appliquer que ceux reposant sur *Courbé* ($\chi^2 = 3.9, p < 0.05$). Notons que nous n'avons pas trouvé de corrélation significative entre la pertinence et l'utilisation ou non de la stratégie *Avec Axe*.

Stratégies	%	Pertinence (QT1)		Facilité (QT2)	
		moyenne	σ	moyenne	σ
CourbéEtSaisie	43.08	5.36	1.16	5.72	1.32
DroitEtPoussée	21.54	5.29	1.82	6.36	1.08
CourbéEtPoussée	20.00	6.15	0.90	5.85	1.21
DroitEtSaisie	15.38	6.1	0.99	6.6	0.70
Courbé	70.92	5.56	1.17	5.76	1.17
Droit	29.09	5.64	1.53	6.33	0.90
Saisie	58.46	5.55	1.16	5.84	1.26
Poussée	41.54	5.70	1.49	6.11	1.15
Sans Axe	88.73	5.56	1.28	5.87	1.10
Avec Axe	11.27	5.81	1.28	6.19	1.33

TABLE 3.1: Taux d'utilisation et moyennes des scores de pertinence et de facilité pour chaque stratégie de rotation. Pour chaque stratégie impliquant les stratégies de *Saisie* ou de *Poussée*, les pourcentages sont exprimés pour les gestes où il n'y pas d'ambiguïtés entre l'utilisation de l'une ou l'autre d'entre elles, soit pour 45.77% des gestes.

Pour la plupart des opérations de **changements d'échelle**, trois stratégies sont identifiables :

- *Une partie* : L'utilisateur change l'échelle d'une partie du cube sur

une face qui change de taille.

- **Extrémités** : L'utilisateur change l'échelle du cube en utilisant les arêtes opposées d'une face qui change de taille.
- **Double saisie** : L'utilisateur sélectionne deux points de différents éléments du cube.

Pour l'ensemble de ces stratégies, les utilisateurs réalisent un geste à deux ou quatre doigts, une moitié des doigts allant dans une des deux directions du changement d'échelle et l'autre moitié allant dans la deuxième direction. La majorité des utilisateurs ont appliqué des métaphores 2D, telles que celles utilisées pour les applications standards de smartphones. S1 et S3 sont incluses dans la stratégie *Une partie*, S2 et S5 dans *Extrémités*, et S4 et S6 dans *Double saisie*.

La table 3.2 montre les résultats statistiques pour chaque stratégie. La grande majorité des gestes s'appuie sur la stratégie *Une partie*. Nous supposons que cette technique favorise une sélection facile, comparé à *Extrémités*, qui requièrent une sélection précise. Cette hypothèse est renforcée par les résultats de la question QT2 sur la facilité. Contrairement à *Double saisie*, les stratégies *Une partie* et *Extrémités* sont réalisées sur une seule face du cube. Les scores élevés pour la pertinence et la facilité indiquent que les utilisateurs ont effectué ces gestes avec confiance et sans difficultés.

Stratégies	%	Pertinence (QT1)		Facilité (QT2)	
		moyenne	σ	moyenne	σ
Une partie	48.51	6.13	0.82	6.16	0.99
Extrémités	20.90	6.15	0.86	5.78	1.50
Double saisie	12.69	6.00	0.79	6.18	0.73
Autres	17.90	5.21	1.44	4.88	1.48

TABLE 3.2: Taux d'utilisation et moyennes des scores pour la pertinence et la facilité des gestes effectués pour chaque stratégie de changement d'échelle.

Concernant les **translations**, nous observons trois stratégies (cf. Figure 3.9) :

- **Poussée** : le geste débute en dehors du cube et continue jusqu'à l'objet, pour le pousser.
- **Sans référent à l'objet** : Le geste débute en dehors du cube, sa trajectoire est droite et colinéaire à la direction de la transformation, sans intersection avec le cube.
- **Saisie** : L'utilisateur sélectionne un point du cube et suit la trajectoire de la translation. Ceci inclut trois sous-stratégies selon la position du point sélectionné :
 - **Latéral** : L'utilisateur attrape le cube via une face latérale,

- **Tirer** : L'utilisateur tire le cube via une face tirée,
- **Pousser** : L'utilisateur pousse le cube via une face poussée.

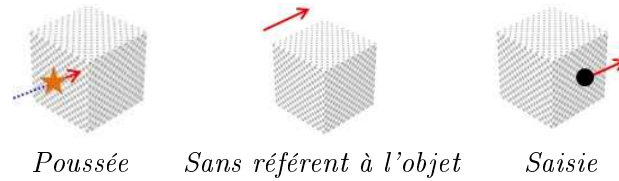


FIGURE 3.9: Stratégies pour les translations. Les lignes bleues en pointillés indiquent les cas où le doigt se déplace alors que le cube reste statique et les lignes rouges les cas où les deux se déplacent. L'étoile indique le point d'impact entre le doigt et l'objet et le point noir indique le fait que l'utilisateur sélectionne un point de l'objet.

T3 est incluse dans la stratégie de *Poussée*, T1 et T5 dans *SaisieLatéral*, T4 dans *Sans référent à l'objet* et T2 dans *SaisieEtPousser* ou *SaisieEtTirer* selon la face sélectionnée. Excepté les gestes effectués dans le cas de la translation en profondeur, seulement un geste est en dehors des catégories définies pour les translations. Ce geste a été effectué vers le bas pour déplacer le cube vers le haut (vue de face). Le sujet qui a réalisé ce geste a indiqué qu'il voulait faire rebondir le cube. De manière similaire aux principales stratégies, ce comportement repose sur une stratégie applicable dans la vie réelle.

La table 3.3 montre les résultats statistiques sur ces stratégies. Nous nommons *Autres*, la catégorie représentant tous les gestes ne correspondant pas aux stratégies définies ci-dessus. Les scores de pertinence dépendent de la stratégie ($\chi^2 = 18.50, p < 0.005$). La stratégie *Sans référent à l'objet* est perçue comme moins pertinente que *SaisieLatéral* ($pF < 0.05$) et *SaisieEtPousser* ($pF < 0.01$). Les gestes *Autres* sont moins pertinents que ceux reposant sur *SaisieEtPousser* ($pF < 0.01$) et *Poussée* ($pF < 0.005$). De manière similaire aux rotations, les stratégies de *Saisie* sont plus utilisées que les autres stratégies et, comme précédemment, nous supposons que ce résultat vient du fait qu'elles s'appuient sur des habitudes d'interaction à la souris. De manière intéressante, les scores de pertinence et de facilité pour la stratégie *Poussée* sont plus élevés que pour les stratégies de *Saisie*. Nous suggérons que cette observation pourrait être dû au fait que les stratégies de *Saisie* requièrent des sélections plus précises.

Analyse plus approfondie de l'emploi des stratégies

Plusieurs stratégies sont utilisées pour chaque type de transformation (rotations, changements d'échelle ou translations). La Figure 3.10 montre la répartition de la stratégie la plus appliquée pour chaque utilisateur. L'analyse de cette répartition montre que la majorité des participants a tendance à

Stratégies	%	Pertinence (QT1)		Facilité (QT2)	
		moyenne	σ	moyenne	σ
Poussée	15.60	6.24	1.04	6.43	0.68
Sans réf obj.*	4.96	4.86	1.07	5.29	0.49
SaisieLatéral	40.42	5.92	0.96	6.17	0.82
SaisieEtTirer	3.55	5.80	1.30	6.00	1.00
SaisieEtPoussée	24.82	6.11	0.76	6.17	0.86
Autres	10.56	5.07	1.83	5.67	1.40

TABLE 3.3: Taux d'utilisation et moyennes des scores pour la pertinence et la facilité pour chaque stratégie de translation. (* Sans référent à l'objet)

utiliser une stratégie prédominante pour tous leurs gestes pour un même type de transformation. Cependant, l'utilisation est strictement inférieure à 100% pour la plupart des cas, indiquant ainsi que les participants ont utilisé plusieurs stratégies. Nous avons également constaté que chaque stratégie a été appliquée par au moins la moitié des participants, exceptées *Avec Axe* pour les rotations, *Extrémités* et *Double saisie* pour les changements d'échelle et *Sans référent à l'objet* pour les translations.

De plus, aucun effet du point de vue sur la stratégie appliquée n'a été trouvé pour les rotations, que ce soit avec les stratégies de *Saisie* et de *Poussée* ($\chi^2 = 0.40, p > 0.8$) ou avec la stratégie *Avec Axe* ($\chi^2 = 0.21, p > 0.90$). Il en est de même pour les changements d'échelle ($\chi^2 = 0.08, p > 0.90$) et les translations ($\chi^2 = 0.43, p > 0.8$). Pour les stratégies *Courbé* et *Droit* sur les rotations, les tests post-hoc n'ont pas révélé de différence non plus.

3.2.4 Comportements communs

Analyses individuelles de paramètres

Dans la section précédente, nous avons analysé chaque geste dans son ensemble. Dans la suite, nous nous concentrons sur trois paramètres du geste, que nous analysons indépendamment.

Dans un premier temps, nous analysons, **les trajectoires pour chaque type de transformation**. Un point majeur dans une technique d'interaction est de détecter *a priori* la transformation que l'utilisateur a l'intention d'appliquer. Les changements d'échelle sont faciles à différencier des translations et des rotations, du fait que ces transformations sont appliquées avec deux ou quatre doigts dans des directions opposées. La principale différence observée entre les translations et les rotations est la trajectoire du geste. La plupart des rotations sont circulaires (72.54%), alors que les gestes pour les translations sont droits (98.92%). Cependant, certains gestes de rotations sont droits (27.46%) et certains gestes semblent être droits au début et sont

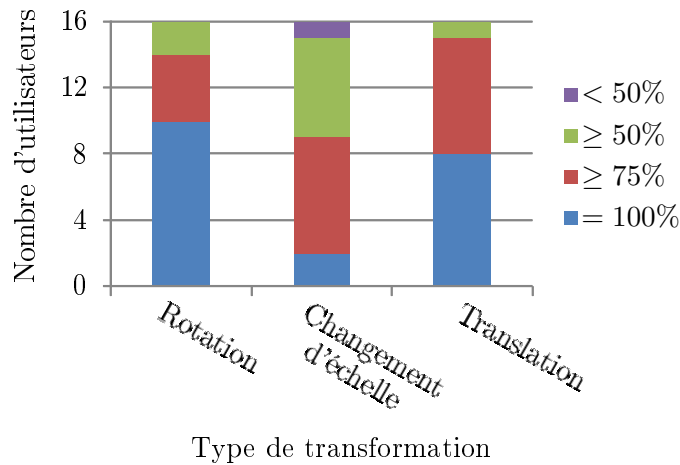


FIGURE 3.10: Taux d'utilisation de la stratégie la plus utilisée pour chaque participant. 100% (en bleu) signifie qu'un participant a toujours utilisé la même stratégie, $\geq 75\%$ (en rouge) signifie qu'il a utilisé une même stratégie sur au moins 75% de ses gestes, *etc.*

incurvés à la fin, car la projection du cercle définissant la rotation est elliptique. Ainsi, la détection de ce que l'utilisateur veut faire au début du geste en temps réel peut être difficile à réaliser. Néanmoins, certains stratégies différent pour les translations et les rotations (*Sans référent à l'objet* et *Avec Axe*). Pour *Avec Axe*, nous pouvons détecter *a priori* que l'utilisateur souhaite appliquer une rotation par la position des deux doigts. Pour *Sans référent à l'objet*, nous ne pouvons pas détecter la transformation *a priori* car l'action peut être le début de la stratégie *Poussée*. Cependant, il est possible de le détecter *a posteriori* si la trajectoire du doigt n'intersecte par le cube.

Dans un deuxième temps, nous nous intéressons à la **localisation des gestes**. 92.5% des gestes pour les rotations suivent un cercle virtuel correspondant à la rotation relative. De la même manière, 84.18% des gestes pour les changements d'échelle sont centrés à proximité de l'axe de transformation et 91% pour les translations. Ainsi, nous pouvons détecter si un geste est une translation ou une rotations en observant si le geste est à proximité de l'axe de translation ou du cercle de rotation, et vice-versa. Cependant, ceci ne clarifie pas les cas où le cercle de rotation et l'axe de translation sont superposés (par exemple, pour la rotation autour de l'axe x et la translation le long de l'axe y avec le point de vue (b) de la Figure 3.4).

Pour finir, nous remarquons que les participants n'ont pas toujours utilisé le **nombre de doigts** minimal requis pour une stratégie donnée (par exemple les gestes avec des doigts groupés où les doigts ont les même rôles, c'est-à-dire même forme, même PPI et même trajectoire). 21.21% des gestes sont

réalisés avec au moins deux doigts qui ont le même rôle. Notons que ceci n'est pas vrai ni pour une transformation spécifique (taux de gestes composés de doigts avec des rôles similaires : 17.04% des gestes pour les rotations, 23.50% pour les changements d'échelle et 26.98% pour les translations), ni pour un petit nombre d'utilisateurs (9/16 participants ont réalisé de tels gestes).

Ensemble centré utilisateurs basé sur les trajectoires

La définition d'un ensemble de geste qui correspondrait avec un grand nombre d'utilisateurs, requière l'identification d'un comportement commun largement partagé. Nous avons analysé si la trajectoire des gestes peut être utilisée dans ce but. Notons que si plusieurs doigts ont la même trajectoire, seulement un de ces doigts est considéré (cf. Figure 3.11).

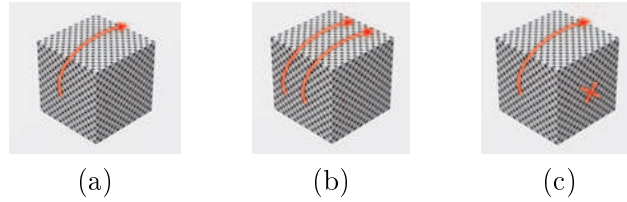


FIGURE 3.11: Illustrations des trajectoires prises en compte. Pour (b) et (c), les gestes contiennent une unique trajectoire impliquant le déplacement de l'objet, cette trajectoire est la même que (a). Ainsi, nous considérons les trajectoires (b) et (c) équivalentes à (a).

Comportement commun Le degré d'accord entre les utilisateurs sur les trajectoires pour chaque vidéo est évalué en utilisant la formule introduite par Wobbrock *et al.* [WARM05]. Nous avons simplifié cette formule du fait que nous avons considéré une transformation donnée, et non un ensemble de transformation. Ainsi, le degré d'accord entre les utilisateurs est donné par :

$$\sum_{P_i \subseteq P_r} \left(\frac{|P_i|}{|P_r|} \right)^2$$

Dans notre analyse, r est une transformation, P_r est l'ensemble des trajectoires proposées pour la transformation r , et P_i est un sous-ensemble de trajectoires identiques de P_r . L'intervalle pour le degré d'accord est $[|P_r|^{-1}, 1]$. Par exemple, pour la rotation autour de l'axe x du point de vue (a) de la Figure 3.4, six utilisateurs ont dessiné la même trajectoire, et dix en ont appliqué une autre. Le degré d'accord pour la vidéo correspondante est donc $(6/16)^2 + (10/16)^2 = 0.53$. Pour l'ensemble des gestes, le degré d'accord sur les trajectoires est élevé : 20 trajectoires ont un degré d'accord plus élevé que 0.7 (*moyenne* = 0.95, $\sigma = 0.09$), six trajectoires entre 0.5 et 0.7

(*moyenne* = 0.56, σ = 0.07) et un degré d'accord est égal à 0.4 et correspond à la translation en profondeur pour le cube vu de face. Ces résultats indiquent qu'une technique d'interaction basée sur les trajectoires pourrait être utilisée. Un avantage majeur d'une telle technique est la prise en compte de la plupart des gestes réalisés « *naturellement* » par les utilisateurs, sans qu'ils aient besoin d'apprendre un langage arbitraire.

Ambiguïtés Nous considérons que deux trajectoires sont en conflit si elles sont similaires pour deux transformations différentes avec le même point de vue. Par exemple, pour le point de vue (b) de la Figure 3.4, la trajectoire allant de bas en haut engendre quatre conflits, cette dernière étant utilisée pour la rotation autour de l'axe x , pour le changement d'échelle le long de l'axe y et pour les translations le long des axes y et z . Dans notre expérience, 16 trajectoires sont en conflit : neuf pour le point de vue (a) de la Figure 3.4 et six pour le point de vue (b). Notons que plus il y a de faces visibles, moins il y a de conflits dans les trajectoires ($\chi^2 = 58.5, p < 0.0001$). La couverture maximale de l'ensemble des trajectoires sans qu'il n'y ait d'ambiguïtés est égale à 83.57% de l'ensemble des gestes. L'ensemble des trajectoires, le degré d'accord entre elles pour chaque geste, ainsi que les ambiguïtés sont exposés en annexe (cf. Annexe A, Table A.3).

3.3 Comparaison avec les gestes à la souris

3.3.1 Protocole expérimental

Suite à ces résultats, nous avons conduit une seconde expérience afin de comparer les gestes effectués via une surface tactile avec ceux effectués via une souris. Le but est de comprendre comment les utilisateurs tendent à interagir avec une souris afin de manipuler des objets 3D, et de répondre aux questions suivantes :

- Les gestes de manipulation d'un objet 3D sont-ils les mêmes avec la souris et avec une surface tactile ? (QM3.1)
- Les utilisateurs préfèrent-ils l'écran tactile ou la souris pour les transformations proposées ? (QM3.2)

Le même équipement a été utilisé afin d'éviter des modifications de comportements dues à la différence entre les deux équipements. La surface tactile a simplement été retirée et remplacée par une souris à molette avec deux boutons. Les mêmes vidéos que celles de la première expérience ont été utilisées et le même protocole a été appliqué. Nous avons expliqué aux utilisateurs qu'ils pouvaient utiliser la molette dans les deux directions, cliquer sur un bouton ou plusieurs en même temps et que s'ils souhaitaient effectuer une action avec déplacement, alors ils devaient maintenir au moins un bouton tout au long de l'action.

L'expérimentation s'est également tenue à Cap Sciences. Dix sujets (trois femmes et sept hommes) âgés de 24 à 64 ans (*moyenne* = 44.10, σ = 11.29) ont accepté de participer à cette étude. L'expérience a duré une quinzaine de minutes pour chaque participant. Chacun d'entre eux n'avait pas ou peu utilisé d'environnements 3D et tous avaient l'habitude de la souris. Tout comme dans la première expérience, les participants provenaient de divers horizons professionnels.

3.3.2 Analyse des dimensions de la taxonomie

Définition de la taxonomie

Nous avons tout d'abord analysé les gestes effectués avec la souris dans le but de les définir à partir de la taxonomie introduite pour ceux effectués avec la surface tactile (cf. Annexe A, Table A.4). Ainsi, de la même manière que précédemment, nous considérons un élément comme la PPI quand sa distance par rapport au curseur est inférieure à la moitié de la taille du doigt moyen. En outre, nous avons ajouté une dimension décrivant l'utilisation des boutons. Nous avons observé que la plus grande majorité des gestes a été appliquée en maintenant le bouton gauche seulement pour tous les types de transformation, et que la molette a souvent été utilisée pour les opérations de changements d'échelle. De plus, nous avons constaté que la trajectoire correspond à un segment suivant la DT pour les translations et les rotations, et à un segment selon l'une des deux directions du changement d'échelle ou à deux segments correspondant à ces deux directions pour les opérations de changements d'échelle. Notons que la forme peut être composée de plusieurs mouvements étant donné que le geste peut être effectué en plusieurs étapes : l'utilisateur peut maintenir un bouton lors d'un déplacement de la souris, puis refaire de même, ainsi la suite des deux gestes sera considérée comme le geste résultant pour l'action considérée.

Influence du type de transformation

Dans le but de mieux comprendre le comportement des utilisateurs par rapport à la souris, nous avons analysé la corrélation entre chaque dimension de la taxonomie et les différents types de transformation.

Pour la dimension concernant l'utilisation des boutons, les types de transformations n'ont pas eu d'impact significatif sur le choix du bouton. Tandis que le bouton gauche est utilisé pour la plupart des gestes, les interviews révèlent que les participants ne se sont pas souciés du bouton qu'ils ont utilisé. Cependant, le type de transformation a une influence sur l'utilisation de la molette ($\chi^2 = 21.74$, $p < 0.0001$). En effet, elle est plus utilisée pour les opérations de changements d'échelle que pour les translations ($pF < 0.001$) et les rotations ($pF < 0.05$). En particulier, les participants qui ont utilisé

la molette pour les opérations de changements d'échelle ont indiqué qu'ils associaient cette action avec la fonctionnalité de zoom.

De plus, les types de transformation affectent la *forme* ($\chi^2 = 73.29$, $p < 0.0001$). En effet, les gestes à un mouvement ont plus été employés que ceux à plusieurs mouvements pour les translations ($pF < 0.001$) et les rotations ($pF < 0.001$) que pour les changements d'échelle, et ce du fait que plusieurs participants ont effectué des gestes composés de deux mouvements représentant les deux directions de la DT pour les changements d'échelle. D'autre part, d'autres participants ont utilisé seulement un mouvement pour représenter l'une de ces deux directions uniquement, mais ceux-ci ont reporté qu'ils ont ressenti un sentiment de frustration de ne pas indiquer les deux directions.

Aucun lien n'a été trouvé entre les types de transformations et les *PPIs*. Cependant, les types de transformations affectent la direction des gestes ($\chi^2 = 148$, $p < 0.0001$), c'est-à-dire si le geste est effectué selon la DT ou non d'une part, et s'il y a intersection ou non avec l'objet ($\chi^2 = 11.60$, $p < 0.01$) d'autre part.

Ces résultats indiquent que les boutons, les formes et les trajectoires des gestes à la souris diffèrent pour les changements d'échelle comparé aux deux autres types de transformations. Cependant, les translations et les rotations nécessitent une analyse plus approfondie pour les distinguer les unes des autres.

Comparaisons avec les gestes sur surfaces tactiles

Selon les résultats, le périphérique affecte le nombre de mouvements dans le geste global ($\chi^2 = 85.85$, $p < 0.0001$), la nature du point sélectionné ($\chi^2 = 48.73$, $p < 0.0001$), la relation entre le geste et la DT ($\chi^2 = 85.85$, $p < 0.0001$), ainsi que celle entre le point sélectionné et l'AT ($\chi^2 = 20.98$, $p < 0.0001$). Cependant, aucun effet du périphérique n'a été trouvé concernant l'intersection de la trajectoire du geste avec l'objet.

Concernant la *forme*, les gestes composés de plusieurs mouvements sont moins utilisés avec la souris qu'avec l'écran tactile, ces gestes semblant plus naturels à effectuer avec un écran tactile du fait qu'il peuvent être appliqués en une fois, contrairement à la souris.

Concernant les *PPIs*, nous observons que la proportion de faces sélectionnées par rapport aux arêtes est plus importante avec l'écran tactile qu'avec la souris ($pF < 0.01$). De plus, la proportion de gestes dont les PPIs sont extérieures au cube ou n'existant pas par rapport à ceux dont les PPIs correspondent aux faces ($pF < 0.05$) ou aux arêtes ($pF < 0.05$) est plus importante avec l'écran tactile qu'avec la souris. Les mêmes résultats ont été trouvés concernant les sommets, qui sont plus utilisés avec l'écran tactile qu'avec la souris ($pF < 0.001$). Le fait qu'il y ait moins de gestes dont les

PPIs sont extérieures au cube avec la souris, indiquent que les utilisateurs préfèrent sélectionner un point du cube, ce qui est proche de la stratégie de *Saisie*, couramment utilisé à la souris. Notons qu'aucun lien significatif n'a été trouvé entre le périphérique et la proportion du nombre d'éléments parallèles ou orthogonaux à l'AT. Le seul résultat significatif trouvé vient du fait que la proportion d'éléments ni orthogonaux ni parallèles à l'AT par rapport à ceux qui y sont orthogonaux ou parallèles est plus importante avec l'écran tactile qu'avec la souris. Ce résultat est lié au fait qu'il y a moins de gestes dont la PPI est extérieure au cube avec la souris, qu'avec l'écran tactile.

Finalement, beaucoup de *trajectoires* correspondent à l'une des deux directions seulement pour les changements d'échelle lors de l'expérience avec la souris, contrairement à celle avec l'écran tactile où les participants ont appliqué des gestes à deux ou quatre doigts dans les deux directions de la transformation.

Ces premières comparaisons indiquent un comportement différent selon le périphérique utilisé pour chaque dimension de la taxonomie indépendamment. Cependant, les principales différences sont dues à la nature des opérations de changements d'échelle, du fait qu'elles sont symétriques et que la souris ne fournit qu'une entrée en deux dimensions, contrairement à l'écran tactile qui en fournit plusieurs.

3.3.3 Classification

Chaque paramètre ayant été précédemment analysé de manière indépendante, ils sont ici analysés dans leur ensemble. Les figures 3.12 et 3.13 montrent la classification résultante, de la même manière que celle pour les gestes sur surfaces tactiles.

Concernant les rotations, tous les gestes, sauf un, peuvent être classifiés selon les classes définies pour les gestes sur surfaces tactiles (R1 :18.89%, R2 :15.56%, R5 :13.33%, R6 :14.44%, R9ouR10 :25.55%) et dans une classe additionnelle qui définit les gestes avec une PPI sur une arête orthogonale à l'AT et pour lesquels la trajectoire est le long de la DT (R11, 11.11%).

Concernant les changements d'échelle, 75.27% des gestes sont définis selon six classes :

- S1 : gestes dont les PPI sont sur une face parallèle à l'AT et dont la trajectoire est dans les deux directions de la DT (20.22%) ;
- S5.2 : gestes dont la PPI est sur une arête orthogonale à l'AT et dont la trajectoire est selon l'une des deux directions de la DT (20.22%) ;
- S1.2 : gestes dont la PPI est sur une face parallèle à l'AT et dont la trajectoire est selon l'une des deux directions de la DT (14.61%) ;
- S7 : gestes composés de deux doigts statiques et utilisation de la molette (10.11%) ;
- geste dont la PPI est sur une arête parallèle à l'AT et dont la trajectoire est selon l'une des deux directions de la DT (5.62%) ;

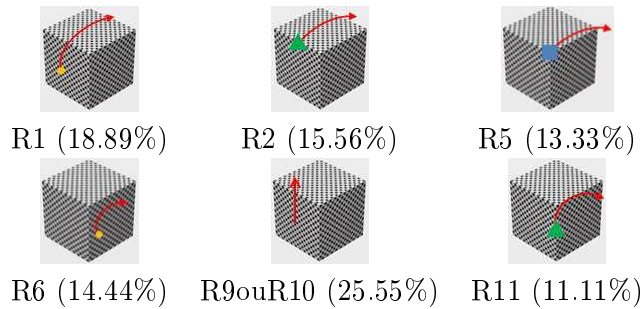


FIGURE 3.12: Catégories de gestes utilisées à la souris et taux d'utilisation correspondant pour les rotations, représentées pour une transformation autour de l'axe x du point de vue (c). Les croix bleues indiquent l'utilisation optionnelle d'un doigt en position statique. Les triangles verts indiquent que la PPI est une arête, les points oranges une face, les carrés bleus un sommet et les losanges violets qu'elle est extérieure au cube.

- S4 : gestes sont les PPIs sont sur deux faces, l'une orthogonale à l'AT et l'autre parallèle (4.49%).

Tous les autres gestes n'ont été appliqués que trois fois au plus. Ainsi, nous constatons une différence très claire entre les gestes employés selon la nature du périphérique pour les opérations de changements d'échelle. Cependant, ce résultat était prévisible du fait que les opérations de changements d'échelle dans cette expérimentation sont symétriques.

Concernant les translations, tous les gestes, sauf sept, peuvent être classifiés dans T1 (46.59%), T2 (23.86%), T4 (4.55%), ainsi que dans une nouvelle classe définissant un geste unitaire dont la PPI est sur une arête orthogonale à l'AT et dont la trajectoire est selon l'AT (T6, 17.05%) ;

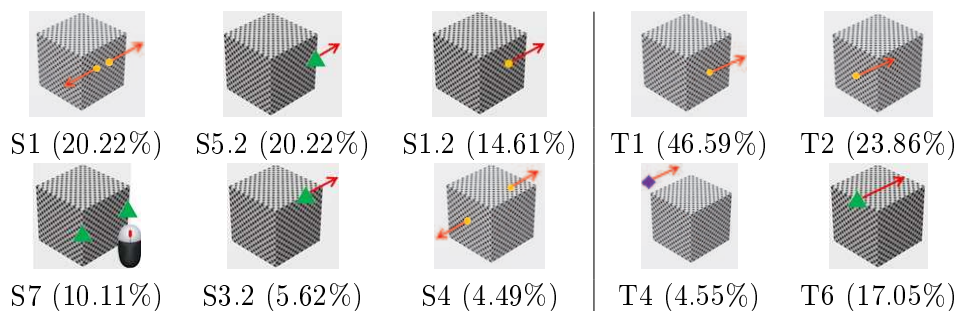


FIGURE 3.13: Catégories de gestes employées à la souris et taux d'utilisation correspondant pour les changements d'échelle (S*, à gauche) et les translations (T*, à droite), représentées pour une transformation autour de l'axe z du point de vue (c). Les mêmes codes couleurs que la figure précédente sont utilisés.

3.3.4 Stratégies

Nous nous intéressons ici aux stratégies employées par les utilisateurs pour l'utilisation de la souris. Concernant les rotations, tous les gestes ont été appliqués en sélectionnant un point du cube. De plus, 74.45% des gestes suivent une stratégie *Courbé*, et les gestes droits sont tangents au cercle de rotation à la fois au point initialement sélectionné et au point d'intersection entre la trajectoire du geste et le cube. En effet, ces derniers ont été appliqués seulement lorsque la projection 2D du cercle de rotation sur l'écran correspondait à un segment. De plus, les interviews ont révélé que les sujets n'ont jamais voulu pousser le cube, mais qu'ils souhaitaient toujours appliquer une stratégie de *Saisie*. Ces résultats sont donc totalement différents de ceux obtenus pour l'écran tactile, où 41.54% des gestes seulement correspondaient à une stratégie de *Saisie*. Concernant les translations, tous les gestes correspondent également à une stratégie de *Saisie*, contrairement aux gestes effectués via l'écran tactile.

Concernant les changements d'échelle, nous avons observé de nouvelles stratégies :

- Via la molette : l'utilisateur indique l'AT par la position du curseur et utilise la molette pour changer l'échelle (21.34% des gestes, incluant ceux de S7) ;
- Via des gestes asymétriques : l'utilisateur sélectionne un point et suit sa trajectoire tout au long de la transformation, en supposant que le système applique la même opération symétriquement (46.01% des gestes, incluant ceux de S1.2, S3.2 et S5.2) ;
- Via plusieurs étapes : l'utilisateur suit les deux directions de l'AT en appliquant plusieurs mouvements (30.33% des gestes, incluant ceux de S1 et de S4).

La comparaison avec les stratégies employées avec l'écran tactile pour les changements d'échelle, est difficile puisque les stratégies utilisées avec l'écran tactile ne peuvent pas être appliquées avec la souris. La stratégie *via plusieurs étapes* pourrait être assimilée à ces dernières, or les utilisateurs doivent appliquer plusieurs changements d'échelle asymétriques avec cette stratégie.

Afin de répondre à (QM3.2), nous comparons les scores de pertinence et de facilité indiqués par les utilisateurs en utilisant l'écran tactile d'une part, et la souris d'autre part (cf. Figure 3.14). Les participants utilisant l'écran tactile ont perçu leurs gestes comme plus pertinents ($\chi^2 = 9.34$, $p < 0.01$ pour les rotations, $\chi^2 = 26.74$, $p < 0.0001$ pour les changements d'échelle, $\chi^2 = 6.43$, $p < 0.05$ pour les translations) et plus faciles ($\chi^2 = 16.08$, $p < 0.0001$ pour les rotations, $\chi^2 = 20.13$, $p < 0.0001$ pour les changements d'échelle, $\chi^2 = 6.48$, $p < 0.05$ pour les translations) que ceux utilisant la souris. La différence est plus importante avec les opérations de changements d'échelle (le coefficient d'association ϕ étant égal à 0.34 pour la pertinence (QT1) et 0.30 pour la facilité (QT2)) qu'avec les rotations ($\phi_{QT1} = 0.20$,

$\phi_{QT2} = 0.26$). De même, la différence est plus importante avec les rotations qu'avec les translations ($\phi_{QT1} = 0.17$, $\phi_{QT2} = 0.17$). Cet ordre est probablement dû au caractère symétrique des changements d'échelle et au fait que l'utilisateur dispose d'une entrée multipoint avec la surface tactile alors que la souris est monopoint. Pour les rotations, le fait que les utilisateurs ont généralement essayé d'appliquer des gestes incurvés avec les deux périphériques a probablement influencé les résultats, du fait que les gestes incurvés sont plus faciles à appliquer avec le doigt qu'avec la souris.

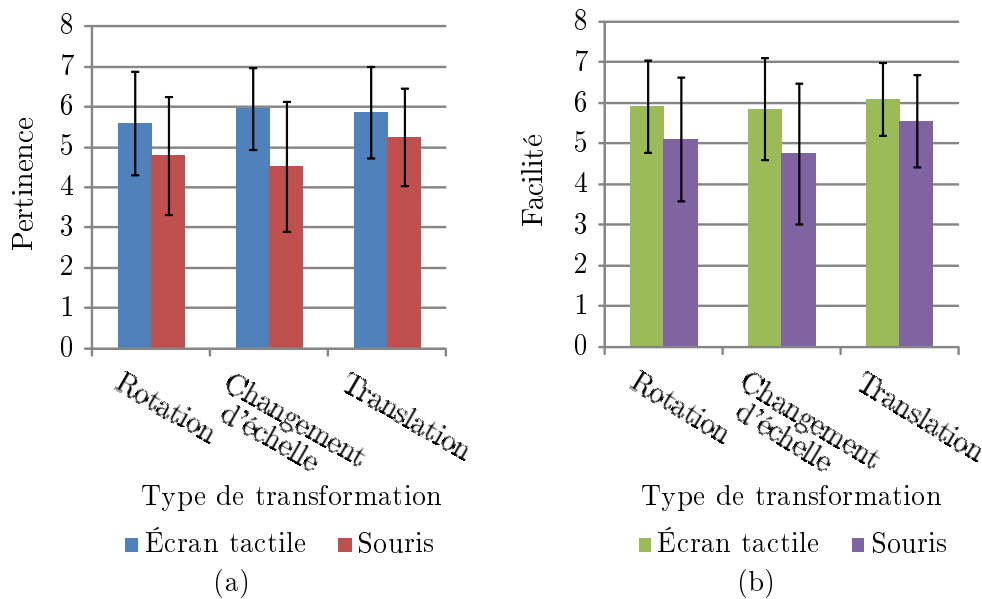


FIGURE 3.14: Scores de pertinence (a) et de facilité (b) pour l'écran tactile et la souris.

3.4 Discussion et conclusion

3.4.1 Compréhension des utilisateurs

La façon dont les utilisateurs ont tendance à interagir avec des écrans tactiles dans des contextes 3D a très peu été explorée. Dans ce papier, nous donnons des premières réponses aux questions suivantes :

- Q3.1 : Y a t-il un comportement commun pour manipuler un objet 3D ?
- Q3.2 : Y a t-il des éléments particuliers de l'objet avec lesquels les utilisateurs interagissent ?
- Q3.3 : Les utilisateurs appuient-ils leurs gestes sur des stratégies, telles que des mouvements physiquement plausibles, ou la création d'un lan-

gage de gestes ?

- Q3.4 : Est-ce que les utilisateurs suivent toujours une stratégie, ou en utilisent-ils plusieurs ?
- Q3.5 : Utilisent-ils le même nombre de doigts pour une transformation et une stratégie données ?
- Q3.6 : Pouvons-nous déduire un ensemble unique de gestes ? Est-ce que cet ensemble est sans conflit ?

Nous avons observé que beaucoup de stratégies sont utilisées, mais presque tous les gestes sont continus et sont basés sur des comportements physiquement plausibles et sur des mouvements centrés sur l'objet (Q3.1). De plus, les utilisateurs ne semblent pas s'appuyer sur des éléments particuliers pour une transformation donnée : ceci dépend de la stratégie appliquée (par exemple, si un utilisateur pousse le cube pour le faire tourner, le geste intersecte la projection 2D d'une arête de l'objet) (Q3.2). Nous avons aussi découvert que les utilisateurs suivent plusieurs stratégies (Q3.3) et que chaque utilisateur en utilise une principalement (Q3.4). Nous avons également observé que les utilisateurs ne considèrent pas comme important le nombre de doigts qu'ils utilisent (Q3.5), ce qui confirme les observations de Wobbrock *et al.* [WMW09]. De plus, les utilisateurs ont tendance à avoir un comportement commun dans une situation donnée (Q3.1) et un ensemble de trajectoires sans conflits définit une grande majorité des gestes (Q3.6). Pour finir, certaines stratégies appliquées par les utilisateurs sont similaires à celles créées par les concepteurs de techniques d'interaction, telles que celles de changements d'échelle, et les stratégies de *Saisie* pour les translations et les rotations. Cependant, de nombreux autres gestes s'appuient sur des stratégies inhabituelles, telles que les stratégies de *Poussée* pour les rotations et les translations et *Droit* pour les rotations.

3.4.2 Comparaison entre les gestes à la souris et avec l'écran tactile

Au cours de la comparaison entre la souris et l'écran tactile, nous avons observé que les stratégies sont différentes à la fois pour les rotations et les translations, du fait que tous les gestes à la souris reposent sur une stratégie de *Saisie* (QM3.1), ce qui a été confirmé par les utilisateurs. Nous avons également observé des différences de stratégies pour les changements d'échelle. En effet, la quasi-totalité des gestes appliqués sur l'écran tactile pour cette opération a été effectuée via l'utilisation d'au moins deux doigts. Cependant, la souris étant monopoint, la plupart des participants de l'étude avec la souris ont soit appliqué une succession de changements d'échelle asymétriques, ou soit un geste dans une des deux directions de la transformation, en supposant que l'autre partie du cube était transformée symétriquement par le système. D'autres participants ont utilisé la molette, assimilant le changement d'échelle à une fonctionnalité de zoom. Afin de comparer la souris et

la surface tactile de façon égale face à cette opération, il serait intéressant d'étendre cette étude avec des changements d'échelle effectués dans une direction seulement.

De plus, les participants utilisant l'écran tactile ont eu plus confiance en leurs gestes que ceux utilisant la souris (QM3.2). Cela peut être dû au fait qu'ils se sentaient plus libres d'appliquer les stratégies qu'ils voulaient, et non celle de *Saisie* uniquement. Ce résultat pourrait nous mener à penser que les écrans tactiles sont plus adaptés que la souris pour la manipulation d'objets 3D par les novices. Or, le fait que la stratégie de *Saisie* a été la seule employée avec la souris peut être dû à l'habitude des utilisateurs, ce qui donne un caractère plus « naturel » à l'écran tactile.

3.4.3 Implications pour le design

Nous avons étudié les gestes appliqués sur des écrans tactiles par des utilisateurs novices en 3D afin de comprendre comment ils ont tendance à interagir. Une raison d'effectuer ce type d'études est de trouver des comportements invariants dans les gestes des utilisateurs. Ainsi, ceci peut aider pour le design de nouvelles interfaces utilisateurs 3D, où les techniques d'interaction peuvent bénéficier d'une bonne compréhension de la perception des utilisateurs pour les actions possibles. Suite aux résultats obtenus, nous proposons les guides suivants pour la conception de techniques dédiées à la manipulation d'objets 3D :

- **Favoriser les interactions physiquement plausibles.** Selon les résultats, une grande majorité des gestes s'appuie sur des gestes physiquement plausibles.
- **Pour une utilisation populaire, favoriser la stratégie de *Saisie* pour les rotations et les translations et la stratégie *Une partie* pour les changements d'échelle** si vous choisissez seulement une stratégie par transformation et que vous voulez qu'un maximum de gestes soit pris en compte. Les stratégies relatives ont été les plus utilisées pour chaque transformation.
- **Pour la facilité d'utilisation, favoriser la stratégie *Droit* pour les rotations, *Poussée* pour les translations et *Une partie* pour les changements d'échelle** si vous choisissez seulement une stratégie par transformation. Les gestes relatifs ont été notés comme les plus faciles à réaliser.
- **Pour une utilisation vaste et pour supporter plusieurs stratégies, favoriser les techniques d'interaction basées sur une analyse des trajectoires des gestes.** Comme défini dans la section 3.2.4, 83.57% des gestes de cette études peuvent être identifiés (transformation et axe) par leur trajectoire. Certaines ambiguïtés peuvent être éclaircies avec une analyse additionnelle des positions des points initiaux.

3.4.4 Limitations et travaux futurs

Cette étude a été conduite sur des images statiques pour se concentrer sur la façon dont les utilisateurs ont tendance à interagir avec des entrées tactiles. Cependant, il pourrait être intéressant de prendre en compte les sorties pour vérifier si ces gestes sont toujours valides quand l'objet se déplace. De plus, les rotations et les translations sont appliquées suivant une direction par axe seulement, pour minimiser la durée de l'étude et, par conséquent, la fatigue de l'utilisateur. Néanmoins, l'utilisation de la main dominante ou non dominante pourrait avoir un impact sur les résultats. De plus, notre hypothèse était que le point de vue influence le choix de la stratégie. Une analyse additionnelle, dédiée à l'influence du point de vue, étendrait nos résultats.

Dans notre étude, des transformations unitaires sur une forme basique et avec les axes locaux ont été étudiées pour comprendre les gestes des utilisateurs, dans un premier temps. Il pourrait être intéressant d'étendre cette étude avec d'autres axes pour savoir s'il y a un comportement général pour tous les axes. Une extension avec des objets plus complexes que le cube est nécessaire pour explorer l'influence de paramètres, tels que la courbure, et généraliser les résultats sur un spectre plus large des objets 3D. En effet, les stratégies définies dans ce chapitre s'appuient sur des éléments définissant l'axe de la transformation, telle que R3 où l'utilisateur sélectionne deux points d'une arête parallèle à l'axe de transformation. Cependant, cette sélection est impossible avec des objets plus complexes, tel que le lapin de Stanford. De plus, une extension avec différentes tailles d'écrans serait intéressante. En effet, la taille de l'écran a une forte influence sur notre façon d'interagir. Dans notre expérience, la taille choisie permet aux participants d'utiliser plusieurs doigts et mains sans mouvements de bras, contrairement aux écrans de smartphones ou aux écrans géants. L'influence de la position de l'objet sur le choix de la stratégie pourrait également être explorée (par exemple, si l'objet est localisé au bord de l'écran, les utilisateurs pourraient préférer la stratégie *SaisieEtTirer* pour déplacer l'objet vers le milieu de l'écran). La même étude pourrait être effectuée pour les scènes composées de multiples objets. Il pourrait aussi être intéressant d'étendre cette étude en permettant aux utilisateurs d'appliquer deux ou trois gestes différents afin de déterminer si un utilisateur utilise toujours la même stratégie dans le même contexte. Finalement, certaines ambiguïtés ont été détectées dans l'analyse des trajectoires. Une solution pour lever ces ambiguïtés pourrait être de trouver un autre paramètre que la plupart des utilisateurs contrôlèrent de la même façon. Par exemple, la quantité de force appliquée sur la surface tactile nous paraît intéressante. C'est pourquoi nous l'étudierons dans le chapitre suivant.

Cette étude a été conduite afin de mieux comprendre les gestes des utilisateurs pour une tâche de manipulation 3D. Nous espérons que ces résultats

aideront pour le design de nouvelles techniques d'interaction dédiées aux écrans tactiles. Ces travaux ont été valorisés à travers une publication à la conférence GI [CH12b], et a été invité à être étendu pour une publication dans le journal *Computers and Graphics* [CH12a].

Analyse de l'utilisation de la pression

Nous avons observé dans le chapitre précédent que les gestes appliqués par les utilisateurs pour manipuler un objet 3D peuvent amener à des ambiguïtés, notamment dans le cas des rotations et des translations. Ainsi, la pression normale apportant un degré de liberté supplémentaire aux surfaces tactiles, elle pourrait être un atout majeur pour l'interaction 3D, et notamment pour lever certaines ambiguïtés.

Il y a quelques années, de nouveaux prototypes de surfaces tactiles capables de détecter les entrées de pression avec une importante précision sont apparus [RP09]. Aujourd'hui, les produits commerciaux correspondant à ces prototypes apparaissent sur le marché, offrant ainsi de nombreuses possibilités pour les applications futures. Par exemple, le *ForcePad*, présenté par Synaptics [Syn] en 2012 est capable de détecter les pressions appliquées par cinq doigts avec une sensibilité de 1000 grammes-force. Dans un futur proche, de nombreux périphériques devraient bénéficier de cette technologie, apportant alors de nouveaux défis pour la recherche par l'invention de nouveaux usages et applications.

Parmi les nombreux défis dans lesquels l'utilisation de tels périphériques entre en jeu, l'interaction avec du contenu tridimensionnel affiché sur un écran tactile semble particulièrement intéressante. En effet, tandis que les surfaces tactiles offrent une correspondance directe entre l'espace d'interaction et l'espace de visualisation (bijection) pour l'interaction avec du contenu bidimensionnel, il n'est pas évident de manipuler la troisième dimension en utilisant des entrées à deux dimensions uniquement.

Comme exposé dans la section 1.2.1, quelques études se sont intéressées à la pression comme modalité d'entrée. La plupart d'entre elles portent sur la capacité des utilisateurs à détecter plusieurs niveaux de force de manière discrète. Parmi les rares travaux portant sur l'utilisation de la pression de manière continue, Srinivasan et Chen [SC93] ont conçu une expérience pour

déterminer comment les utilisateurs réussissent à suivre une courbe de pression en fonction du temps à partir d’un doigt statique. Contrairement à cette étude, nous nous intéressons au contrôle de la pression lors de déplacements du doigt, les surfaces tactiles ayant comme avantage de permettre d’effectuer des gestes. De plus, Lee *et al.* [LLL⁺12] ont étudié les performances humaines concernant l’utilisation de la force tangentielle sur un périphérique mobile pour apporter de plus riches informations aux futures interfaces sur ces périphériques. Comparé à ces travaux, nous nous intéressons au contrôle continu de la force normale appliquée durant un mouvement sur une surface tactile non-portative.

En terme d’utilisation de la pression, diverses interfaces utilisateurs ont été proposées pour une utilisation au stylet dans des contextes bidimensionnels, comme indiqué dans la section 1.3.4. Havley *et al.* [HHWB12] explorent l’utilisation de la pression sur une télécommande pour interagir à distance avec un téléviseur visualisant des objets 3D. Dans leurs travaux, seules des sélections discrètes sont proposés. Nous pensons que l’utilisation continue de la pression peut apporter d’importants avantages pour l’interaction continue avec du contenu 3D, tels que des translations, des rotations ou des changements d’échelle.

Afin d’analyser le bénéfice de la force normale avec du contenu tridimensionnel, nous avons mené deux études utilisateurs. Dans la section 4.1, nous présenterons une première étude afin d’évaluer l’aptitude des utilisateurs à contrôler la pression au niveau sensori-moteur. L’un des buts de cette expérience est de définir un seuil permettant de distinguer les utilisations volontaires de pression pour interagir dans un contexte donné, et les utilisations involontaires de pression dues à des considérations externes, tels que la précision du périphérique ou des problèmes anatomiques. La section 4.2 présente une seconde expérience portant sur la façon dont la pression est utilisée pour manipuler des objets 3D sur une surface tactile à partir des résultats de la première étude.

Toutes ces expériences sont conduites à Cap Sciences, où nous avons demandé aux visiteurs de participer à ces études. Afin d’éviter des comportements dus à des habitudes, nous avons choisi des participants n’ayant que peu d’expérience avec les surfaces tactiles et les technologies 3D. Le même dispositif que dans la Section 3.2 a été utilisé. La surface TouchCo [RP09] utilisée est capable de détecter des forces allant de 0 à au moins 16253 grammes-force, avec une précision proche d’un gramme-force (1 gramme-force = 9.80665 milliNewton). Avant chaque expérience, nous avons informé les sujets que la surface tactile est capable de détecter la pression. Ils ont pu se familiariser avec ce dispositif pendant quelques minutes avant chaque expérimentation, la pression étant visualisée via un tracé du geste dont l’épaisseur est proportionnelle à la pression exercée.

4.1 Étude sensori-motrice du contrôle de la pression

4.1.1 Protocole expérimental

Dans l'étude définie dans cette section, nous explorons l'influence des paramètres physiologiques et perceptuels, tels que la direction du geste ou niveaux de pression perçus, sur des tâches basiques. De plus, nous évaluons la capacité des utilisateurs à contrôler la pression de manière continue pendant qu'il déplace son doigt sur la surface.

Pour effectuer cela, nous organisons l'expérimentation comme suit. Huit points cibles sont affichés autour d'un point central. Les cibles sont situées de 0° à 315° (espacées de 30°) sur un cercle trigonométrique centré sur le point central et ayant un rayon de six centimètres. La tâche consiste à glisser le doigt du point central à une cible mise en avant par une coloration rouge, et ce trois fois dans chaque direction dans un ordre aléatoire. Le test est composé de six instructions où le participant doit effectuer cette tâche. Les instructions définissent la façon dont les utilisateurs doivent utiliser la pression lors du mouvement du point central à la cible :

1. *Naturelle* : sans instructions spécifiques
- 2a. *Basse* : utilisant un faible niveau de pression
- 2b. *Haute* : utilisant un fort niveau de pression
- 3a. *Constante* : la quantité de force ne doit pas varier
- 3b. *Croissante* : la quantité de force doit augmenter linéairement
- 3c. *Décroissante* : la quantité de force doit diminuer linéairement

Les instructions $\{Basse, Haute\}$ et $\{Constante, Croissante, Décroissante\}$ sont contrebalancées. Le test est appliqué pour la main dominante (MD) et la main non dominante (MND). L'instruction *Naturelle* est appliquée en premier afin d'obtenir le comportement « naturel » des participants et d'éviter des comportements biaisés.

Vingt personnes, neuf hommes et onze femmes, âgés de 16 à 54 ans (moyenne = 34.65, $\sigma = 10.54$) ont participé à cette expérience. Ils ont estimé leur habitude des écrans tactiles à 1.75 en moyenne ($\sigma = 1.25$) et leur habitude de la 3D à 1.3 en moyenne ($\sigma = 0.57$) sur des échelles de Likert allant de 1 (jamais utilisé) à 5 (quotidien).

4.1.2 Contrôle de la force de pression

Dans un premier temps, nous analysons la pression moyenne des gestes des utilisateurs. Nous interprétons ces valeurs par direction afin de déterminer l'influence de l'orientation du geste sur la quantité de force appliquée sur la surface. Pour ces analyses, seules les instructions relatives à l'intensité de

la force sont requises. Nous utilisons également l'instruction *Naturelle* pour analyser les gestes sans contraintes.

Pour les pressions « *naturelles* », une analyse de variance (ANOVA) à mesures répétées à deux facteurs (8 directions \times 2 mains) révèle un effet significatif de la direction ($F = 14.342, p < 0.0001$). Concernant les niveaux de pressions pour les instructions de pression *Basse* et *Haute*, une ANOVA à mesures répétées à trois facteurs (8 directions \times 2 mains \times 2 niveaux de pressions) a également révélé des différences significatives pour les directions ($F = 28.85, p < 0.0001$) et les niveaux de pression exercées ($F = 78.450, p < 0.0001$). Les tests post-hocs révèlent des différences sur 12 couples de directions sur 28 dans la première ANOVA, et 21 pour la seconde. Ces résultats montrent que la direction du mouvement affecte la quantité de force appliquée. En particulier, la pression appliquée vers le haut (90°) est plus importante que celle dans les directions horizontales (0° et 180°). Ce résultat peut être dû à la friction du doigt sur la surface. De plus, un effet significatif entre la direction et le niveau de force appliquée existe ($F = 9.630, p < 0.0001$), la différence entre les directions étant plus grandes lorsque le niveau de pression est plus élevé. La figure 4.1 indique les moyennes de forces appliquées pour ces instructions. Il est à noter que nous n'avons pas trouvé d'influence significative de la main utilisée (main dominante, main non dominante).

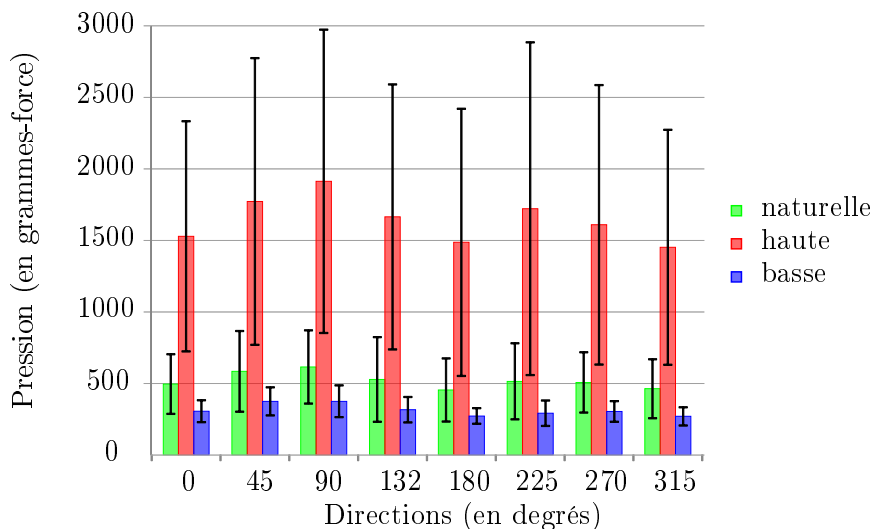


FIGURE 4.1: Moyenne des forces appliquées pour chaque direction avec les instructions *Naturelle*, *Basse* et *Haute*.

La figure 4.2 illustre la quantité de force appliquée par chaque utilisateur sous les trois instructions : *Naturelle*, *Basse* et *Haute*. Nous pouvons noter que chaque sujet a appliqué des forces au moins deux fois plus élevées pour l'instruction de pressions élevées que pour celles de pressions faibles.

Cette observation nous laisse penser que la différence entre pressions élevées et faibles est bien perçue par les sujets. De plus, la force appliquée pour l'instruction de pressions élevées a une magnitude importante entre les sujets. Ceci révèle que chaque participant a sa propre référence des niveaux de pression.

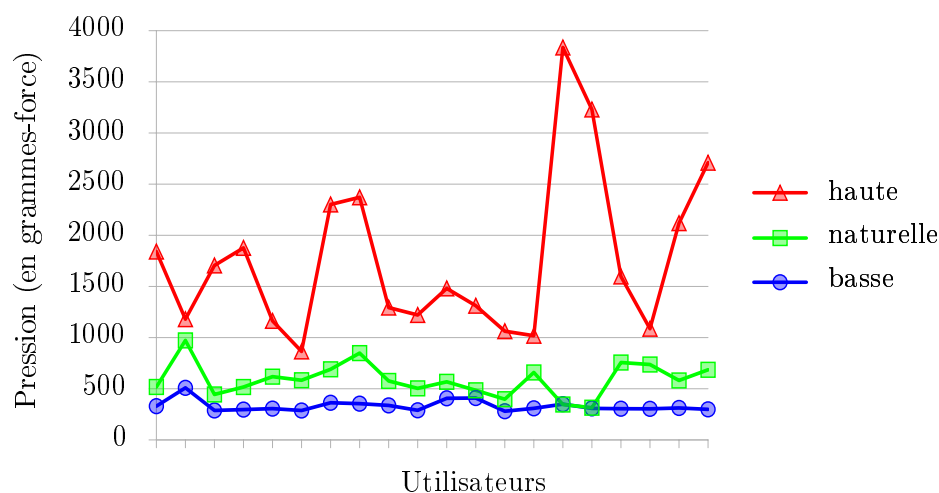


FIGURE 4.2: Quantité de force appliquée par chaque utilisateur pour les instructions *Naturelle*, *Basse* et *Haute*.

Par conséquent, dans les prochaines analyses, nous normalisons les résultats des sujets en calculant leur z-scores [MB93] pour analyser les forces moyennes. Le maximum des différences entre les trois essais pour chaque condition correspond à un z-score compris entre 0.022 et 0.044, tandis que le minimum des différences entre les pressions faibles et élevées pour chaque condition correspond à un z-score compris entre 0.35 et 0.90. Ces z-scores sont calculés pour chaque utilisateur à partir de la moyenne et de l'écart-type des pressions que l'utilisateur a exercé tout au long du test. Ces résultats indiquent que chaque sujet est capable de reproduire d'un essai à l'autre des pressions de manière similaire. Les utilisateurs ont donc tendance à être capable de contrôler la quantité de force qu'ils appliquent.

4.1.3 Contrôle continu de la pression

Les résultats décrit précédemment présentent une analyse des moyennes de pression. Dans cette section, nous nous intéressons à l'analyse des variations de pression effectuées tout au long du geste sur la surface. Le principal objectif de cette évaluation est d'être capable de distinguer les cas où les utilisateurs souhaitent faire varier la pression intentionnellement des cas où les variations sont involontaires et sont dues à des aspects externes tels que des paramètres physiologiques. Cette analyse s'appuie uniquement sur les ins-

tructions où des variations de pression sont requises : *Constante*, *Croissante* et *Décroissante*.

Premièrement, nous étudions pour chaque geste l'erreur relative autour de la moyenne, connue sous le nom de coefficient de variation (CV). Ensuite, nous calculons le CV moyen pour chaque direction, indiqué dans la figure 4.3. Les valeurs de ces CVs étant non nuls pour l'instruction de pression *Constante*, les utilisateurs n'ont pas réussi à appliquer une pression constante. Cependant, la quantité de variations entre les gestes de pression constante d'une part, et ceux de variations de pression (instructions *Croissante* et *Décroissante*) d'autre part, est grande, indiquant que les utilisateurs ont réussi à faire varier la pression de manière volontaire. Ainsi, les CVs pour l'instruction de pression *Constante* (CV_{ref} , cf. Table 4.1) correspondent à des seuils sous lesquels les utilisateurs ne perçoivent pas les variations de pression. De plus, nous pouvons considérer que les utilisateurs ont réussi à appliquer des pressions constantes pour une sensibilité donnée, définie par ces seuils.

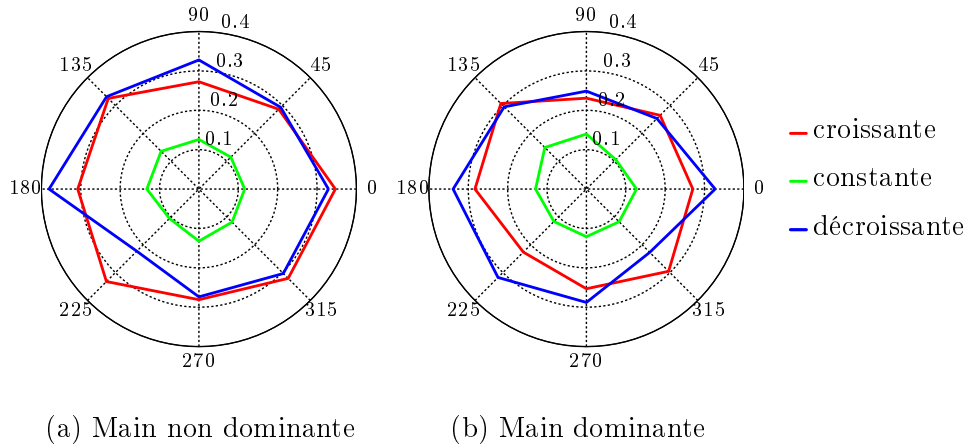


FIGURE 4.3: Moyenne des coefficients de variations pour chaque direction, chaque main et chaque instruction.

	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
MND	.116	.115	.126	.136	.132	.106	.132	.119
MD	.127	.106	.140	.149	.129	.117	.121	.117

TABLE 4.1: Table de correspondance entre la direction du mouvement et le coefficient de variation référent pour la main non dominante (MND) et la main dominante (MD).

Afin de concentrer l'analyse des gestes sur les variations de pression uniquement volontaires, nous devons supprimer les caractéristiques involontaires

de la pression, représentée en fonction de la distance. Ceci peut être réalisé en utilisant une régression linéaire par morceaux (*local kernel regression*, en anglais) [Nad64, Wat64] en approximant localement le signal par un noyau Gaussien, dont la taille (t) est calculée suivant les valeurs de sensibilité (CV_{ref}). Pour cela, nous utilisons le coefficient de variation de l'erreur type (*root mean square error (RMSE)*, en anglais), celui-ci étant une mesure de dispersion autour de la courbe approximée :

$$CV_{RMSE} = \frac{RMSE}{\mu}$$

où μ correspond à la moyenne de pression du geste. Nous appliquons un algorithme glouton pour trouver la taille de noyau la plus adéquate. En débutant avec $t = \epsilon$, nous calculons CV_{RMSE} et itérons en augmentant la taille du noyau jusqu'à $CV_{RMSE} \geq CV_{ref}$. Dans nos expériences, nous utilisons cent points répartis de manière égale le long de l'axe des abscisses pour appliquer cette régression. La figure 4.4 montre un exemple pour différentes valeurs de lissage.

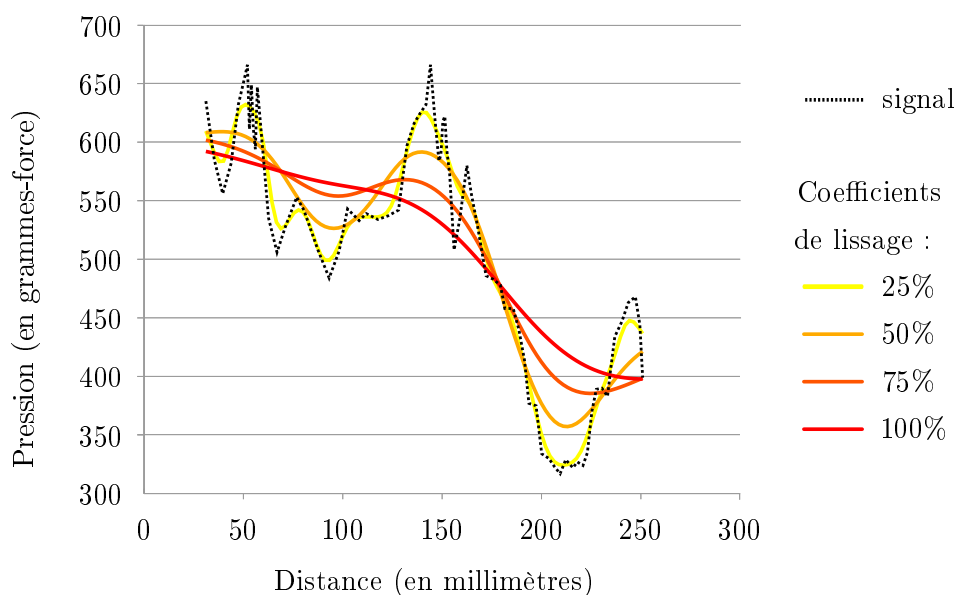


FIGURE 4.4: Exemples de lissage sur une courbe de pression en fonction de la distance. La ligne en pointillés correspond à cette courbe, et les lignes colorées à des lissages utilisant un noyau de rayon égal à 25%, 50%, 75% and 100% de CV_{ref} .

Nous calculons ensuite les coefficients directeurs et les coefficients de Pearson des courbes lissées. Nous obtenons alors, pour l'instruction de pression *Croissante* (resp., *Décroissante*) un coefficient directeur positif (resp. négatif) pour 100% (resp. 98%) des gestes, et la moyenne des coefficients

de Pearson est égal à 0.91, $\sigma = 0.06$ (resp. 0.79, $\sigma = 0.09$). Ces résultats montrent que les utilisateurs sont globalement capables de contrôler linéairement la pression de manière croissante et décroissante pendant qu'ils effectuent un geste sur la surface tactile.

Dans le but d'estimer dans quelle mesure les variations de pression dans un geste diffèrent des gestes « constants », nous définissons un indice de confiance (IC), comme le ratio entre le CV d'un geste ($CV_{gesture}$) et le CV_{ref} , tel que :

$$IC = \frac{CV_{gesture}(dir)}{CV_{ref}(dir)}$$

pour une direction dir donnée.

Par définition, un IC proche de 1 signifie que les variations de pression sont probablement involontaires, à l'opposé des hautes valeurs d' IC . La figure 4.5 illustre les IC moyens obtenus pour chaque instruction. Nous observons alors qu'une grande majorité des gestes où les variations de pression sont utilisées de manière intentionnelle ont un IC supérieur à 1.25, et que ceux dont les variations sont involontaires ont un IC inférieur à 1.25. Ainsi, nous considérerons 1.25 comme la valeur seuil de l' IC pour distinguer une utilisation volontaire des variations de pression durant un geste le long de la surface d'une utilisation involontaire.

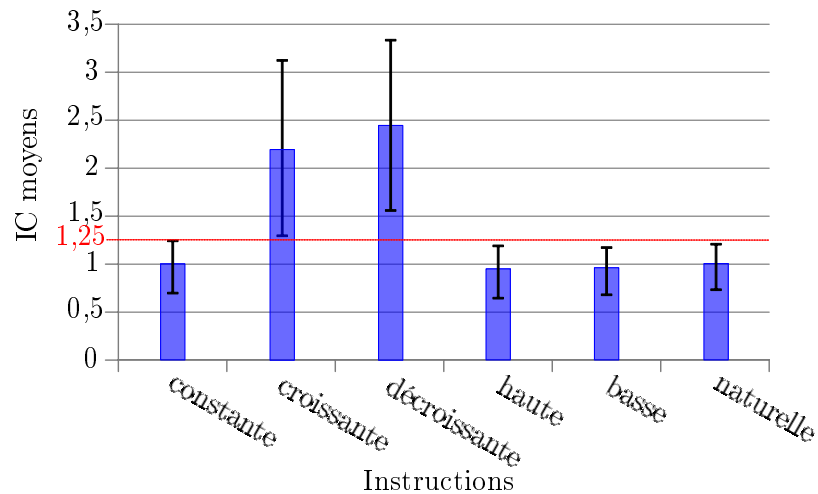


FIGURE 4.5: Moyennes des indices de confiance pour les différentes instructions.

4.1.4 Discussion

Cette première étude nous permet de comprendre comment la pression est appliquée et contrôlée durant un geste sur une surface tactile à un niveau sensori-moteur. En particulier, nous avons montré que la direction du geste

impacte sur la quantité de force appliquée. Nous avons aussi démontré que les utilisateurs sont capables d'appliquer des pressions faibles et élevées, mais également de faire varier la quantité de force qu'ils exercent ou de la garder constante, tout au long du geste. Cependant, la perception de la quantité de force appliquée varie d'un sujet à l'autre. De manière intéressante, nous avons également observé que les utilisateurs tendent « *naturellement* » à appliquer des forces « constantes ».

De ces résultats, nous avons défini une méthodologie nous permettant de déterminer si une variation de pression peut être considérée comme intentionnelle ou involontaire. Ceci nous permet alors d'analyser les variations de pression utilisées pour des tâches d'interaction de plus haut niveau.

4.2 Utilisation de la pression pour la manipulation d'objets 3D

4.2.1 Protocole expérimental

Le but de cette seconde étude est de comprendre comment l'utilisateur tend « naturellement » à utiliser la pression sur une surface tactile quand il interagit avec du contenu tridimensionnel. Nous faisons l'hypothèse que la quantité de force appliquée sur le détecteur pour accomplir une tâche d'interaction 3D (*e.g.*, pour la translation ou la rotation d'un objet) est liée au contenu 3D sous-jacent.

Afin de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse, nous avons mis en place une expérience se conformant au même protocole que dans la Section 3.2. Ainsi, il est demandé à l'utilisateur d'appliquer le geste qui lui semble le plus adapté pour chacune des 29 vidéos du test. Les vingt-sept vidéos de l'expérience présentée dans la Section 3.2 ont été utilisées. Elles correspondent à des rotations, des translations et des changements d'échelle sur un cube selon les trois axes du repère local de l'objet et selon trois points de vue différents (cf. Figure 3.4). Nous avons ajouté deux vidéos représentant la translation le long de l'axe x pour le cube vu de face (cf. Figure 3.4(a)) à différentes profondeurs. La taille de la projection de l'arête est de deux centimètres pour l'une et trois pour l'autre. Notons qu'une même transformation existe dans l'ensemble des vingt-sept vidéos où le cube est plus proche de la caméra, avec une projection d'arête de 3.9 centimètres. De plus, à la fin de chacun de ses gestes, nous avons demandé à l'utilisateur d'évaluer les affirmations suivantes : « Le geste que j'ai fait est pertinent compte tenu de la transformation souhaitée » (QT1) et « Le geste que j'ai fait était facile à réaliser » (QT2). De même que dans l'expérience présentée dans la Section 3.2, deux échelles de Likert à sept niveaux, allant de totalement en désaccord (1) à totalement d'accord (7) ont été utilisées pour évaluer ces affirmations.

Vingt sujets, huit hommes et douze femmes (âge moyen = 31.4, $\sigma = 9.38$) ont participé à l'expérience. Nous avons choisi des participants ayant très peu d'expérience en technologies tactiles et 3D, afin d'éviter les habitudes acquises dans les contextes précédents. Les participants ont noté leur habitude des écrans tactiles avec une moyenne de 1.92 ($\sigma = 1.44$) et leur habitude de la 3D avec une moyenne de 1.58 ($\sigma = 1.16$), en utilisant une échelle de Likert à cinq niveaux allant de jamais utilisé (1) à quotidien (5).

4.2.2 Étude de la pression moyenne

De façon similaire à la première étude, nous avons effectué une analyse à l'ordre zéro pour comparer les pressions moyennes. Le but est de détecter si la moyenne de pression diffère avec la profondeur perçue de la transformation.

Pour chaque transformation et chaque point de vue, nous avons effectué des ANOVAs à mesures répétées sur les trois axes. Nous n'identifions alors aucune différence significative pour les rotations et les changements d'échelle. La seule différence notable a été trouvée pour les translations pour le point de vue (b) ($F = 6.02, p < 0.01$). Les tests post-hoc révèlent qu'une différence significative existe entre la translation le long de l'axe x avec, à la fois, celle le long de l'axe y et celle le long de l'axe z , mais pas entre ces deux dernières. Comme exposé dans l'étude précédente, la direction a une influence sur la quantité de force appliquée. En particulier, la quantité de force est plus importante pour les gestes de directions verticales que ceux de directions horizontales. Par conséquent, cette différence semble venir de la direction du geste, et non de la transformation 3D sous-jacente. Notons que nous n'avons pas réalisé l'ANOVA sur les points de vue, car la comparaison n'aurait pas été adéquate, du fait que la projection des axes varie avec les points de vue.

Concernant les opérations de changements d'échelle, tous les sujets ont effectué un geste avec deux ou quatre doigts dans les deux directions opposées de la transformation. Pour analyser la pression pour chaque direction de ces transformations, nous avons appliqué des t-tests sur la pression moyenne de chacune de ces deux directions. Aucune différence significative n'a été trouvée. Ainsi, les sujets semblent appliquer des pressions moyennes équivalentes avec chaque doigt, même si la profondeur augmente dans une direction et diminue dans l'autre.

Pour finir, nous explorons comment la profondeur de l'objet manipulé impacte la quantité de force appliquée pour les translations dans le plan de l'écran (*i.e.*, les trois translations le long de l'axe x pour la vue de face du cube). Aucune différence significative n'a été trouvée non plus, suggérant que les sujets utilisent la pression de manière identique, quelle que soit la profondeur de l'objet.

Étude des variations de pression

En premier lieu, le signal d'entrée doit être filtré comme précédemment pour supprimer les variations involontaires de pression. Ici, la direction varie au cours du geste. Nous avons donc besoin d'adapter CV_{ref} afin de prendre en compte ces changements. Le CV_{ref} modifié (CV_{ref}') est calculé comme une moyenne pondérée sur toutes les directions appliquées au geste, telle que :

$$CV_{ref}' = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} CV_{ref}(dir(pt_i, pt_{i+1}))$$

où n est le nombre de points enregistrés dans le signal, CV_{ref} le coefficient de variation pour l'instruction de pression *Constante*, dir une fonction indiquant la direction la plus proche entre deux points parmi les huit directions étudiées dans l'étude précédente, et pt_i le i ème point du signal enregistré.

Dans cette étude, les gestes ne sont pas contraints à un comportement pré-établi : l'utilisateur est libre d'effectuer les gestes qu'il souhaite sans aucune contrainte sur la direction ou la variation de pression. Ainsi, nous effectuons une analyse à l'ordre un pour identifier les variations de pression tout au long du geste, et ce en considérant la dérivée première du signal filtré. Dans cette étude, nous observons que les gestes pour les rotations sont effectués le long d'un cercle représentant la rotation et centré sur le centre de l'objet ou suivant une direction tangente à ce cercle. Pour les translations et les changements d'échelle, les gestes sont effectués le long de l'axe de transformation, tel que décrit dans le chapitre précédent. Ainsi, pour analyser le signal, nous choisissons de représenter le signal dans un espace directionnel en sommant les valeurs de dérivées positives d'une part, et négatives d'autre part, pour chaque direction. La figure 4.6 illustre cette analyse sur un exemple donné. De plus, pour chaque transformation, nous calculons l'indice de confiance IC afin de déterminer si le participant tend à faire varier la pression ou non.

Nous faisons l'hypothèse qu'il existe une corrélation entre la quantité de force appliquée et la profondeur perçue de la transformation. La figure 4.6 illustre les résultats attendus pour une rotation dans le sens trigonométrique selon l'axe y . Du fait que les gestes sont appliqués le long du cercle de rotation pour cette transformation, nous supposons que, quand la direction du geste est selon (resp. opposée à) la profondeur, la pression devrait augmenter (resp. diminuer). Dans notre expérience, cette hypothèse peut être vérifiée avec une analyse préalable de l' IC . Si l' IC est plus grand que 1.25, la représentation directionnelle de la dérivée du signal est utilisée pour analyser si les variations de pression sont corrélées à la profondeur perçue de la transformation ou non.

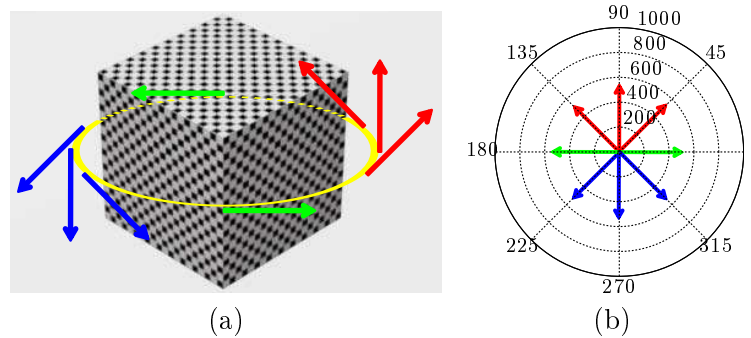


FIGURE 4.6: Interprétation des résultats attendus sur un geste appliqué durant une rotation selon l'axe y pour le point de vue (c) (Figure 3.4). (a) La trajectoire du geste suit le cercle jaune représentant la rotation. Elle peut être décomposée en plusieurs vecteurs 3D tangents qui sont orientés vers la profondeur (flèches rouges), dans le sens opposé de la profondeur (flèches bleues) ou ayant une profondeur constante (flèches vertes). (b) La transposition de ces vecteurs sur un diagramme polaire représentant les directions indique où les variations de pressions devraient augmenter (flèches rouges) et diminuer (flèches bleues) si les utilisateurs corrèlent les variations de pression avec les variations de profondeur.

Les résultats correspondant aux rotations sont exposés sur la figure 4.7. Les valeurs d' IC indiquent que les sujets tendent à faire varier la quantité de force sur la surface le long de leurs gestes. Seulement deux rotations (axes y et z du point de vue (a) de la Figure 3.4) ont un IC inférieur au seuil défini dans l'expérience précédente, indiquant que les utilisateurs n'ont pas eu tendance à utiliser les variations de pression. Pour ces deux transformations, la dérivée du signal est faible, et ce dans toutes les directions. Pour la rotation autour de l'axe z , la transformation peut être interprétée comme une transformation 2D car l'axe de transformation est colinéaire à la direction de la vue. En effet, chaque point du cube a une profondeur constante tout au long de cette transformation, ce qui expliquerait l'inutilité de la pression pour ce cas. La rotation autour de l'axe y requière de plus amples investigations pour être expliquée, et semble correspondre à un cas particulier de notre expérience. Pour toutes les autres transformations, l' IC est plus grand que 1.25, ce qui indique une volonté de faire varier la force. De plus, nous pouvons observer que, les valeurs positives (resp. négatives) de la dérivée du signal sont généralement orientées dans la direction de la profondeur perçue de la transformation. Par conséquent, il apparaît que les utilisateurs modifient la quantité de force qu'ils appliquent pour faire tourner un objet 3D.

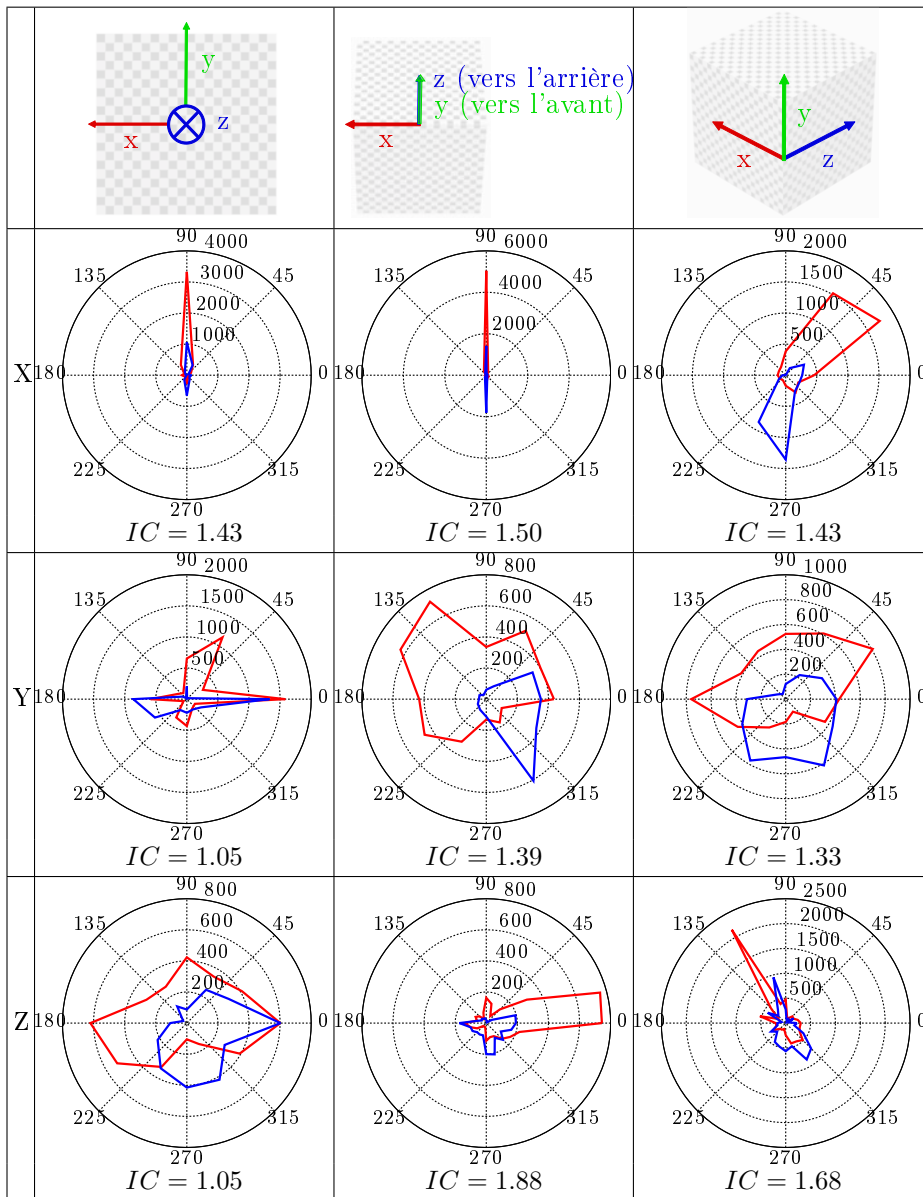


FIGURE 4.7: Analyse différentielle pour chaque rotation. Chaque ligne correspond à un axe et chaque colonne à un point de vue. Dans chaque cellule, un diagramme polaire indique la quantité de variations positives (en rouge) et négatives (en bleu) selon la direction du doigt. Notons que la quantité de variation n'est pas corrélée avec l'IC car nous sommes les coefficients directeurs entre chaque paire de points qui se suivent, et le nombre de points est variable selon la longueur du geste.

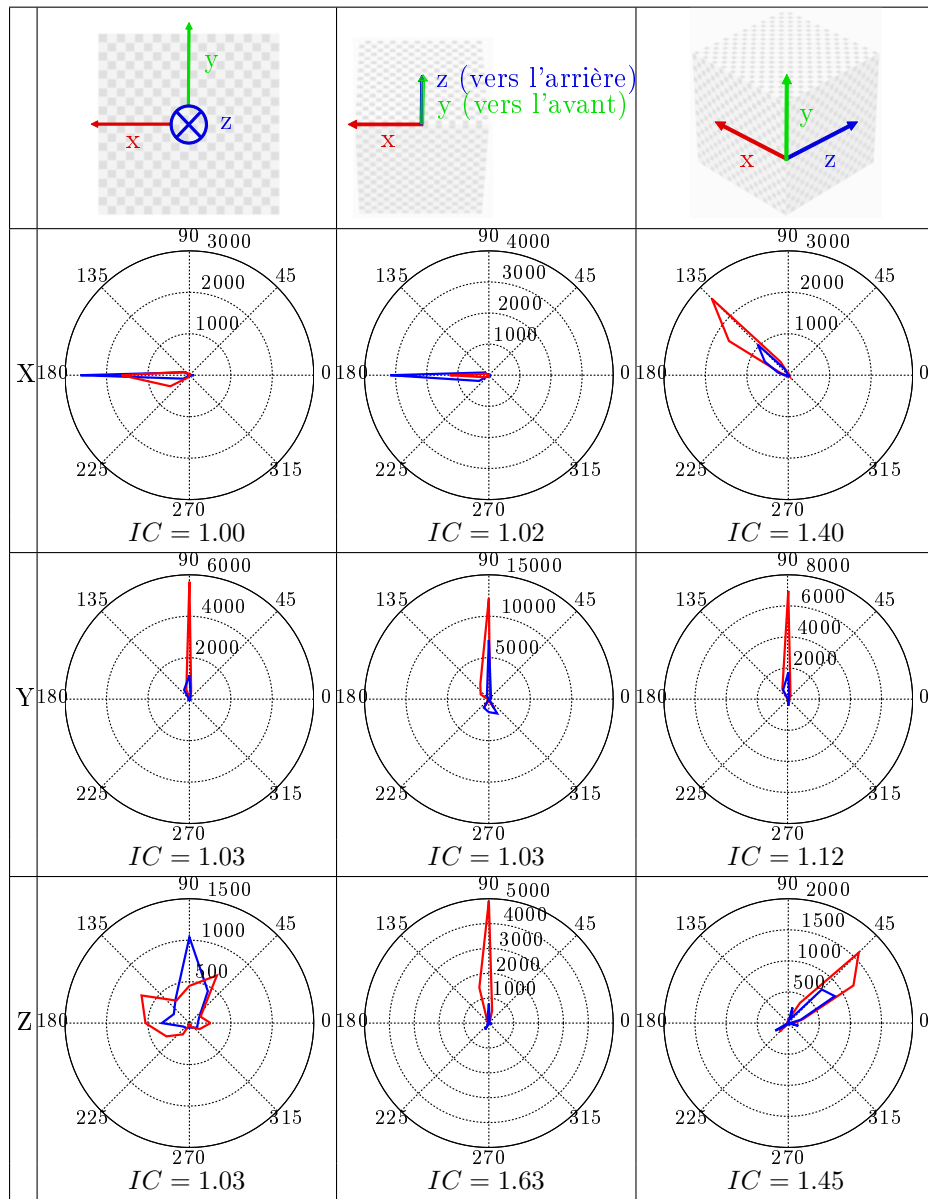


FIGURE 4.8: Analyse différentielle pour chaque translation. Les notations sont les mêmes que pour la figure 4.7.

Un comportement similaire peut être observé pour les translations, comme illustré sur la figure 4.8. Les transformations avec un IC inférieur à 1.25 peuvent être interprétées comme des transformations 2D seulement. En effet, comme décrit pour les rotations, ces transformations ne provoquent pas d'ambiguïtés sur la profondeur et les sujets ne semblent pas utiliser les variations de pression dans ces cas. Cependant, nous pouvons observer plus de

variations de pression positives que de négatives pour les translations avec un IC supérieur à 1.25. De manière intéressante, 100% des gestes effectués pour ces trois translations ont un coefficient directeur positif et un coefficient de Pearson en moyenne égal à 0.83 ($\sigma = 0.05$). Ces trois translations étant les seules dans la profondeur, ces résultats renforcent l'hypothèse sur la corrélation entre les variations de pression et les variations de profondeur. Notons que les participants ne semblent pas utiliser les variations de pression pour les translations vers l'avant (translation en y pour le point de vue (b)), l' IC correspondant étant égal à 1.03.

Concernant les changements d'échelle, les sujets n'ont pas tendance à faire varier la pression, l' IC étant proche de 1 (maximum 1.15), alors qu'ils l'utilisent pour les autres types de transformations. Ce résultat peut être dû à la tendance des sujets d'utiliser leurs deux mains pour les opérations de changements d'échelle. De plus, il s'agit du seul type de transformation du test composé de deux directions. Ainsi, il n'est peut-être pas naturel d'appliquer des variations de pression avec deux doigts dans des directions opposées. La cause de ce résultat requière de plus amples investigations.

4.2.3 Discussion

L'analyse à l'ordre un nous permet de confirmer que la nature des tâches d'interaction 3D impacte la façon dont les utilisateurs font varier la pression. En effet, les utilisateurs ont tendance à corrélérer la variation de la force avec la variation de la profondeur pour les rotations et les translations. Il est également intéressant d'observer que ce n'est pas le cas pour les opérations de changement d'échelle. Ceci peut être dû au fait que l'application de différentes forces de pression avec plusieurs doigts ou plusieurs mains dans plusieurs directions serait difficile à effectuer, ou du moins pas « naturel ». Finalement, les variations de pression semblent faciles à effectuer ($mean_{QT2} = 5.89$, $\sigma_{QT2} = 0.30$) et intuitives ($mean_{QT1} = 5.63$, $\sigma_{QT1} = 0.42$) pour les utilisateurs. Par conséquent, l'augmentation du nombre d'interfaces bénéficiant de cette modalité d'entrée pourrait être intéressante, du fait qu'elle semble être perçue comme « naturelle » par les utilisateurs.

Les résultats obtenus dans cette étude peuvent être intéressants pour la conception de nouvelles interfaces utilisateurs 3D. En effet, durant la manipulation d'un objet 3D, l'analyse de la pression appliquée pourrait permettre d'affiner les données d'entrées. La prise en compte des variations de pression pourrait permettre de lever des ambiguïtés générés par la projection d'un espace 3D sur un espace 2D. Par exemple, dans le cas où un geste 2D est appliqué du bas vers le haut, nous pourrions définir si l'objet doit se déplacer vers le haut ou vers le fond. L'analyse des variations de force proposée dans ce chapitre pourrait donc résoudre ce type d'ambiguïtés.

4.3 Conclusion, limitations et travaux futurs

Ce travail présente de nouveaux résultats concernant le contrôle de la force normale de manière continue durant un geste, à un niveau sensori-moteur dans un premier temps, et dans le cas particulier de la manipulation d'objets 3D dans un deuxième temps. À un niveau sensori-moteur, nous montrons que :

- la direction du geste impacte la pression moyenne,
- les utilisateurs sont capables d'appliquer des pressions faibles et élevées quand ils déplacent leur doigt sur une surface, et ils peuvent reproduire la quantité de force appliquée d'un essai à l'autre,
- les utilisateurs sont capables de faire varier la pression linéairement pour des variations positives et négatives,
- les utilisateurs tendent à appliquer « *naturellement* » des pressions constantes.

De plus, nous proposons une façon de distinguer les variations de pression intentionnelles de celles involontaires. De ces résultats, nous avons conçu une deuxième étude pour déterminer comment les utilisateurs tendent « *naturellement* » à interagir avec du contenu 3D à partir de gestes 2D. Les résultats montrent que :

- l'analyse des moyennes de pression ne permet pas de distinguer ni les rotations, les translations et les changements d'échelle que les utilisateurs souhaitent effectuer, ni la profondeur de l'objet manipulé,
- l'analyse des variations de pression met en avant la corrélation qui existe entre les gestes des utilisateurs et les translations et rotations qu'ils souhaitent effectuer,
- les utilisateurs ne tendent pas à faire varier la pression de manière significative pour les opérations de changements d'échelle.

Ces deux études ont pour but d'aider à la conception de nouvelles interfaces utilisateurs basées sur la combinaison des gestes effectuées sur une surface et de la force normale. Par exemple, les techniques basées sur le contrôle linéaire de la pression durant les mouvements du doigt semblent prometteuses et pourraient être utilisées dans divers contextes, tels que l'association d'une action et d'une sélection, comme proposé par [RB07]. Cela pourrait également permettre de minimiser la quantité d'information affichée sur l'écran, en associant par exemple plusieurs actions à des widgets basés sur des mouvements [Mos09]. De la même manière, la façon dont les utilisateurs tendent « *naturellement* » à interagir avec des objets 3D affichés sur un écran tactile peut mener au développement de nouvelles interfaces utilisateurs 3D plus adaptées aux utilisateurs. En effet, nous avons montré que l'analyse des variations de pression peut grandement améliorer la compréhension des actions que les utilisateurs souhaitent appliquer. Ainsi, cette modalité d'entrée ouvre de nouvelles perspectives pour des techniques d'interaction basées sur la pression.

Bien que ces études répondent à des premières questions à propos de l'utilisation de la force normale durant un geste, plusieurs questions restent en suspens. Par exemple, des investigations au niveau sensori-moteur pourraient être effectuées afin d'évaluer comment le doigt utilisé (*e.g.*, le pouce et l'index) et le nombre de doigts utilisés impactent les variations de force, et comment la pression est répartie sur chaque doigt. Dans le contexte de la 3D, il pourrait être intéressant de caractériser de manière plus précise la capacité des utilisateurs à effectuer des gestes orientés en profondeur. Par exemple, une expérience pourrait être menée pour déterminer le nombre maximal de vecteurs 3D orientés en profondeur qui peuvent être distingués à partir de gestes 2D utilisant la force normale. De plus, il pourrait être intéressant de mener des recherches dans d'autres tâches impliquant des notions de profondeur, telles que la navigation dans un environnement 3D ou la création de formes 3D.

Troisième partie

Techniques d'interaction et
usages

Création d'un widget de manipulation d'objets 3D

Dans la partie précédente, nous avons étudié le comportement naturel des utilisateurs dans le but de créer des interfaces qui leur soit adaptées. Dans ce chapitre, nous nous appuyons sur certains résultats provenant de l'état de l'art et de certains résultats exposés dans cette thèse pour la conception d'un outil adapté aux utilisateurs.

Comme indiqué dans l'état de l'art, depuis l'introduction de « Skitters and Jacks » [BS86], les widgets de transformations 3D sont utilisés pour la manipulation d'objets 3D. Ces interfaces utilisateurs (UI) ont été principalement conçues pour des systèmes basés sur la souris et le curseur, où l'utilisateur bénéficie d'un pointage précis, une interaction à distance, d'une vue de l'écran sans obstruction et d'un accès direct à de nombreux boutons et raccourcis. Or, les écrans tactiles n'ont aucune de ses qualités [Mos09]. Par conséquent, des widgets de transformations 3D adaptés aux écrans tactiles ont besoin d'être conçus. Comme exposé dans la section 2.2.1, certains chercheurs ont exploré les contrôles multipoints où plusieurs degrés de libertés (DDL) peuvent être contrôlés simultanément. Notre approche est différente et complémentaire. Nous avons conçu un widget de transformations 3D, appelé *tBox*, adapté aux surfaces tactiles. Il permet un contrôle direct et indépendant de neuf DDL (trois translations, trois rotations et trois mises à l'échelle).

Pour concevoir ce widget, nous avons initialement observé des utilisateurs interagissant sur une surface tactile avec les widgets de transformations standards, initialement conçus pour la souris (cf. Figure 5.1(a)). Les principales conclusions de cette étude préliminaire indiquent que la sélection des éléments graphiques permettant le contrôle des DDL est difficile dès que la projection sur l'écran de l'élément à sélectionner est proche de la projection d'un autre élément. Ce cas est très fréquent, en particulier, quand tous les éléments graphiques associés à chaque DDL sont affichés simultanément. De

plus, nous avons observé que les utilisateurs sont parfois perturbés par des problèmes d’occultation et d’ergonomie, leur imposant de réfléchir à la façon dont leur main est positionnée. Finalement, nous avons noté qu’il est difficile pour eux d’appliquer une succession de gestes successifs faciles et brefs avec cette interface. Ce type de gestes est commun à diverses applications sur surfaces tactiles (par exemple, pour les applications sur périphériques mobiles). Ainsi, le caractère tactile et multipoints n’est pas exploité avec les widgets standards. Par conséquent, nous explorons une approche alternative pour la conception de *tBox*. Les déplacements précis et de faible amplitude de la souris sont remplacés par des entrées correspondant au paradigme tactile.

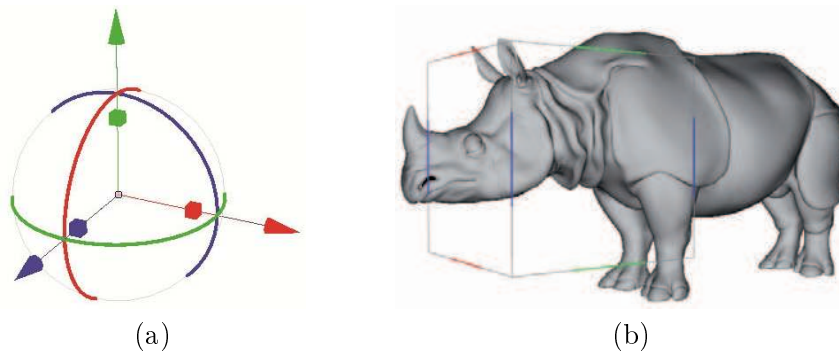


FIGURE 5.1: Widget standard de transformations 3D utilisé dans les logiciels de modélisation 3D tels que Blender [Ble] et Maya [Aut] (a) et *tBox* (b) pour le contrôle de neuf degrés de liberté.

5.1 Conception

Le widget *tBox* apparaît comme une boîte en fil de fer, où seules les arêtes avant sont visibles (cf. Figure 5.1(b)). Les rotations sont exécutées par des gestes physiquement plausibles, les translations s’appuient sur la sélection des arêtes du cube et les mises à l’échelle tirent profit des entrées tactiles à deux doigts. Cette conception favorise un accès direct à tous les DDL, en gardant une séparation des actions à appliquer. De façon similaire aux widgets de transformations standards, *tBox* est toujours visible à l’écran, celui-ci étant affiché devant l’objet à manipuler. Les transformations appliquées à l’aide de *tBox* sont directement appliquées sur l’objet à manipuler. La forme de boîte a été choisie pour deux raisons principales. Premièrement, il s’agit d’une forme 3D élémentaire qui apportent des affordances visuelles aidant à interagir avec de façon « naturelle » (cf. Chapitre 3). Deuxièmement, cette forme améliore la sélection des axes par les doigts. Ceci sera expliqué de manière détaillée par la suite. Des widgets basés sur une forme de boîte ont déjà été utilisés précédemment dans des contextes de bureau standard (par exemple, [Hou92] et le manipulateur universel de Maya). Dans notre

approche, nous avons introduit de nouveaux mécanismes dans le but d'améliorer l'interaction quand l'utilisateur interagit directement sur l'écran, avec leurs doigts.

5.1.1 Rotation

Nous avons observé dans l'étude préliminaire qu'une des difficultés principales rencontrées lors de l'utilisation des widgets standards sur surfaces tactiles vient du contrôle des rotations. Nous nous sommes donc premièrement intéressés à la manipulation de ces DDL. Étant donné que les mouvements basés sur des comportements physiques paraissent être convaincants sur surfaces tactiles, nous avons abordé une approche où les utilisateurs font tourner le widget comme il le ferait avec un cube réel. Ainsi, nous nous intéressons aux résultats présentés dans la section 3.1.

De manière intéressante, nous avons obtenu des gestes comparables d'un sujet à l'autre, et d'un point de vue à l'autre. De ces résultats, nous avons fait deux principales observations. Premièrement, quand elles sont visibles, les arêtes intérieures apparaissent comme des références visuelles avec lesquelles les utilisateurs interagissent. Par conséquent, ces arêtes devraient être prises en compte en priorité par rapport aux autres arêtes dans l'algorithme de rotations. Deuxièmement, nous avons observé que deux stratégies étaient utilisées pour faire tourner le cube. Dans certains cas, les sujets ont suivi l'orientation 3D de la face touchée, comme s'ils *saisissaient* le cube. dans d'autres cas, ils suivent une direction qui est tangente à la rotation, au niveau de l'arête ciblée. Cela correspond à une stratégie de *poussée*, où l'énergie est minimisée. Notons que ce travail a été réalisé avant l'étude approfondie sur les gestes pour manipuler un cube suivant les rotations, les translations et les changements d'échelle (section 3.2).

A partir de ces résultats, nous avons conçu l'algorithme de rotation qui suit. Dès qu'un mouvement de doigt est détecté (c'est-à-dire un déplacement, que nous avons défini à 50 millimètres), nous calculons le vecteur de mouvement du doigt \vec{v} dans l'espace écran. Si le prolongement de \vec{v} intersecte la projection dans l'espace écran de l'arête intérieure au point I, nous évaluons si la projection 3D de \vec{v} sur le cube est tangent à la rotation correspondante (cf. figure 5.2(a)), ou si \vec{v} est aligné avec la ligne tangente (T_I) au point I (cf. figure 5.2(b)). Si l'une des conditions est vérifiée, alors la rotation correspondante commence. Sinon, nous regardons si des conditions similaires sont vérifiées pour une arête extérieure croisée par la trajectoire du doigt. Notons que nous augmentons la longueur des arêtes quand nous calculons l'intersection. Les utilisateurs n'ont donc pas besoin de croiser exactement les arêtes du cube. Quand la boîte est presque alignée avec la direction de la vue, nous considérons aussi les arêtes orientées vers la profondeur qui ne sont pas visibles, comme illustré sur la figure 5.2(c).

Pour faire tourner le cube, les utilisateurs le « poussent » ou le « sai-

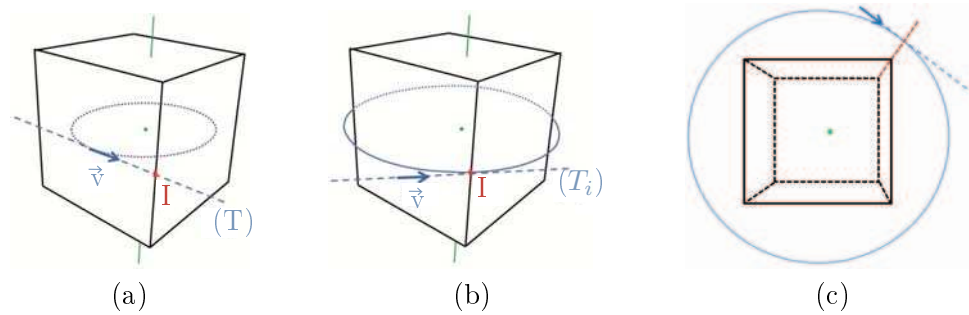


FIGURE 5.2: Algorithme permettant la déduction des axes de rotations à partir du commencement du geste pour les stratégies *Saisir* (a) et *Pousser* (b). Les arêtes invisibles sont prises en compte lorsque l'orientation est alignée avec la vue, ou presque (c).

« sissent » par des gestes droits. Techniquement, une fonction linéaire est appliquée entre les gestes des utilisateurs et les rotations du *tBox*. De plus, des gestes rapides et brefs induisent des rotations qui continuent suivant une force d'inertie, et se stoppent après un certain temps en attendant que la vitesse diminue ou lorsque l'utilisateur tape le cube. Ces gestes permettent à l'utilisateur de rapidement spécifier des orientations approximatives du cube. Les gestes continus et plus lents permettent de raffiner les rotations. Cette approche correspond à une extension 3D de ce qui a été fait sur les périphériques mobiles à écrans tactiles (par exemple, défilement dans une liste de numéros de téléphone). De plus, en utilisant deux mains sur les deux côtés du cube, les utilisateurs peuvent ajuster les angles de rotations par des gestes successifs, tout en visualisant l'objet manipulé. La figure 5.3 illustre une rotation avec *tBox*.

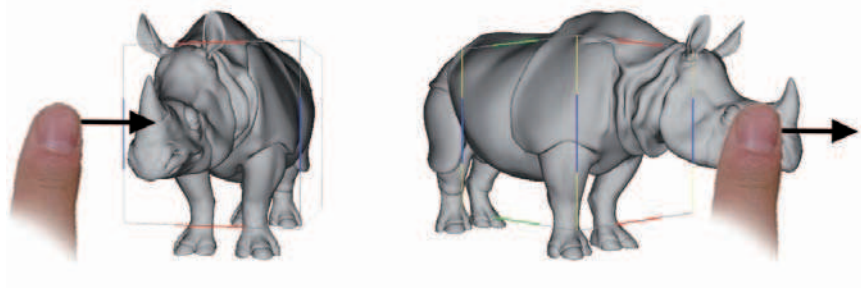


FIGURE 5.3: Rotation via le widget *tBox*.

5.1.2 Translation

Afin de séparer de manière distincte les translations des rotations, nous avons basé l'activation des translations sur la sélection précise des arêtes de *tBox*. Pour appliquer une translation suivant un axe primaire, l'utilisateur sélectionne un segment coloré qui est centré sur une des arêtes du *tBox* correspondant à l'axe. Comparé aux widgets de transformations 3D standards basés sur des triplets de flèches, une forme de boîte est utile pour des entrées tactiles. En effet, les composants visuels à attraper sont disposés autour de la zone d'intérêt que constitue l'objet manipulé, ce qui permet de limiter les problèmes de sélection liés à l'importance de la taille du doigt (cf. figure 5.4). De plus, deux à trois arêtes par direction peuvent être facilement sélectionnées (excepté quand le cube est face à la direction de la vue). Par conséquent, les utilisateurs peuvent choisir la meilleure arête à sélectionner pour éviter les problèmes d'occultation et les problèmes liés à des considérations ergonomiques. Au-delà des translations selon un axe, *tBox* est également conçu pour favoriser les interactions multipoints. D'une part, en enchaînant les opérations de translations avec deux ou trois doigts, les utilisateurs peuvent rapidement atteindre la localisation 3D qu'ils souhaitent atteindre par des raffinements successifs le long des axes primaires. D'autre part, les gestes à deux doigts, dont chacun est positionné sur l'arête d'une même face, permet d'effectuer des translations dans le plan contenant les deux arêtes sélectionnées. Un *double-tap* sur une arête avec le second doigt, peut également être utilisé pour que les mouvements du premier doigt correspondent à la translation dans le plan défini par la face. Ainsi, le mode *translation dans le plan* peut être contrôlé par un doigt.



FIGURE 5.4: La sélection de l'axe peut être difficile à effectuer avec un widget standard de translation (a). Un widget cubique permet une sélection plus facile car chaque axe de transformation est représenté par plusieurs arêtes du cube, évitant les problèmes de sélection dus à la superposition de la projection des axes (b).

Les premières expériences avec *tBox* ont montré que les gestes de rotations provoquaient des translations non souhaitées, quand le geste commençait involontairement sur une arête du *tBox*. Par conséquent, nous avons introduit un nouveau mécanisme pour prévenir ces erreurs. Pour débiter

une translation le long d’un axe, l’utilisateur touche le segment coloré correspondant. Cependant, le mode translation n’est pas activé directement. En effet, le segment coloré est transformé en un widget 3D correspondant à un cylindre centré sur le segment actif, qui peut être glissé le long de ce dernier. Le mode translation et, par conséquent, la translation réelle de l’objet manipulé commence quand le cylindre entre en collision avec les coins de l’arête du widget *tBox*, comme illustré dans la figure 5.5. Ce principe s’inspire du widget de l’iPhone d’Apple [App] pour déverrouiller le téléphone, et des travaux de Moscovich dans un contexte 2D [Mos09]. Des tests informels ont validé le fait que les widgets coulissants 3D rendent l’interface de rotations plus robuste. Notons que lorsque plusieurs translations se suivent, le widget coulissant est utilisé pour activer la première translation uniquement.

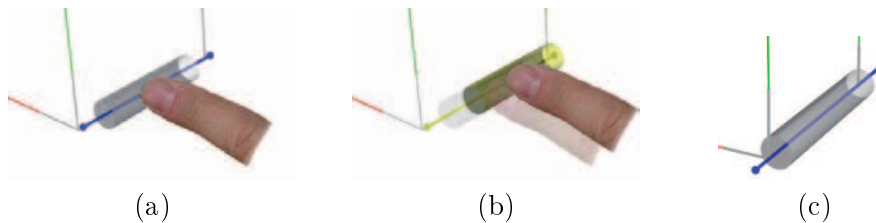


FIGURE 5.5: Un widget coulissant apparaît sur l’arête quand un segment coloré de cette dernière est touché (a). La translation commence lorsque le widget coulissant entre en contact avec un coin de l’arête (b). Lorsque la taille de la projection d’une arête est trop petite, la taille du widget coulissant est plus grande que l’arête (c).

5.1.3 Changement d’échelle

Pour les opérations de changements d’échelle, *tBox* s’appuie sur la métaphore de pincement et d’écartement de deux doigts utilisée pour le changement de taille des objets 2D. Cette métaphore 2D a pour avantage d’apporter un lien sémantique fort entre le geste de l’utilisateur et l’action résultante. Dans notre approche, ces gestes effectués à l’intérieur ou de part et d’autre de *tBox* impliquent un changement d’échelle uniformes du *tBox*, et donc de l’objet attaché aussi (cf. figure 5.6). En plus des changements d’échelle uniforme, les changements d’échelles bi-directionnelles le long des trois axes primaires de *tBox* peuvent être contrôlés en sélectionnant deux arêtes opposées d’une face, et en les déplaçant dans des directions opposées pour des changements d’échelles symétriques. Si un doigt se déplace alors que le second reste statique, alors l’objet manipulé s’étend dans la direction du doigt en déplacement (cf. figure 5.6).

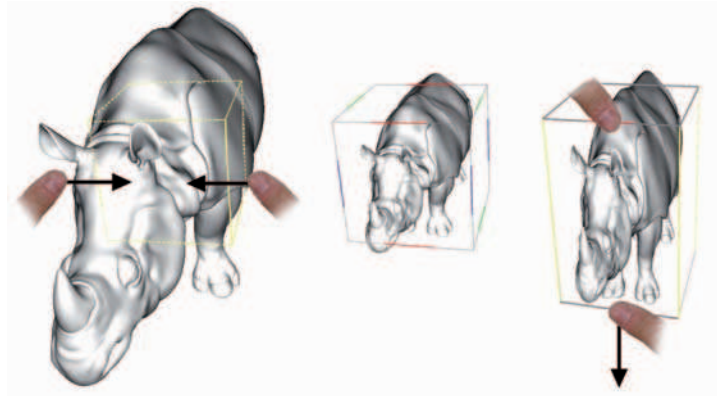


FIGURE 5.6: Un geste de pincement effectué de part et d'autre du widget *tBox* (gauche) diminue la taille de l'objet manipulé (milieu). Le déplacement de deux arêtes d'une face de *tBox* permet de contrôler un changement d'échelle suivant un axe (droite).

5.1.4 Caractéristiques supplémentaires

Pour certaines orientations de *tBox*, les projections de certaines arêtes sont proches les unes des autres, ce qui mène à des sélections difficiles. Par conséquent, nous calculons dynamiquement les arêtes qui peuvent être sélectionnées, et les mettons en avant avec des segments colorés, comme cela est fait avec la plupart des widgets de manipulations 3D. De façon concrète, quand les projections du milieu de deux arêtes sont situées à une distance plus petite que la zone de contact du doigt, nous gardons uniquement celle qui est la plus proche de l'observateur. Ainsi, une grande zone de tolérance peut être maintenue autour des arêtes, assurant ainsi une sélection facile sur écrans tactiles. Notons que lorsqu'une arête n'est pas activée, l'axe primaire correspondant peut toujours être accessible par une autre arête (par exemple, l'axe rouge sur la figure 5.7). De plus, les arêtes dont les projections sont trop petites sont désactivées pour prévenir des translations imprécises dans la profondeur.

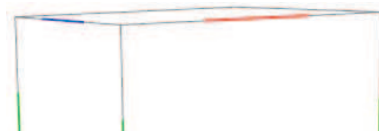


FIGURE 5.7: Les arêtes du fond étant projetées à proximité des autres arêtes, elles sont désactivées afin d'éviter des erreurs de sélection.

Nous avons ajouté un mécanisme de sélection et désélection pour chan-

ger l’objet attaché au widget. Pour cela, l’utilisateur doit double-cliquer sur l’objet. De plus, les tâches de manipulation requièrent d’importants changements de modes entre le mode de transformations appliquées sur l’objet et le mode de contrôles du point de vue. Ainsi, nous avons mis en place des contrôles caméra, inspirés de précédentes études [ZFS97].

Des gestes à deux doigts de pincement et d’écartement effectués en dehors du widget permettent de zoomer et dézoomer (cf. Figure 5.8(a)). Selon Wobbrock *et al.* [WMW09], des modèles mentaux similaires émergent pour les actions d’élargissement et de maximisation d’une part, et pour celles de rétrécissement et de minimisation d’autre part. De la même façon, l’utilisation de gestes similaires pour les opérations de zoom et de changements d’échelle unifie et limite l’ensemble de gestes.

Le déplacement sur la surface de deux doigts à proximité l’un de l’autre se déplaçant de manière mutualisée permet d’effectuer une translation de la caméra dans le plan de l’écran (cf. Figure 5.8(b)). Ces gestes sont habituellement utilisés pour les défilements horizontaux et verticaux avec des trackpads multipoints. De la même manière que précédemment, un modèle mental similaire étant associé aux actions de déplacements de la caméra et de déplacements d’un objet dans le plan de l’écran, toutes ces actions sont effectuées à partir de gestes similaires.

Pour finir, l’orientation de la vue autour d’un point de la scène peut être contrôlée à partir d’un doigt statique définissant le point de pivot et d’un doigt en déplacement définissant le déplacement. Cette approche à deux doigts est particulièrement intéressante pour ajuster la vue pendant la translation d’un objet. En effet, un doigt de la main dominante peut rester en contact avec l’écran pour effectuer une translation de l’objet, tandis que la main non-dominante peut être utilisée lorsque l’utilisateur souhaite repositionner la caméra en conséquent. Des études menées par Guiard [Gui87] et par Balakrishnan et Kurtenbach [BK99] ont démontré le bénéfice de tels contrôles bi-manuels pour des tâches d’interaction 3D.

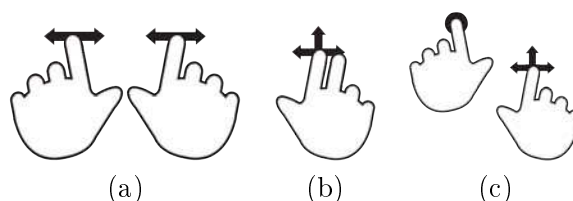


FIGURE 5.8: Gestes pour le contrôle de la caméra : zoom (a), déplacement de la vue dans le plan de l’écran (b) et rotation de la vue autour d’un point de la scène (c). Illustrations issues de *Touch Gesture Reference Guide*, <http://www.lukew.com/touch/>

5.2 Bilan

5.2.1 Premier retours utilisateurs

Nous avons conduit une étude informelle avec huit participants. Quatre d'entre eux n'étaient pas habitués à la modélisation 3D, tandis que les quatre autres étaient des experts 3D. Nous avons demandé aux participants d'utiliser l'interface, sans but précis. La scène expérimentale était composée de divers objets qui peuvent être assemblés ensemble pour la création d'un personnage (cf. figure 5.9). Nous avons demandé aux participants de penser à haute voix et les avons informé qu'ils pouvaient contrôler des translations, des rotations et des changements d'échelles, ainsi que le point de vue de la caméra par des gestes. Cependant, nous ne leur avons pas expliqué comment faire.

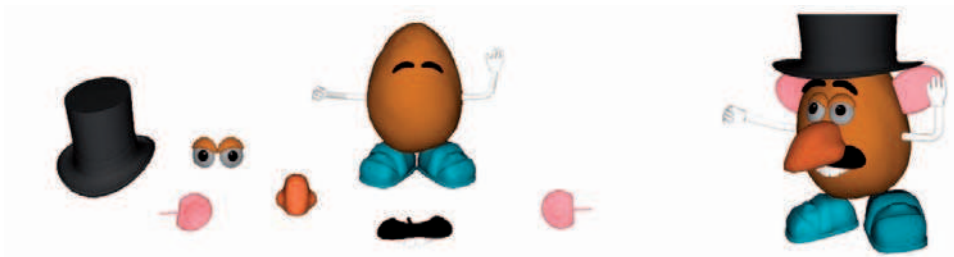


FIGURE 5.9: Environnement expérimental.

D'une part, nous avons observé que les participants découvraient la plupart des fonctionnalités par eux-mêmes très rapidement. Cela confirme que les affordances apportées par le widget permettent une bonne compréhension de ces fonctionnalités. De plus, les gestes à plusieurs doigts paraissent être connus comme des gestes standards par les participants, même pour ceux qui ne sont pas familiers avec les systèmes tactiles. Notons qu'aucun des participants n'a découvert le mode du paramètre avancé *translation dans le plan*. Les utilisateurs, à la fois novices et experts, ont réussi à assembler le personnage comme ils le souhaitaient. D'autre part, les participants ont signalé qu'ils aimaient le mécanisme de rotation basé sur des comportements physiques et qu'ils réussissaient à appliquer des rotations comme ils le souhaitaient. Nous avons également observé que l'activation des translations et des changements d'échelles avaient été effectuées sans difficulté. Pour finir, aucun des sujets n'a semblé perturbé par les widgets coulissants, ce résultat étant bénéfique puisque ce mécanisme prévient des activations erronées.

Nous avons ensuite demandé aux utilisateurs novices de construire le même personnage avec le logiciel de modélisation Blender [Ble] à partir d'une station de travail standard, et en leur ayant indiqué comment procéder au

préalable. Les participants ont reporté qu’ils préféraient l’utilisation de *tBox* car l’accès direct à chaque fonctionnalité leur permet de rester concentrés sur leur tâche principale. La moitié de ces utilisateurs ont également reporté que la forme de boîte les aidait à « mieux comprendre la perspective ».

5.2.2 Un widget adapté aux surfaces tactiles

Ce widget a été conçu pour la manipulation d’objets 3D via des surfaces tactiles. Les dispositifs tactiles ayant des avantages et des inconvénients qui leur sont propres, nous avons conçu ce widget de telle façon à respecter leurs avantages et à minimiser leurs inconvénients. Ainsi, *tBox* est :

- **sans boutons, ni menus.** Les tâches de manipulations 3D requièrent d’importants changements de modes. Par exemple pour les configurations bureautiques standards, les utilisateurs expérimentés changent de modes entre les translations, les rotations et les changements d’échelles par l’intermédiaire de raccourcis clavier, et changent de mode entre les différents contrôles caméra via les boutons de la souris. A l’opposé, un principe de l’interaction tactile est de supprimer tous les boutons physiques, afin de laisser les utilisateurs interagir directement sur les écrans tactiles. Les changements de mode pourraient être opérés par l’intermédiaire de menus, de techniques d’émulation de la souris [MGLF09] ou de langages de gestes [RSB08]. Cependant, ces approches amenant une indirection, elles tendent à diviser l’attention de l’utilisateur entre les transformations et les opérations requises pour contrôler le système. Ainsi, dans notre approche, tous les contrôles sont accessibles de manière directe, avec un faible temps d’apprentissage.
- **fiable en terme de sélection.** L’interaction à l’aide d’une souris ou d’un stylet permet une sélection précise et rapide des petits éléments visuels sur des écrans distants. Par conséquent, les widgets de transformations 3D reposent sur cet avantage. De façon opposée, la sélection via une surface tactile est imprécise due à l’importance de la taille du doigt [VB07]. Les widgets de transformations 3D existants sont donc inadaptés aux surfaces tactiles. Ainsi, nous avons conçu *tBox* de telle façon à éviter les erreurs de sélection (cf. Section 5.1.4).
- **adapté pour éviter les problèmes d’occultation.** Les utilisateurs occultent l’écran avec leurs mains et leurs doigts lorsqu’ils interagissent de manière directe avec un écran tactile. En effet, les widgets de transformations 3D existants sont généralement positionnés au centre de l’objet manipulé, ce qui induit des occultations sur la principale zone d’intérêt. Le fait de pouvoir manipuler *tBox* à partir de plusieurs zones de l’écran permet aux utilisateurs de choisir la configuration optimale pour minimiser l’occultation lors de l’interaction.

- **direct au niveau de l'interaction.** Avec une correspondance directe entre la position des doigts et les mouvements du curseur, les approches tactiles directes semblent plus « *naturelles* » que les approches indirectes. Pour bénéficier de cet avantage, nous avons favorisé les interactions où l'objet reste colocalisée avec les doigts de l'utilisateur, tels que dans les transformations de widget couramment employés à la souris.
- **multipoints.** Le caractère multipoints des surfaces tactiles apportent de nombreux avantages. Comme suggéré par Wobbrock *et al.* [WMW09], les entrées symétriques multipoints semblent particulièrement bien adaptées pour les opérations de zoom et de redimensionnement. Ainsi, *tBox* intègre cet avantage (cf. Section 5.1.4). De plus, il favorise l'enchaînement de certaines opérations, du fait que les doigts peuvent être utilisés de manière séquentielle pour affiner successivement différents DDL (cf. Section 5.1.2).

5.2.3 Conclusion

Les widgets de transformations 3D ont montré des bénéfices indéniables pour l'interaction avec une souris et un clavier. Malheureusement, ces UI souffrent d'une utilisabilité limitée sur un écran tactile, les contraintes étant différentes selon le périphérique. Ainsi, de nombreuses applications s'appuyant sur ces UI sont exclues de l'évolution des systèmes interactifs vers le tactile. Dans ce chapitre, nous avons présenté un widget de transformations 3D adapté au paradigme tactile, inspiré de ce qui a été appris ces dernières années dans le domaine de l'interaction 2D tactile. Le widget *tBox* est une nouvelle UI qui favorise le contrôle indépendant de 9 DDL, et qui est complémentaire aux autres techniques d'interaction multipoints existantes (*e.g.*, [RDH09, HCC07]).

Des études préliminaires ont montré que *tBox* peut être facilement utilisé par des experts, mais également par des novices, pour des tâches de manipulations 3D sur surfaces tactiles. Des études utilisateurs complémentaires ont besoin d'être conduites pour mieux comprendre les performances des utilisateurs, en particulier pour des tâches 3D précises, entièrement contrôlées. Il pourrait également être intéressant de comparer les performances et le confort d'utilisation d'un tel widget avec un ensemble de gestes créé à partir d'une étude *a priori* du comportement « *naturel* » des utilisateurs, telle que celle décrite dans la section 3.2. Ces travaux ont donné lieu à une publication à CHI [CDH11]. Récemment, Bollensdorff *et al.* [BHA12] se sont appuyés sur ces travaux pour la conception d'un widget de forme cubique adapté aux surfaces tactiles.

Usages et applications

Dans les chapitres 3 et 4, nous nous sommes intéressés à des études *a priori*, c'est-à-dire dont le but est de comprendre l'utilisateur afin de concevoir des interfaces qui leur soient le plus adaptées possibles. Dans le chapitre précédent, nous avons conçu une technique d'interaction pour la manipulation d'objets 3D via un écran tactile « standard », en prenant en compte les résultats d'études *a priori* effectuées dans un contexte bidimensionnel, mais également les résultats d'une étude préliminaire élaborée dans le cadre de cette thèse (cf. Section 3.1). Ici, nous nous intéressons à des études *a posteriori*, c'est-à-dire à l'évaluation d'interfaces en terme d'usages et d'applications. Ces études ont pour but d'évaluer une ou plusieurs interfaces en terme de performance ou de confort d'utilisation.

Dans un premier temps, nous nous intéresserons à diverses évaluations d'un système associant les bénéfices de l'interaction colocalisée et de la stéréoscopie, appelé *Toucheo* (cf. Section 6.1). Puis, dans un deuxième temps, nous présenterons une étude permettant la comparaison de périphériques dans le contexte de l'observation d'un objet (cf. Section 6.2).

6.1 Évaluation d'un périphérique

Dans le cadre de *Toucheo*, les travaux effectués dans cette thèse concernent principalement son évaluation. Afin de comprendre le contexte, nous présenterons donc tout d'abord le périphérique, avant de définir le protocole et de présenter les résultats de cette étude.

6.1.1 Présentation

Dans le cadre du projet InSTInCT, un système permettant de combiner les avantages de l'affichage stéréoscopique et de l'interaction colocalisée a été conçu. Ce système associe des interactions directes et multipoints avec une visualisation 3D stéréoscopique. Ainsi, les utilisateurs bénéficient d'une

visualisation immersive des données tout en étant capable d'interagir, à la fois avec des éléments 2D et 3D, grâce à des widgets et métaphores 2D tactiles dans un espace de travail homogène. La Figure 6.1 illustre cet espace de travail, où un utilisateur manipule un objet 3D stéréoscopique depuis des gestes 2D appliqués sur une surface tactile.

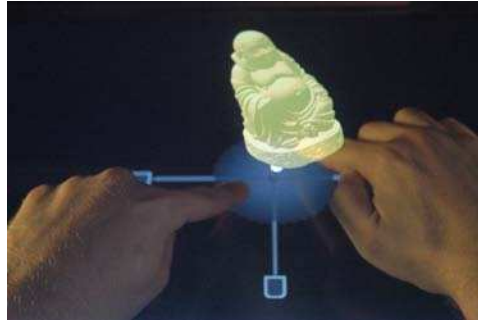


FIGURE 6.1: Des objets stéréoscopiques 3D et du contenu monoscopique 2D sont combinés dans un même espace de travail

Le dispositif s'appuie sur un écran tactile sur lequel les utilisateurs visualisent et interagissent avec du contenu monoscopique. La visualisation stéréoscopique provient d'un second écran, 3D, qui est suspendu à l'envers en haut du système. L'affichage est reflété par un miroir semi-transparent situé entre la tête de l'utilisateur et l'écran tactile (cf. Figure 6.2). Ainsi, les objets stéréoscopiques sont perçus comme s'ils étaient affichés au-dessus des mains, entre le miroir et l'écran tactile. Quant au détecteur de position de tête, il assure une parallaxe physiquement correcte pour tous les objets réels ou virtuels dans l'espace de travail.

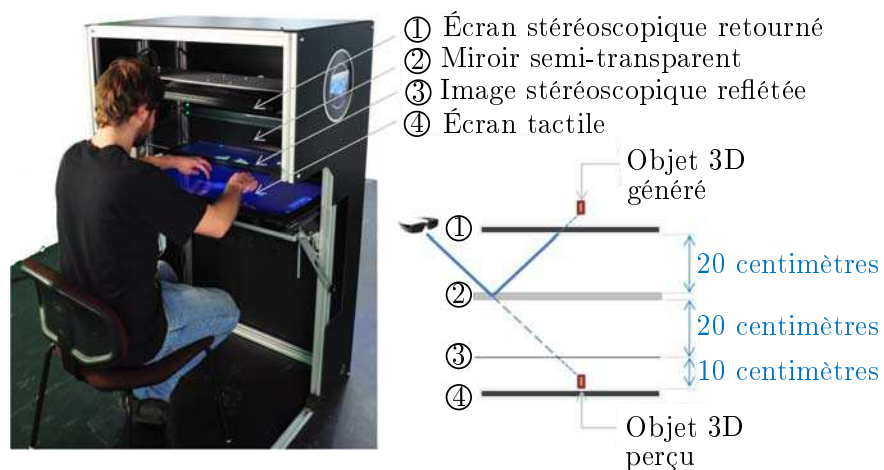


FIGURE 6.2: Description de l'interface.

Un widget de transformation 3D a été conçu pour pouvoir interagir avec les objets stéréoscopiques, à partir de l'écran tactile. Ce widget est composé d'un disque central et de contrôleurs virtuels supplémentaires (cf. figure 6.3). Les gestes à deux doigts sur le disque central du widget impliquent des rotations, translations et changements d'échelle sur le plan parallèle à l'écran tactile (plan $x-y$). Les rotations selon x et y sont contrôlées par des tiges virtuelles situées sur les côtés du disque. Les doigts qui croisent la tige provoque une rotation inertielle autour de l'axe de la tige, permettant le contrôle d'un seul degré de liberté sans affecter les autres. De façon similaire, les widgets de changements d'échelle permettent le contrôle des facteurs d'échelle selon x et y . Pour les translations et les changements d'échelles en z , nous utilisons une approche inspirée de la métaphore du ballon [BF07]. L'utilisateur touche le centre du disque avec un doigt, et ajuste ensuite la hauteur et la taille avec un second doigt. Ainsi, les utilisateurs peuvent contrôler neuf degrés de libertés (ainsi que le changement d'échelle uniforme) de l'objet 3D manipulé. De plus, deux widgets peuvent être contrôlés avec une main chacun pour la manipulation simultanée de divers objets.

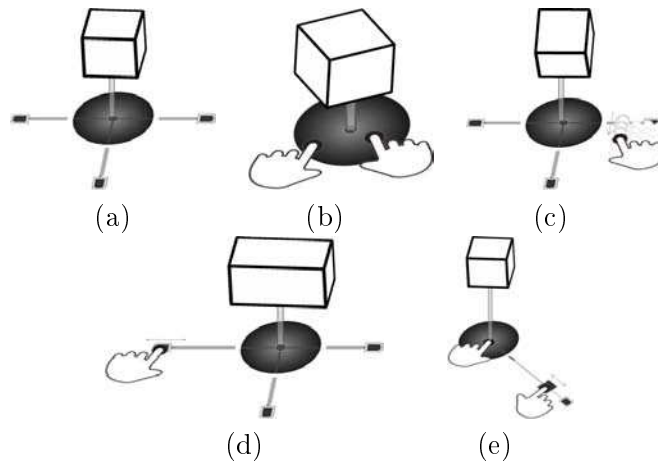


FIGURE 6.3: Définition des gestes permettant d'interagir avec le widget de transformation proposé. (a) Le widget est affiché sur l'écran tactile, sous l'objet flottant. Un rayon virtuel fait la liaison entre l'objet et le widget. (b) Un ou deux doigts sur le disque central permettent d'utiliser la technique *RST* dans le plan $x-y$. (c) Des baguettes virtuelles sont utilisées pour les rotations autour des axes x et y . (d) Les changements d'échelle en x et en y sont contrôlés à partir de widgets dédiés. (e) Quand le centre du disque est touché, un widget permettant d'effectuer des translations et des changements d'échelle selon l'axe z apparaît.

Pour plus de détails sur la conception de cette interface, vous pouvez vous référer à la publication correspondante [HBCR11].

6.1.2 Premiers retours utilisateurs

Afin d’obtenir des premiers retours utilisateurs concernant le système proposé, nous avons conduit une étude informelle. Seize volontaires (treize hommes et trois femmes, de 27 ans en moyenne) ont participé à cette étude. Ils étaient tous habitués ni à la visualisation stéréoscopique, ni à l’interaction sur des écrans tactiles de grande dimension. La tâche consiste à positionner un objet selon neuf degrés de liberté (trois translations, trois rotations, trois changements d’échelle), comme illustré sur la Figure 6.4. Notons que nous ne nous sommes pas concentrés sur une manipulation précise dans cette étude préliminaire. Chaque participant devait réaliser la tâche cinq fois avec différentes tailles, orientations et emplacements. Avant de commencer, nous avons indiqué aux utilisateurs comment utiliser l’interface. L’expérience a duré entre 5 et 10 minutes par utilisateur. À la fin de celle-ci, il leur a été demandé de remplir un questionnaire composé d’affirmations à évaluer via une échelle de Likert à 5 niveaux et d’une section pour tout commentaire libre. Ce questionnaire permet d’évaluer l’appréciation générale des utilisateurs concernant le système, ainsi que la manipulation et la visualisation des différents éléments lors de l’interaction.

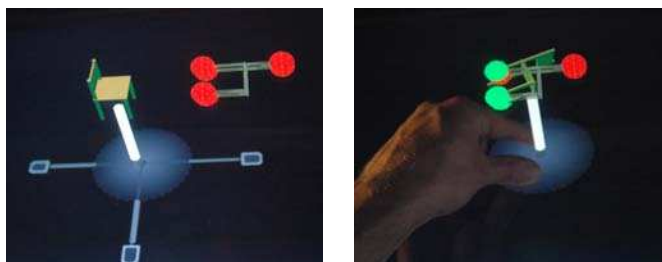


FIGURE 6.4: Tâche de positionnement 3D. Les sphères passent de la couleur rouge à verte lorsque l’alignement est correct pour une zone de tolérance définie.

Dans cette expérience, nous nous sommes intéressés au sentiment général des participants vis-à-vis du système en leur demandant d’évaluer les affirmations suivantes :

- J’ai aimé ce système. (A1.1)
- Ce système est intuitif. (A1.2)
- Je me suis senti(e) malade ou fatigué(e). (A1.3)
- J’avais une bonne perception de la profondeur. (A1.4)
- Je visualisais correctement les objets 3D. (A1.5)
- J’ai eu besoin de déplacer ma tête. (A1.6)

Les résultats indiquent que les participants ont généralement aimé le système ($mean_{A1.1} = 4.6$, $\sigma = 0.62$), et qu’ils l’ont trouvé intuitif ($mean_{A1.2} = 4.0$, $\sigma = 0.63$). De plus, presque aucun utilisateur ne s’est senti fatigué ou ma-

lade suite à l'utilisation du système proposé ($mean_{A1.3} = 1.1, \sigma = 0.25$). Concernant la perception, ils ont évalué leur perception de la profondeur et leur perception des objets 3D de manière très favorable ($mean_{A1.4} = 4.5, \sigma = 0.52$ / $mean_{A1.5} = 4.5, \sigma = 0.98$), même avec cet environnement expérimental basique (*e.g.*, sans intégration d'ombres pour augmenter la perception de la profondeur). Les résultats suggèrent également que les participants n'ont pas trouvé nécessaire de déplacer la tête pour observer la scène 3D ($mean_{A1.6} = 1.8, \sigma = 0.98$). En effet, ils ont eu tendance à garder une position de tête fixe, ceci étant certainement dû au fait que la tâche ne favorisait pas l'utilisation de mouvements amples de la tête.

Nous nous sommes également intéressés aux interactions entre la visualisation des objets flottants, les mains et le widget affiché sur l'écran tactile en leur demandant d'évaluer les affirmations suivantes :

- Je voyais bien mes mains. (A2.1)
- Je voyais trop mes mains. (A2.2)
- Je ne voyais pas assez mes mains. (A2.3)
- Mes mains ont perturbé la visualisation des objets 3D. (A2.4)
- Mes mains ont perturbé la visualisation de l'outil de manipulation 2D. (A2.5)

Les participants ont estimé qu'ils étaient capables de visualiser correctement leurs mains ($mean_{A2.1} = 4.6, \sigma = 0.63$), sans qu'elles ne soient trop prépondérantes ($mean_{A2.2} = 4.6, \sigma = 0.89$) ou pas assez ($mean_{A2.3} = 1.6, \sigma = 0.96$), et sans qu'elles ne perturbent la visualisation des objets 3D ($mean_{A2.4} = 1.4, \sigma = 0.50$) et des objets 2D ($mean_{A2.5} = 2.0, \sigma = 0.63$). Ces résultats tendent à montrer que la visualisation simultanée d'éléments réels et virtuels à des profondeurs différentes, ne perturbe pas les utilisateurs. Il serait donc intéressant dans de futures expérimentations, d'évaluer dans quelle mesure la visualisation simultanée de leurs mains et des environnements virtuels aiderait les utilisateurs à effectuer des tâches de manipulation 3D.

Concernant le widget et les métaphores de manipulation, nous avons demandé aux participants d'évaluer les affirmations suivantes :

- J'ai réussi à faire ce que je souhaitais. (A3.1)
- La technique *RST* était facile à utiliser. (A3.2)
- Les rotations dans le plan de l'écran étaient faciles à effectuer. (A3.3)
- Les changements d'échelles dans le plan de l'écran étaient faciles à effectuer. (A3.4)
- Les translations et les changements d'échelle suivant l'axe orthogonal au plan de l'écran étaient faciles à effectuer. (A3.5)

Les utilisateurs ont indiqué qu'ils étaient généralement capables de faire ce qu'ils souhaitaient ($mean_{A3.1} = 4.2, \sigma = 0.98$) et qu'il était plutôt facile d'utiliser l'interface *RST* ($mean_{A3.2} = 4.3, \sigma = 1.1$), et d'effectuer des rotations ($mean_{A3.3} = 4.0, \sigma = 1.03$) et des changements d'échelle ($mean_{A3.4} = 3.9, \sigma = 1.2$) dans le plan de l'écran. Cependant, les widgets

pour les transformations en z ont été perçus comme plus difficiles à utiliser ($mean_{A3.5} = 3.5, \sigma = 1.26$). Nous pensons que le fait que les mouvements des doigts étaient quelquefois stoppés par le bord de l'écran est l'une des raisons à cela. Pour résoudre cette limitation, nous avons par la suite remplacé les mouvements en z , initialement basés sur la métaphore du ballon [BF07], par des mouvements circulaires. En effet, ces mouvements ont pour avantage de pouvoir être effectués en boucle fermée [MLG10]. Après avoir sélectionné la tige dédiée, l'utilisateur peut tourner autour du centre du widget, comme il le ferait avec une manivelle, pour modifier le paramètre en z . Notons que les participants ont utilisé l'interface moins de dix minutes via le widget avant de l'évaluer, indiquant que l'utilisation du widget est relativement efficace suite à un temps d'apprentissage aussi court. Cette déduction nécessite toutefois d'être évalué de manière plus formelle dans des expériences complémentaires.

Les tâches de positionnement 3D sont généralement difficiles à effectuer du fait de la difficulté à bien percevoir la structure 3D des objets et leur positionnement relatif, mais également de la difficulté à contrôler neuf degrés de liberté. Avec le système proposé, l'évaluation suggère que les participants ont rencontré peu de problèmes de perception et qu'ils ont globalement réussi à faire ce qu'il souhaitait via les widgets associés, qu'ils ont estimé faciles à utiliser.

6.1.3 Bilan

Dans les commentaires libres du formulaire de l'expérience utilisateurs, des participants ont souligné que l'environnement global était trop sombre. En effet, la lumière venant de l'écran stéréoscopique est atténuée par la réflexion du miroir semi-transparent, ainsi que par les lunettes requises pour visualiser la stéréo. Pour des futures versions de ce prototype, il serait donc judiciable de privilégier des écrans qui maintiennent une brillance confortable d'une part, et d'étudier les problèmes de colorimétrie plus en détails pour assurer une uniformité parfaite, tout en prenant en compte les perturbations dues à la réflexion d'autre part. Certains participants ont également mentionné qu'ils ont trouvé le système encombrant, et qu'ils avaient des difficultés pour atteindre l'arrière de l'écran tactile à cause du miroir. Ainsi, il serait intéressant d'étudier les problèmes ergonomiques qu'engendre ce prototype, pour le faire évoluer vers une version plus adéquate. De plus, l'étude de différentes formes physiques du système pourrait éviter que ce système ne soit perçu comme encombrant.

Ce premier test d'utilisabilité a été positif, les participants ayant globalement aimé leur expérience avec ce système. Ce test a également montré que le mélange de l'affichage stéréoscopique, de l'affichage monoscopique et des éléments réels dans le même espace de travail ne pose pas de problèmes perceptuels. De plus, les résultats du test suggèrent que les utilisateurs novices ont réussi à effectuer une tâche de positionnement à neuf degrés de

liberté sans difficulté majeure. Pour finir, les commentaires des utilisateurs ont mis en avant certaines limitations du système, et ont indiqué la nécessité de réaliser des études ergonomiques pour l'amélioration du prototype présenté. La conception de nouvelles techniques d'interaction serait également intéressante pour déterminer les avantages de ce système. Dans le but de mélanger l'interaction tactile et spatiale à l'intérieur du même espace de travail, il serait également intéressant d'ajouter une caméra de profondeur pour donner la possibilité de manipuler les objets stéréoscopiques à partir de gestes dans l'air, tel que dans *Holodesk* [HKI⁺12]. Cette expérience fait partie de l'article publié à la conférence UIST [HBCR11].

Suite à ces premiers résultats, nous conduisons actuellement des études à grandes échelles à Cap Sciences afin de déterminer le potentiel d'une telle interface pour la manipulation d'objets 3D auprès du grand public. Cette étude nous permettra de tester l'interface proposée avec de nombreux sujets et des profils variés. Au delà de l'utilisabilité, cela nous permettra d'étudier l'acceptabilité d'un tel dispositif et de répondre à des questions telles que : Est-ce que le grand public a envie de s'en servir ? Visualise t-il bien la 3D ? Nous souhaitons également évaluer si un tel périphérique est plus ou moins adapté selon, entre autres, l'âge de la personne, son sexe, ou encore son habitude de la 3D ou des écrans tactiles, le but étant de déterminer dans quelles mesures ce périphérique peut être utile à la manipulation d'objets 3D suivant le type de public.

6.2 Comparaison de périphériques

De manière complémentaire aux travaux précédents, nous nous intéressons à l'apport des surfaces dans l'interaction 3D, en comparaison avec d'autres périphériques. Nous souhaitons situer quels sont les apports des surfaces tactiles par rapport à d'autres périphériques pour l'interaction avec du contenu tridimensionnel. Pour cela, nous comparons trois périphériques pour l'observation d'une scène virtuelle 3D : une surface tactile, une souris et une souris 3D. Le choix de la souris est justifié par le fait qu'il s'agisse d'un périphérique 2D communément utilisé, et celui de la souris 3D par le fait qu'il s'agisse d'un périphérique sur lequel des translations et des rotations en 3D peuvent être effectuées. Le but de cette expérience est de répondre aux questions suivantes :

- Quel est le périphérique le plus performant en terme de rapidité et de précision pour l'observation d'une scène 3D ? (Q6.1)
- Le périphérique le plus performant est-il le même ou non quel que soit les personnes ? (Q6.2)
- Quel périphérique est le plus apprécié des utilisateurs ? Correspond-il au plus performant ? (Q6.3)

6.2.1 Protocole expérimental

La tâche à effectuer doit évidemment être conçue pour répondre aux questions exposées précédemment, mais doit également être ludique du fait qu'elle est installée dans un musée pendant plusieurs mois. Ainsi, le test se présente sous la forme d'un jeu dont le but est de prendre en photo sept oiseaux cachés dans une scène 3D composée de plusieurs blocs de couleurs (cf. Figure 6.5). Cette tâche nécessite donc des déplacements de caméras qui impliquent des rotations, des translations et des changements d'échelle. Nous avons mis en place chaque périphérique de manière séquentielle et non en parallèle, afin d'éviter qu'un même utilisateur effectue le test avec les trois périphériques et induise une notion d'apprentissage entre chacun des essais. La souris utilisée est une souris à molette, l'écran tactile est un écran 3M de 22 pouces avec une résolution de 1680 par 1050 pixels, et la souris 3D est une Cadman de la société 3dconnexion¹. Dans les trois conditions d'expérimentation, la visualisation se fait au moyen de l'écran tactile.

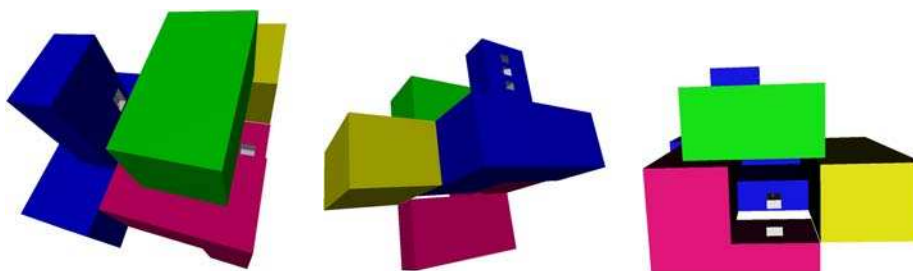


FIGURE 6.5: Plusieurs vues de la scène expérimentale

Chaque test est contrôlé par un animateur de Cap Sciences, qui présente l'expérience, note les commentaires de l'utilisateur, et lui fait remplir un questionnaire. Avant de débiter le test, l'animateur présente le but du jeu et comment contrôler la scène, en s'appuyant sur un tutoriel intégré à l'application de test (cf. Annexe B). Concernant la souris, l'utilisateur peut déplacer la scène dans le plan de l'écran en déplaçant la souris tout en maintenant le bouton gauche enfoncé. Il peut tourner la scène sur elle-même en déplaçant la souris tout en maintenant le bouton droit enfoncé. De plus, il peut approcher ou reculer l'objet en utilisant la molette (cf. Figure 6.6(a)). Concernant la surface tactile, l'écartement (resp. le rapprochement) de deux doigts permet de zoomer (resp. dézoomer), le déplacement d'un doigt sur la surface permet de tourner la scène sur elle-même et le déplacement de deux doigts, de manière groupée, permet de déplacer la caméra dans un plan parallèle à celui de l'écran (cf. Figure 6.6(b)). Pour finir, concernant la souris 3D, l'utilisateur applique au bouton central les transformations qu'il souhaite appliquer à l'objet (cf. Figure 6.6(c)). Ces gestes ont été choisis pour leur

1. <http://www.3dconnexion.fr/>

simplicité et leur cohérence vis-à-vis du périphérique et de la transformation associés. De plus, il est indiqué à l'utilisateur qu'il peut prendre huit photos au maximum, et qu'il doit prendre sept oiseaux en photos. L'utilisateur est ensuite invité à tester le périphérique pendant quelques minutes avant de commencer le test. Notons que l'utilisateur n'est pas obligé de prendre les sept oiseaux en photo s'il ne souhaite pas continuer.

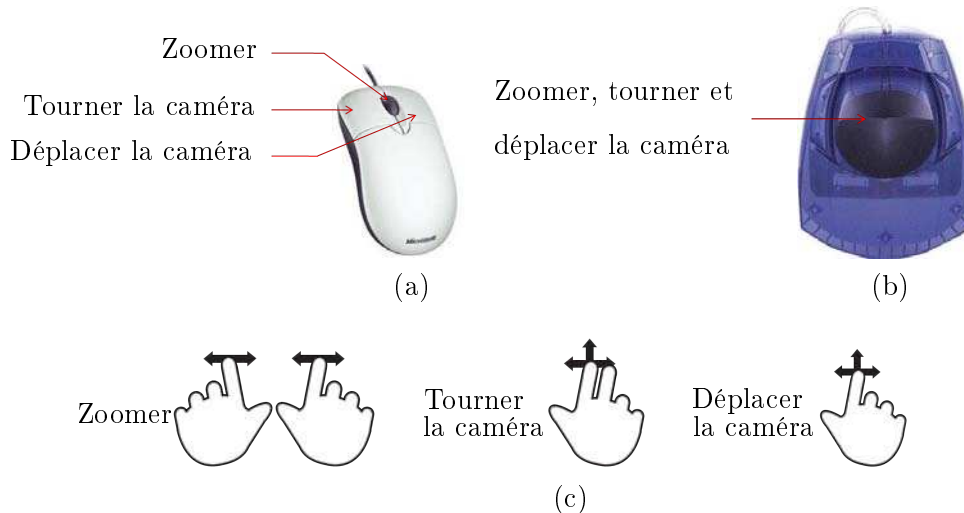


FIGURE 6.6: Contrôle de la caméra selon les trois périphériques utilisés dans l'expérience : la souris (a), l'écran tactile (b), la souris 3D (c).

À la fin du test, le participant répond à un questionnaire. Ce dernier est composé de quatre questions définissant le sexe du participant, sa main dominante, son âge, et son habitude quant au périphérique qu'il a utilisé lors du test. Suite à cela, le participant est invité à évaluer dix affirmations via une échelle de Likert à sept niveaux de « Pas du tout d'accord » (1) à « Totalelement d'accord » (7) :

- J'ai aimé utiliser ce périphérique. (A6.1)
- J'ai trouvé le périphérique facile à utiliser. (A6.2)
- J'ai trouvé que le périphérique fonctionnait bien. (A6.3)
- J'ai mis du temps à comprendre le fonctionnement du périphérique. (A6.4)
- J'ai eu la sensation d'être précis(e). (A6.5)
- J'ai eu la sensation d'être rapide. (A6.6)
- Je me suis perdu(e) dans la scène. (A6.7)
- J'ai eu une bonne visualisation en 3D de la scène. (A6.8)
- J'ai ressenti une fatigue dans les doigts, les mains ou le poignet. (A6.9)
- J'aurais souhaité faire d'autres mouvements avec ce périphérique pour les actions proposées. (A6.10)

6.2.2 Évaluation et perspectives

Pour répondre à la question (Q6.1), nous évaluerons le temps que les utilisateurs ont mis pour effectuer la tâche. Quant à la précision, elle peut être mesurée via la précision des photos. Bien sûr ces résultats seront à relativiser par rapport à l'habitude des périphériques.

À l'heure actuelle, environ deux cents utilisateurs ont accepté de participer à l'expérience. Ce large panel d'utilisateurs nous permet non seulement d'obtenir des résultats plus pertinents, mais également d'évaluer les résultats en fonction de diverses classes d'utilisateurs (Q6.2).

Le fait que l'utilisateur puisse arrêter l'expérience dès qu'il le souhaite permet de tester l'attractivité du périphérique, ce qui permet d'aider à répondre à la question (Q6.3). L'attractivité des périphériques est également évaluée via les affirmations (A6.1) et (A6.2), et leur confort via (A6.9).

L'affirmation (A6.3) permet d'avoir un retour sur le bon fonctionnement du périphérique lors du test, afin de ne pas prendre en compte les tests où il y aurait eu des dysfonctionnements. La perception de la scène 3D peut être évaluée via les affirmations (A6.7) et (A6.8) et le fait que les participants aient photographié plusieurs fois le même oiseau ou non. L'affirmation (A6.10) a pour rôle d'évaluer si la cohérence entre les mouvements proposés et les actions associées est approximativement équivalente pour chaque périphérique, afin que le choix de gestes n'influence qu'à moindres mesures les résultats.

Cette dernière section présente le protocole expérimental d'une expérience en cours. Ainsi, les résultats sont en cours d'évaluation. Nous l'avons présentée car elle est complémentaire aux études effectuées dans la thèse. En effet, elle permet de situer les surfaces tactiles par rapport à d'autres périphériques, tandis que les autres études présentées dans ce manuscrit sont orientées sur l'utilisation « naturelle » des surfaces tactiles, sur une interface dédiée au tactile ou correspond à l'évaluation d'un nouveau périphérique tactile.

Conclusion

Résumé des contributions

Dans ce manuscrit, nous nous sommes intéressés à la manipulation d'objets 3D sur surfaces tactiles en étudiant d'une part, la compréhension du comportement humain dans un tel contexte, et d'autre part, l'implémentation de techniques et l'évaluation *a posteriori* d'interfaces.

L'analyse des travaux existants (cf. Chapitres 1 et 2) a révélé que l'interaction via des surfaces tactiles a majoritairement été explorée dans un contexte bidimensionnel. Quelques travaux ont proposé des techniques de manipulation d'objets 3D prenant en compte les avantages et les inconvénients de l'utilisation de ces périphériques dans un tel contexte. Cependant, aucune étude ne s'est portée sur la compréhension du comportement « naturel » des utilisateurs au préalable de la conception de ces techniques. Afin d'adapter l'interaction à l'homme et non l'inverse, nous avons mené des expérimentations dans ce sens.

Dans un premier temps, nous avons analysé le comportement des utilisateurs pour effectuer des rotations, des translations et des changements d'échelle sur un cube suivant chaque axe du repère local associé (cf. Chapitre 3). Nous avons alors découvert de nouvelles stratégies reposant sur des concepts différents de ceux proposés dans les interfaces actuelles. De plus, nous avons proposé des guides pour la conception de futures interfaces et un ensemble de trajectoires permettant de distinguer la plupart des transformations. Une étude comparative avec la souris a également indiqué que les utilisateurs préféreraient les surfaces tactiles pour réaliser ce type de tâches. Cependant, ce résultat est à relativiser car il peut être dû aux habitudes acquises avec la souris.

Dans un deuxième temps, nous avons exploré le bénéfice de la pression contrôlée de façon continue lors du déplacement des doigts sur la surface (cf. Chapitre 4). En effet, les études précédentes nous ont révélé des ambiguïtés dans les différents gestes effectués, dues au fait que l'entrée est bidimension-

nelle alors que l'espace d'interaction est tridimensionnel. Ainsi, nous nous sommes intéressés à l'utilisation de la pression exercée par les doigts sur une surface tactile afin d'apporter une dimension supplémentaire. Nous avons tout d'abord effectué une expérience dans un contexte simplifiée (non 3D) afin de déterminer la capacité des utilisateurs à contrôler un tel paramètre. Cette étude a révélé l'aptitude des utilisateurs à contrôler divers niveaux de pressions, mais également les variations de pression de manière continue sous un certain seuil de sensibilité, ainsi que de manière linéairement croissante et décroissante. Cependant, il a été révélé que la direction du déplacement avait une influence sur la pression exercée. À partir de ces résultats, nous avons interprété les résultats d'une seconde expérience portant sur l'utilisation de la pression dans la manipulation d'un objet 3D. Celle-ci a révélé une utilisation « naturelle » des variations de pression dans le sens de la profondeur des transformations pour les opérations de translations et de rotations. Ainsi, ce paramètre pourrait être bénéfique pour l'interaction 3D d'une part, mais également pour l'interaction dans un contexte général d'autre part, du fait que les utilisateurs ont tendance à savoir contrôler à la fois les niveaux de pression, mais également ses variations.

Ensuite, nous avons présenté une technique d'interaction reposant sur un widget en forme de cube, conçue à partir des résultats issus de l'état de l'art sur l'interaction avec des surfaces tactiles dans un contexte bidimensionnel, et des résultats de l'étude préliminaire concernant la compréhension du comportement des utilisateurs dans des tâches de manipulation d'objets 3D (cf. Chapitre 5). De plus, nous avons évalué un prototype permettant de mêler des interactions colocalisées avec un affichage stéréoscopique (cf. Section 6.1). Cette évaluation informelle a permis d'avoir des premiers retours des utilisateurs et d'envisager des améliorations du système. Pour finir, nous avons présenté le protocole expérimental d'une expérience permettant d'identifier dans quelles mesures les écrans tactiles sont bénéfiques à l'interaction 3D, pour une tâche donnée (cf. Section 6.2). Ce manuscrit présente ainsi divers travaux dans le cadre de l'interaction 3D via des surfaces tactiles. Ces travaux ont montré que le tactile peut rendre l'interaction avec du contenu 3D plus accessible au grand public. De plus, de nombreuses perspectives sont envisageables afin de mieux comprendre l'apport des surfaces tactiles pour l'interaction 3D.

Perspectives

Compréhension des utilisateurs

Outre les travaux futurs envisagés dans les chapitres 3 et 4, de nombreuses recherches sont encore à mener dans le sens de la compréhension des utilisateurs. Il serait par exemple intéressant d'étudier si l'utilisation de la

pression est la même suivant les périphériques, si les stratégies adoptées sont les mêmes en fonction des formes des objets, de leur taille à l'écran ou de la taille des écrans. Des investigations concernant les performances et le confort d'utilisation d'ensembles de gestes définis par ces études d'une part, et de techniques d'interaction conçus par des concepteurs d'autre part, seraient également intéressants pour mesurer les bénéfices de l'une ou l'autre de ces approches.

Conception d'interfaces

Dans le chapitre 5, nous avons décrit la conception d'une technique d'interaction, *tBox*. D'autres techniques, présentées dans l'état de l'art ont été proposées, permettant d'être plus ou moins performants, ou d'interagir de manière plus ou moins « naturelle ». De nombreuses autres techniques sont bien évidemment encore à proposer. Par exemple, en collaboration avec Nicolas Mellado, doctorant en informatique graphique, nous nous sommes intéressés à l'utilisation d'algorithmes lors de tâches d'assemblage effectuées par des archéologues. Cette méthode permettrait d'outrepasser l'imprécision du doigt sur surfaces tactiles et de bénéficier de la technologie multipoint des surfaces tactiles et de l'interaction à deux mains.

De nombreuses interfaces semblent intéressantes pour l'interaction 3D et méritent d'être étudiées de manière plus approfondie pour des tâches effectuées dans un contexte tridimensionnel. Certaines permettent de manipuler un objet dans les airs [LPI11], d'autres sont déformables [RP09] et d'autres permettent de sentir de la friction [CRVG11]. Une étude sur les avantages qu'apportent chacune d'entre elles seraient intéressantes, notamment pour l'élaboration d'une interface combinant les avantages de chacune, tout en évitant leurs limitations.

Usages et applications

La manipulation d'objets 3D pourrait apporter de nombreux bénéfices en terme d'usages, notamment au niveau de la communication et de la création, comme exposé en introduction de ce manuscrit. Il serait donc intéressant d'étudier quel périphérique est le plus adapté pour la manipulation d'objets 3D selon l'expérience des personnes. Afin de répondre à cette question, nous effectuons actuellement une étude à grande échelle à Cap Sciences permettant de comparer plusieurs périphériques : la souris, l'écran tactile et la souris 3D. D'autres expérimentations seraient également judicieuses, notamment pour déterminer dans quelles mesures l'interaction 3D aide à la communication par rapport à l'interaction 2D, dans un contexte d'exploration de pièces de musée par exemple. Cette remarque s'appliquant pour de nombreux cas d'applications et de techniques d'interaction, elle engendre une multitude d'études.

Quatrième partie

Annexes

ANNEXE A

Compréhension des gestes : résultats détaillés

Nous présentons ici les résultats détaillés concernant le chapitre portant sur la compréhension de gestes des utilisateurs (cf. Chapitre 3).

La table A.1 expose en détails les résultats obtenus concernant l'étude préliminaire (cf. Section 3.1) sur la façon dont les utilisateurs ont tendance à faire tourner un cube à partir d'une entrée monopoint sur surfaces tactiles.

La table A.2 expose le taux d'utilisation de chaque paramètre concernant la classification des gestes sur surfaces tactiles pour la manipulation d'objets 3D (cf. Section 3.2.2). Notons que certains cas qui n'ont pas été utilisés dans cette étude n'y sont pas illustrés (par exemple, lorsque deux arêtes de deux faces différentes sont sélectionnées).

La table A.3 montre l'ensemble des trajectoires centré utilisateur, le degré d'accord entre elles, ainsi que les ambiguïtés, pour chaque transformation 3D proposée lors du test concernant la manipulation d'objets 3D à l'aide d'entrées tactiles (Section 3.2.4).

La table A.4 résume les résultats sur l'ensemble de toutes les transformations, ainsi que pour chacune d'entre elles séparément, concernant la classification des gestes effectués à la souris pour la manipulation d'objets 3D (cf. Section 3.3.2).

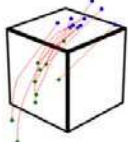
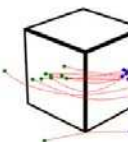
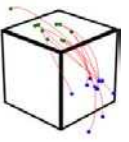
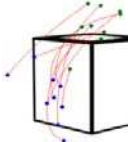
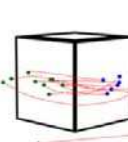
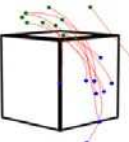
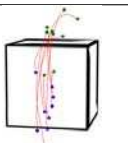
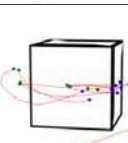
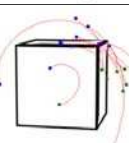
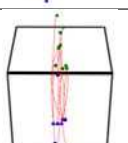
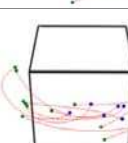
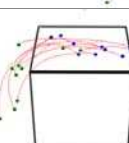
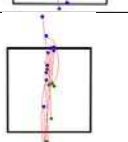
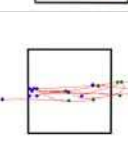
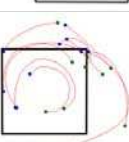
Gestes	QT1 : m (σ) QT2 : m (σ)	Gestes	QT1 : m (σ) QT2 : m (σ)	Gestes	QT1 : m (σ) QT2 : m (σ)
	6.5 (0.70) 6.6 (0.69)		6.6 (0.70) 6.7 (0.48)		6.7 (0.48) 6.7 (0.48)
	5.7 (1.25) 6.2 (1.23)		6.5 (0.84) 6.7 (0.67)		5.8 (0.79) 6.2 (1.03)
	5.4 (1.26) 6.0 (1.25)		6.2 (0.79) 6.3 (1.25)		6.0 (1.05) 5.8 (1.40)
	6.5 (0.97) 6.8 (0.42)		5.9 (0.99) 6.1 (0.88)		6.0 (1.25) 6.0 (1.25)
	5.5 (1.65) 6.0 (1.33)		5.8 (1.40) 6.2 (1.32)		5.7 (1.06) 6.0 (1.25)

TABLE A.1: Gestes effectués par les utilisateurs. Les points bleus correspondent au début du geste et les points verts à la fin. La moyenne m et l'écart-type σ des scores de pertinence (QT1) et de facilité (QT2) du geste sont indiqués pour chaque rotation, à droite de la figure correspondante.

D	Valeurs des dimensions				tot	R	S	T	
F o r m e	1 doigt statique				.48	0.0	0.0	1.4	
	1 doigt statique et 1 doigt en mouvement				4.0	11.	0.0	.71	
	1 doigt en mouvement				50.	72.	3.7	73.	
	2 doigts en mouvement				36.	17.	67.	24.	
	4 doigts en mouvement				10.	0.0	30.	.71	
P P I	f a c e s	1 face	\perp AT		18.	7.1	12.	33.	
			\parallel AT		34.	31.	37.	35.	
		2 faces	\parallel AT		.24	0.0	.75	0.0	
			les deux		3.9	1.4	10.	0.0	
	3 faces		.72		0.0	2.2	0.0		
	a- rê- tes	1 arête	\perp AT		.72	0.0	2.2	0.0	
			\parallel AT		13.	19.	12.	6.4	
		2 arêtes	\perp AT d'une face		\parallel AT	2.6	0.0	8.2	0.0
	s o m m e t s	1 sommet				3.7	8.7	.75	1.4
		2 sommets	de la même arête		\perp AT	3.1	9.2	0.0	0.0
					\parallel AT	.48	1.4	0.0	0.0
			même face		\perp AT	1.7	5.0	0.0	0.0
		3 sommets				.24	0.0	.75	0.0
		4 sommets	d'une même face		\parallel AT	4.1	0.0	13.	0.0
	ext				14.	16.	1.5	24.	
T r a j	le long de la DT	intersecte le cube		63.	60.	47.	76.		
		n'intersecte pas le cube		23.	11.	41.	13.		
	pas le long de la DT	intersectes le cube		14.	29.	12.	11.		
		n'intersectes pas le cube		.48	0.0	.75	.71		

TABLE A.2: Classification des gestes 3D et taux d'utilisation correspondant (en % sur les trois dernières colonnes) sur l'ensemble des transformations (tot) et pour chaque type de transformation (R correspond aux rotations, S aux changements d'échelle et T aux translations).

		Vue (a)			Vue (b)			Vue (c)			
R	X	Gestes									
		Nombre	6/16	10/16	9/16	7/16	16/16				
		m e a	4.9 5.4	.53	5.6 5.6	.51	5.6 6.0	1.0			
	Y	Gestes									
		Nombre	4/14	10/14	15/16	1/16	11/16	5/16			
		m e a	5.3 6.1	.59	5.7 6.1	.88	5.7 5.9	.57			
	Z	Gestes									
		Nombre	15/16	1/16	13/16	3/16	14/16	2/16			
		m e a	6.0 6.1	.88	5.8 6.1	.70	5.8 6.2	.78			
S	X	Gestes									
		Nombre	16/16		15/15		16/16				
		m e a	6.3 6.3	1.0	6.3 5.9	1.0	6.1 6.0	1.0			
	Y	Gestes									
		Nombre	14/15	1/15	12/15	3/15	16/16				
		m e a	6.3 6.1	.88	6.0 5.6	.68	6.0 5.7	1.0			
	Z	Gestes									
		Nombre	6/13	7/13	15/15		16/16				
		m e a	5.0 5.0	.50	5.7 5.7	1.0	5.9 6.1	1.0			
T	X	Gestes									
		Nombre	16/16		16/16		15/15				
		m e a	6.1 6.4	1.0	6.1 6.3	1.0	5.8 6.1	1.0			
	Y	Gestes									
		Nombre	15/16	1/16	15/15		16/16				
		m e a	6.2 6.3	.88	5.6 5.6	1.0	6.1 6.1	1.0			
	Z	Gestes									
		Nombre	4/16	9/16			16/16				
		Gestes									
Nombre		2/16	1/16	15/15		16/16					
m e a	5.2 5.8	.40	5.6 6.0	1.0	6.1 6.3	1.0					

TABLE A.3: Ensemble de trajectoires centré utilisateur. Chaque ligne représente les trajectoires appliquées pour une transformation selon un axe pour les trois points de vue. Sous chaque trajectoire, le nombre d'utilisateurs de celle-ci est indiqué, ainsi que la moyenne de pertinence (m), de facilité (e) et le taux d'accord (a). Les trajectoires en conflit entre elles sont mises en avant via une même couleur.

D	Valeurs pour chaque paramètre			tot	R	S	T		
B o u t o n	Bouton droit	Sans molette		1.9	0.0	2.3	3.4		
		Avec molette		.37	0.0	1.1	0.0		
	Bouton gauche	Sans molette		89.	99.	76.	91.		
		Avec molette		6.4	0.0	16.	3.4		
	Bouton de la molette				.37	0.0	1.1	0.0	
	Molette uniquement				2.3	1.1	3.4	2.3	
F o r m e	1 point statique			4.5	1.1	9.0	3.4		
	4 points statiques			.38	0.0	0.0	1.1		
	1 mouvement			79.	98.	47.	92.		
	2 mouvements			12.	0.0	37.	0.0		
	4 mouvements			1.5	0.0	3.4	1.1		
	aucun			2.3	1.1	3.4	2.3		
P P I	faces	1 face	\perp AT			16.	14.	9.0	25.
			\parallel AT			40.	34.	40.	45.
		2 faces	les deux		1.5	0.0	4.5	0.0	
	arêtes	1 arête	\perp AT			18.	17.	21.	15.
			\parallel AT			11.	19.	7.9	6.8
		2 arêtes	d'une face	\parallel AT	3.0	0.0	9.0	0.0	
	sommets	1 sommet			7.1	14.	3.4	3.4	
		4 sommets	d'une face	\perp AT	1.1	0.0	1.1	2.3	
	aucun				2.3	1.1	3.4	2.3	
	T r a j	le long de la DT	intersectes le cube		55.	52.	26.	89.	
n'intersecte pas le cube			7.5	20.	1.1	1.1			
le long d'une des deux DT opposées*		intersectes le cube		14.	0.0	42.	0.0		
		n'intersecte pas le cube		1.9	0.0	5.6	0.0		
pas le long de la DT		intersectes le cube		9.7	22.	4.5	2.3		
		n'intersecte pas le cube		1.5	3.3	0.0	1.1		
aucun				10.	2.2	21.	6.8		

TABLE A.4: Classification des gestes effectués à la souris pour la manipulation d'objets 3D et taux d'utilisation de chaque paramètre de cette classification sur l'ensemble des transformations, ainsi que pour chaque type de transformation (R représente les rotations, S les changements d'échelle et T les translations). *pour les changements d'échelle uniquement.

ANNEXE B

Comparaison de périphériques : tutoriels

Les figures B.1, B.2 et B.3 exposent les tutoriels de l'application conçue dans le but de comparer l'écran tactile avec la souris et la souris 3D pour la manipulation d'une scène 3D (cf. Section 6.2).

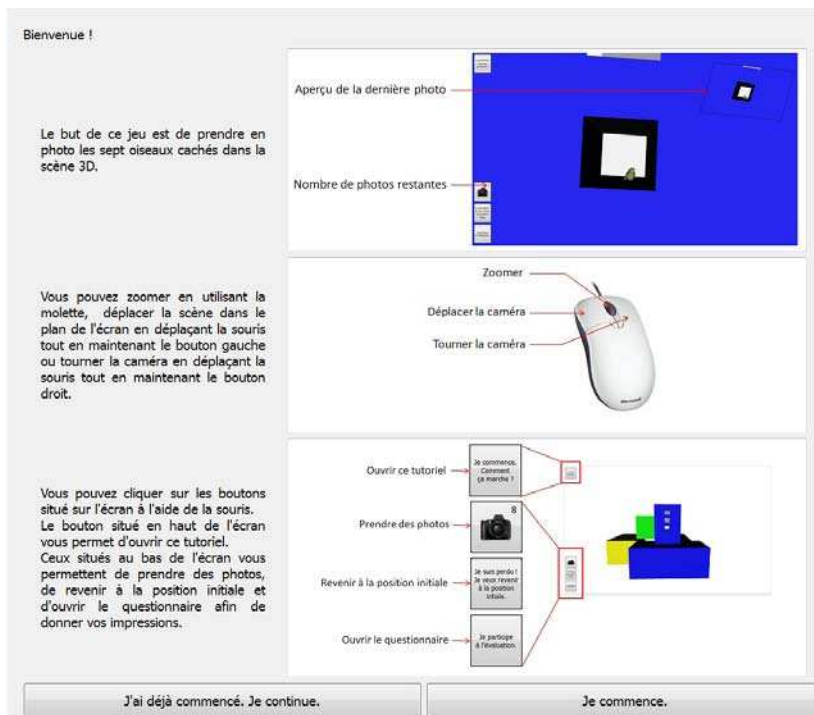


FIGURE B.1: Tutoriel pour la souris

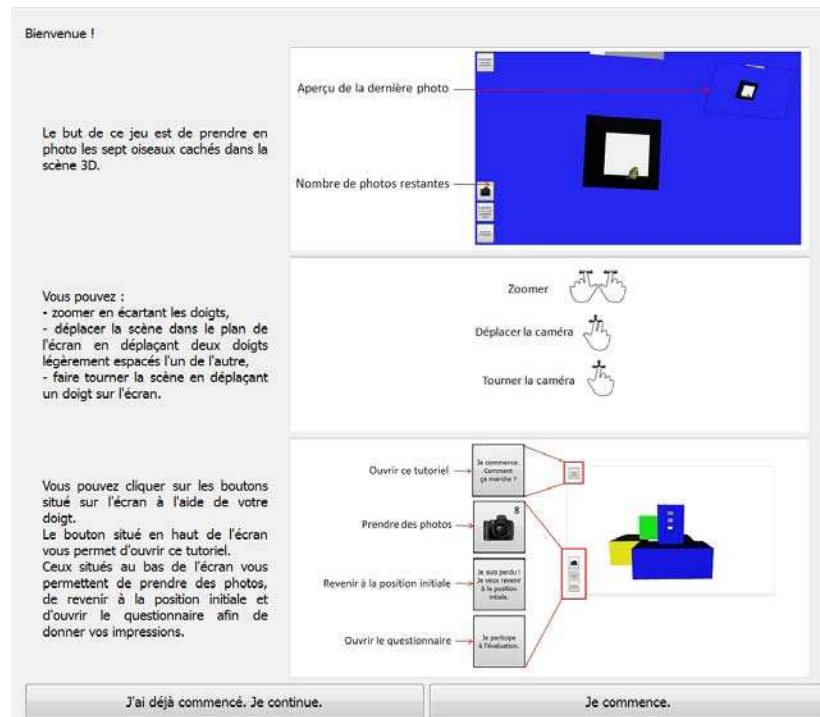


FIGURE B.2: Tutoriel pour l'écran tactile

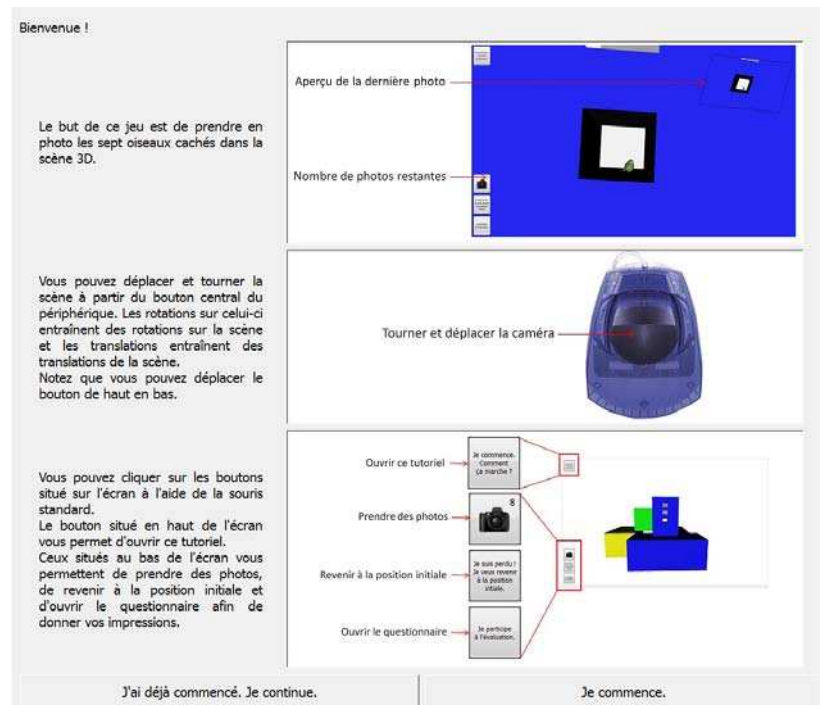


FIGURE B.3: Tutoriel pour la souris 3D

Publications de l'auteur

- [CH12a] Aurélie Cohé and Martin Hachet. Beyond the mouse : Understanding user gestures for manipulating 3D objects from touchscreen inputs. *Computers and Graphics*, to appear in December 2012.
- [CH12b] Aurélie Cohé and Martin Hachet. Understanding user gestures for manipulating 3d objects from touchscreen inputs. In *Proceedings of the 2012 Graphics Interace Conference, GI '12*, pages 157-164, Toronto, Ont., Canada, Canada, 2012. Canadian Information Processing Society.
- [HBCR11] Martin Hachet, Benoit Bossavit, Aurélie Cohé, and Jean-Baptiste de la Rivière. Toucheo : multitouch and stereo combined in a seamless workspace. In *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology, UIST '11*, pages 587-592, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [CDH11] Aurélie Cohé, Fabrice Dècle, and Martin Hachet. tBox : a 3D transformation widget designed for touch-screens. In *Proceedings of the 2011 annual conference on Human factors in computing systems, CHI '11*, pages 3005-3008, New York, NY, USA, 2011. ACM.

Bibliographie

- [AB10] Caroline Appert and Olivier Bau. Scale detection for a priori gesture recognition. In *Proceedings of the 28th international conference on Human factors in computing systems, CHI '10*, pages 879–882, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [AGS⁺11] Michel Amberg, Frédéric Giraud, Betty Semail, Paolo Olivo, Géry Casiez, and 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*, pages 7–8, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [ALM92] B. Ahlström, S. Lenman, and T. Marmolin. Overcoming touchscreen user fatigue by workplace design, 1992.
- [And92] R.E Anderson. Social impacts of computing : Codes of professional ethics. *Social Science Computing Review*, 10(4) :453–469, 1992.
- [App] Apple. iphone : <http://www.apple.com/fr/iphone/>.
- [Aut] Autodesk. Maya : <http://www.autodesk.fr/>.
- [BF07] Hrvoje Benko and Steven Feiner. Balloon Selection : A Multi-Finger Technique for Accurate Low-Fatigue 3D Selection. In *2007 IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, volume 7, pages 79–86. Ieee, 2007.
- [BFH⁺83] W. Buxton, E. Fiume, R. Hill, A. Lee, and C. Woo. Continuous hand-gesture driven input. In *Proceedings of Graphics interface*, volume 83, pages 191–195, 1983.
- [BH00] Ravin Balakrishnan and Ken Hinckley. Symmetric bimanual interaction. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, CHI '00*, pages 33–40, New York, NY, USA, 2000. ACM.

- [BH09] Stephen A. Brewster and Michael Hughes. Pressure-based text entry for mobile devices. In *Proceedings of the 11th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '09, pages 9 :1–9 :4, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [BHA12] Björn Bollensdorff, Uwe Hahne, and Marc Alexa. The effect of perspective projection in multi-touch 3D interaction. In *Proceedings of the 2012 Graphics Interace Conference*, GI '12, pages 165–172, Toronto, Ont., Canada, Canada, 2012. Canadian Information Processing Society.
- [BHR85] William Buxton, Ralph Hill, and Peter Rowley. Issues and techniques in touch-sensitive tablet input. In *Proceedings of the 12th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, SIGGRAPH '85, pages 215–224, New York, NY, USA, 1985. ACM.
- [BIB⁺09] François Bérard, Jessica Ip, Mitchel Benovoy, Dalia El-Shimy, Jeffrey R. Blum, and Jeremy R. Cooperstock. Did "minority report" get it wrong? superiority of the mouse over 3D input devices in a 3D placement task. In *Proceedings of the 12th IFIP TC 13 International Conference on Human-Computer Interaction : Part II*, INTERACT '09, pages 400–414, Berlin, Heidelberg, 2009. Springer-Verlag.
- [Bie87] Eric Allan Bier. Skitters and jacks : interactive 3D positioning tools. In *Proceedings of the 1986 workshop on Interactive 3D graphics*, I3D '86, pages 183–196, New York, NY, USA, 1987. ACM.
- [Bie90] Eric A. Bier. Snap-dragging in three dimensions. In *Proceedings of the 1990 symposium on Interactive 3D graphics*, I3D '90, pages 193–204, New York, NY, USA, 1990. ACM.
- [BK99] Ravin Balakrishnan and Gordon Kurtenbach. Exploring bimanual camera control and object manipulation in 3D graphics interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems the CHI is the limit - CHI '99*, pages 56–62, New York, New York, USA, 1999. ACM Press.
- [BK01] William Bares and Byungwoo Kim. Generating virtual camera compositions. In *Proceedings of the 6th international conference on Intelligent user interfaces*, IUI '01, pages 9–12, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [BKLP01] Doug A. Bowman, Ernst Kruijff, Joseph J. LaViola, and Ivan Poupyrev. An introduction to 3D user interface design. *Presence : Teleoper. Virtual Environ.*, 10(1) :96–108, February 2001.

- [BL99] William H. Bares and James C. Lester. Intelligent multi-shot visualization interfaces for dynamic 3D worlds. In *Proceedings of the 4th international conference on Intelligent user interfaces*, IUI '99, pages 119–126, New York, NY, USA, 1999. ACM.
- [Ble] Blender : <http://www.blender.org/>.
- [BM86] W. Buxton and B. Myers. A study in two-handed input. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, CHI '86, pages 321–326, New York, NY, USA, 1986. ACM.
- [BMLG11] Mathias Baglioni, Sylvain Malacria, Eric Lecolinet, and Yves Guiard. Flick-and-brake : finger control over inertial/sustained scroll motion. In *Proceedings of the 2011 annual conference extended abstracts on Human factors in computing systems*, CHI EA '11, pages 2281–2286, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [BS86] Eric A. Bier and Maureen C. Stone. Snap-dragging. In *Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, SIGGRAPH '86, pages 233–240, New York, NY, USA, 1986. ACM.
- [BS95] Richard W. Bukowski and Carlo H. Séquin. Object associations : a simple and practical approach to virtual 3D manipulation. In *Proceedings of the 1995 symposium on Interactive 3D graphics*, I3D '95, pages 131–ff., New York, NY, USA, 1995. ACM.
- [Bux] Bill Buxton. Multi-touch systems that i have known and loved, <http://www.billbuxton.com/multitouchoverview.html>.
- [BWB06] Hrvoje Benko, Andrew D. Wilson, and Patrick Baudisch. Precise selection techniques for multi-touch screens. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in computing systems*, CHI '06, pages 1263–1272, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [BWB08] Hrvoje Benko, Andrew D. Wilson, and Ravin Balakrishnan. Sphere : multi-touch interactions on a spherical display. In *Proceedings of the 21st annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '08, pages 77–86, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [CDH11] Aurélie Cohé, Fabrice Dècle, and Martin Hachet. tBox : a 3D transformation widget designed for touch-screens. In *Proceedings of the 2011 annual conference on Human factors in computing systems*, CHI '11, pages 3005–3008, New York, NY, USA, 2011. ACM.

- [CH12a] Aurélie Cohé and Martin Hachet. Beyond the mouse : Understanding user gestures for manipulating 3D objects from touchscreen inputs. *Computers and Graphics*, to appear in December 2012.
- [CH12b] Aurélie Cohé and Martin Hachet. Understanding user gestures for manipulating 3d objects from touchscreen inputs. In *Proceedings of the 2012 Graphics Interace Conference, GI '12*, pages 157–164, Toronto, Ont., Canada, Canada, 2012. Canadian Information Processing Society.
- [CMS88] Michael Chen, S. Joy Mountford, and Abigail Sellen. A study in interactive 3D rotation using 2D control devices. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 22(4) :121–129, June 1988.
- [CRVG11] Géry Casiez, Nicolas Roussel, Romuald Vanbelleghem, and Frédéric Giraud. Surfpad : riding towards targets on a squeeze film effect. In *Proceedings of the 2011 annual conference on Human factors in computing systems, CHI '11*, pages 2491–2500, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [CSH⁺92] Brookshire D. Conner, Scott S. Snibbe, Kenneth P. Herndon, Daniel C. Robbins, Robert C. Zeleznik, and Andries van Dam. Three-dimensional widgets. In *Proceedings of the 1992 symposium on Interactive 3D graphics, I3D '92*, pages 183–188, New York, NY, USA, 1992. ACM.
- [CWB⁺] Xiang Cao, Andrewd. Wilson, Ravin Balakrishnan, Ken Hinkley, and Scott E. Hudson. Shapetouch : Leveraging contact shape on interactive surfaces.
- [D09] Fabrice Dècle. *Approches Directes et Planifiées de l'Interaction 3D sur Terminaux Mobiles*. These, Université de Bordeaux, 2009.
- [DACJ12] Bruno R. De Araùjo, Géry Casiez, and Joaquim A. Jorge. Mockup builder : direct 3D modeling on and above the surface in a continuous interaction space. In *Proceedings of the 2012 Graphics Interace Conference, GI '12*, pages 173–180, Toronto, Ont., Canada, Canada, 2012. Canadian Information Processing Society.
- [DACJH12] Bruno De Araujo, Géry Casiez, Joaquim Jorge, and Martin Hachet. Modeling On and Above a Stereoscopic Multitouch Display. In *3DCHI - The 3rd Dimension of CHI*, Austin, États-Unis, May 2012.
- [DK] S Damaraju and A Kerne. Multitouch Gesture Learning and Recognition System. *ecologylab.cs.tamu.edu*, pages 1–2.
- [DL01] Paul Dietz and Darren Leigh. Diamondtouch : a multi-user touch technology. In *Proceedings of the 14th annual ACM sym-*

- posium on User interface software and technology*, UIST '01, pages 219–226, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [dIRKOD08] Jean-Baptiste de la Rivière, Cédric Kervégant, Emmanuel Orvain, and Nicolas Dittlo. Cubtile : a multi-touch cubic interface. In *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology*, VRST '08, pages 69–72, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [DRS03] Kiran Dandekar, Balasundar I. Raju, and Mandayam a. Srinivasan. 3D Finite-Element Models of Human and Monkey Fingertips to Investigate the Mechanics of Tactile Sense. *Journal of Biomechanical Engineering (2003)*, 125(5) :682, 2003.
- [DTB81] N. Diffrient, A.R. Tilley, and J. Bardagjy. *Humanscale*. Number vol. 4 à 6 in Humanscale. MIT Press, 1981.
- [ELW06] Julien Epps, Serge Lichman, and Mike Wu. A study of hand shape use in tabletop gesture interaction. In *CHI '06 extended abstracts on Human factors in computing systems*, CHI EA '06, pages 748–753, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [FB08] C. Forlines and R. Balakrishnan. Evaluating tactile feedback and direct vs. indirect stylus input in pointing and crossing selection tasks. *Direct*, 2008.
- [FIB95] George W. Fitzmaurice, Hiroshi Ishii, and William A. S. Buxton. Bricks : laying the foundations for graspable user interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, CHI '95, pages 442–449, New York, NY, USA, 1995. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [GDHZ06] Yotam I. Gingold, Philip L. Davidson, Jefferson Y. Han, and Denis Zorin. A direct texture placement and editing interface. In *Proceedings of the 19th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '06, pages 23–32, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [Gui87] Y. Guiard. Asymmetric division of labor in human skilled bimanual action : The kinematic chain as a model. *Journal of motor behavior*, 19 :486–517, 1987.
- [GWB04] Tovi Grossman, Daniel Wigdor, and Ravin Balakrishnan. Multi-finger gestural interaction with 3D volumetric displays. In *Proceedings of the 17th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '04, pages 61–70, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [Han05] Jefferson Y. Han. Low-cost multi-touch sensing through frustrated total internal reflection. In *Proceedings of the 18th annual ACM symposium on User interface software and techno-*

- logy, UIST '05, pages 115–118, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [Hau89] AG Hauptmann. Speech and gestures for graphic image manipulation. In *ACM SIGCHI Bulletin*, volume 20, pages 241–245. ACM New York, NY, USA, 1989.
- [HB10] Christian Holz and Patrick Baudisch. The generalized perceived input point model and how to double touch accuracy by extracting fingerprints. In *Proceedings of the 28th international conference on Human factors in computing systems, CHI '10*, pages 581–590, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [HB11] Christian Holz and Patrick Baudisch. Understanding touch. In *Proceedings of the 2011 annual conference on Human factors in computing systems, CHI '11*, pages 2501–2510, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [HBCR11] Martin Hachet, Benoit Bossavit, Aurélie Cohé, and Jean-Baptiste de la Rivière. Toucheo : multitouch and stereo combined in a seamless workspace. In *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology, UIST '11*, pages 587–592, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [HCC07] Mark Hancock, Sheelagh Carpendale, and Andy Cockburn. Shallow-depth 3D interaction : design and evaluation of one-, two- and three-touch techniques. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, CHI '07*, pages 1147–1156, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [HCS96] Li-wei He, Michael F. Cohen, and David H. Salesin. The virtual cinematographer : a paradigm for automatic real-time camera control and directing. In *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH '96*, pages 217–224, New York, NY, USA, 1996. ACM.
- [HH09] Chris Harrison and Scott E. Hudson. Providing dynamically changeable physical buttons on a visual display. In *Proceedings of the 27th international conference on Human factors in computing systems - CHI '09*, page 299, New York, New York, USA, 2009. ACM Press.
- [HH12] Chris Harrison and Scott Hudson. Using shear as a supplemental two-dimensional input channel for rich touchscreen interaction. In *Proceedings of the 2012 ACM annual conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '12*, pages 3149–3152, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [HHWB12] Martin Halvey, David Hannah, Graham Wilson, and Stephen A. Brewster. Investigating gesture and pressure inter-

- action with a 3D display. In Klaus Schoeffmann, Bernard Merriald, Alexander G. Hauptmann, Chong-Wah Ngo, Yiannis Andreopoulos, and Christian Breiteneder, editors, *MMM*, volume 7131 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 395–405. Springer, 2012.
- [HKI⁺12] Otmar Hilliges, David Kim, Shahram Izadi, Malte Weiss, and Andrew Wilson. Holodesk : direct 3d interactions with a situated see-through display. In *Proceedings of the 2012 ACM annual conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pages 2421–2430, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [HL11] Seongkook Heo and Geehyuk Lee. Force gestures : augmented touch screen gestures using normal and tangential force. In *Proceedings of the 2011 annual conference extended abstracts on Human factors in computing systems*, CHI EA '11, pages 1909–1914, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [Hou92] Stephanie Houde. Iterative design of an interface for easy 3D direct manipulation. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, CHI '92, pages 135–142, New York, NY, USA, 1992. ACM.
- [HtCC09] Mark Hancock, Thomas ten Cate, and Sheelagh Carpendale. Sticky tools : full 6DOF force-based interaction for multi-touch tables. In *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS '09, pages 133–140, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [HTP⁺97] Ken Hinckley, Joe Tullio, Randy Pausch, Dennis Proffitt, and Neal Kassell. Usability analysis of 3D rotation techniques. In *Proceedings of the 10th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '97, pages 1–10, New York, NY, USA, 1997. ACM.
- [HW78] Christopher F. Herot and Guy Weinzapfel. One-point touch input of vector information for computer displays. In *Proceedings of the 5th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, SIGGRAPH '78, pages 210–216, New York, NY, USA, 1978. ACM.
- [HW97] Andrew J. Hanson and Eric A. Wernert. Constrained 3D navigation with 2D controllers. In *Proceedings of the 8th conference on Visualization '97*, VIS '97, pages 175–ff., Los Alamitos, CA, USA, 1997. IEEE Computer Society Press.
- [IKMT98] Takeo Igarashi, Rieko Kadobayashi, Kenji Mase, and Hidehiko Tanaka. Path drawing for 3D walkthrough. In *Proceedings of the 11th annual ACM symposium on User interface software*

- and technology*, UIST '98, pages 173–174, New York, NY, USA, 1998. ACM.
- [IMH05] Takeo Igarashi, Tomer Moscovich, and John F. Hughes. As-rigid-as-possible shape manipulation. In *ACM SIGGRAPH 2005 Papers*, SIGGRAPH '05, pages 1134–1141, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [JZM] Zaleena Janmohamed, Bin Zheng, and Christine L. MacKenzie. Aiming with the hand touching the target : the role of proprioceptive information between the hands. In *Attention And Performance*.
- [KAD09] Kenrick Kin, Maneesh Agrawala, and Tony DeRose. Determining the benefits of direct-touch, bimanual, and multifinger input on a multitouch workstation. In *Proceedings of Graphics Interface 2009*, GI '09, pages 119–124, Toronto, Ont., Canada, Canada, 2009. Canadian Information Processing Society.
- [KCST05] Russell Kruger, Sheelagh Carpendale, Stacey D. Scott, and Anthony Tang. Fluid integration of rotation and translation. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, CHI '05, pages 601–610, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [KFBB97] Gordon Kurtenbach, George Fitzmaurice, Thomas Baudel, and Bill Buxton. The design of a gui paradigm based on tablets, two-hands, and transparency. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, CHI '97, pages 35–42, New York, NY, USA, 1997. ACM.
- [KGMQ08] Ji-Sun Kim, Denis Gračanin, Krešimir Matković, and Francis Quek. Finger walking in place (fwip) : A traveling technique in virtual environments. In *Proceedings of the 9th international symposium on Smart Graphics*, SG '08, pages 58–69, Berlin, Heidelberg, 2008. Springer-Verlag.
- [KH11] Sebastian Knoedel and Martin Hachet. Multi-touch rst in 2D and 3D spaces : Studying the impact of directness on user performance. In *Proceedings of the 2011 IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, 3DUI '11, pages 75–78, Washington, DC, USA, 2011. IEEE Computer Society.
- [KKS⁺05] Azam Khan, Ben Komalo, Jos Stam, George Fitzmaurice, and Gordon Kurtenbach. Hovercam : interactive 3D navigation for proximal object inspection. In *Proceedings of the 2005 symposium on Interactive 3D graphics and games*, I3D '05, pages 73–80, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [KLH08] Hanna Maria Kaarina Koskinen, Jari Olavi Laarni, and Petri Mikael Honkamaa. Hands-on the process control : users

- preferences and associations on hand movements. In *CHI '08 extended abstracts on Human factors in computing systems*, CHI EA '08, pages 3063–3068, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [KMB⁺11] Kenrick Kin, Tom Miller, Björn Bollensdorff, Tony DeRose, Björn Hartmann, and Maneesh Agrawala. Eden : a professional multitouch tool for constructing virtual organic environments. In *Proceedings of the 2011 annual conference on Human factors in computing systems*, CHI '11, pages 1343–1352, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [KT88] H. Kojima and T. Toida. Online hand-drawn line-figure recognition and its application. In *9th International Conference on Pattern Recognition*, pages 1138 –1142 vol.2, nov 1988.
- [KY97] Byong K. Ko and Hyun S. Yang. Finger mouse and gesture recognition system as a new human computer interface. *Comput. Graph.*, 21(5) :555–561, September 1997.
- [LBS85] SK Lee, William Buxton, and K. C. Smith. A multi-touch three dimensional touch-sensitive tablet. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, CHI '85, pages 21–25, New York, NY, USA, 1985. ACM.
- [LLL⁺12] Bhoram Lee, Hyunjeong Lee, Soo-Chul Lim, Hyungkew Lee, Seungju Han, and Joonah Park. Evaluation of human tangential force input performance. In *Proceedings of the 2012 ACM annual conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pages 3121–3130, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [LPI11] Jinha Lee, Rehmi Post, and Hiroshi Ishii. Zeron : mid-air tangible interaction enabled by computer controlled magnetic levitation. In *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '11, pages 327–336, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [LZB98] Andrea Leganchuk, Shumin Zhai, and William Buxton. Manual and cognitive benefits of two-handed input : an experimental study. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 5(4) :326–359, December 1998.
- [Mar11] Anthony Martinet. *Etude de l'influence de la séparation des degrés de liberté pour la manipulation 3D à l'aide de surfaces tactiles multipoints*. These, Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I, October 2011.
- [MB93] P Martin and P Bateson. *Measuring Behaviour (2nd Edition)*. Cambridge University Press, 1993.

- [McA86] P. McAvinney. The sensor frame - a gesture-based device for the manipulation of graphic objects. Carnegie Mellon University, 1986.
- [MCG10a] Anthony Martinet, Géry Casiez, and Laurent Grisoni. The effect of DOF separation in 3D manipulation tasks with multi-touch displays. In *Proceedings of the 17th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '10*, pages 111–118, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [MCG10b] Anthony Martinet, Géry Casiez, and Laurent Grisoni. The Design and Evaluation of 3D Positioning Techniques for Multi-touch Displays. In *Proceedings of 3DUI'10, the 5th Symposium on 3D User Interfaces*, pages 115–118, Waltham, États-Unis, 2010. IEEE Computer Society.
- [Meh82] Nimish Mehta. A flexible machine interface. M.A.Sc. Thesis, Department of Electrical Engineering, University of Toronto, 1982.
- [MGLF09] Justin Matejka, Tovi Grossman, Jessica Lo, and George Fitzmaurice. The design and evaluation of multi-finger mouse emulation techniques. In *Proceedings of the 27th international conference on Human factors in computing systems, CHI '09*, pages 1073–1082, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [MH06] Tomer Moscovich and John F. Hughes. Multi-finger cursor techniques. In *Proceedings of Graphics Interface 2006, GI '06*, pages 1–7, Toronto, Ont., Canada, Canada, 2006. Canadian Information Processing Society.
- [MHPW06] Meredith Ringel Morris, Anqi Huang, Andreas Paepcke, and Terry Winograd. Cooperative gestures : multi-user gestural interactions for co-located groupware. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in computing systems, CHI '06*, pages 1201–1210, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [Mic] Microsoft. Surface, <http://www.microsoft.com/surface>.
- [MJGJ11] Nicolai Marquardt, Ricardo Jota, Saul Greenberg, and Joaquim A. Jorge. The continuous interaction space : interaction techniques unifying touch and gesture on and above a digital surface. In *Proceedings of the 13th IFIP TC 13 international conference on Human-computer interaction - Volume Part III, INTERACT'11*, pages 461–476, Berlin, Heidelberg, 2011. Springer-Verlag.
- [ML04] Shahzad Malik and Joe Laszlo. Visual touchpad : a two-handed gestural input device. In *Proceedings of the 6th international conference on Multimodal interfaces, ICMI '04*, pages 289–296, New York, NY, USA, 2004. ACM.

- [MLG10] Sylvain Malacria, Eric Lecolinet, and Yves Guiard. Clutch-free panning and integrated pan-zoom control on touch-sensitive surfaces : the cyclostar approach. In *Proceedings of the 28th international conference on Human factors in computing systems*, CHI '10, pages 2615–2624, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [MO98] I. Scott MacKenzie and Aleks Oniszczak. A comparison of three selection techniques for touchpads. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, CHI '98, pages 336–343, New York, NY, USA, 1998. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [Mos06] T Moscovich. Multi-touch interaction. In *Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 1–4, 2006.
- [Mos09] Tomer Moscovich. Contact area interaction with sliding widgets. In *Proceedings of the 22nd annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '09, pages 13–22, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [MRB05] Shahzad Malik, Abhishek Ranjan, and Ravin Balakrishnan. Interacting with large displays from a distance with vision-tracked multi-finger gestural input. In *Proceedings of the 18th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '05, pages 43–52, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [Nad64] E. A. Nadaraya. On estimating regression. *Theory of Probability and its Applications*, 9 :141–142, 1964.
- [NBBW09] Miguel A. Nacenta, Patrick Baudisch, Hrvoje Benko, and Andy Wilson. Separability of spatial manipulations in multi-touch interfaces. In *Proceedings of Graphics Interface 2009*, GI '09, pages 175–182, Toronto, Ont., Canada, Canada, 2009. Canadian Information Processing Society.
- [NO87] Gregory M. Nielson and Dan R. Olsen, Jr. Direct manipulation techniques for 3D objects using 2D locator devices. In *Proceedings of the 1986 workshop on Interactive 3D graphics*, I3D '86, pages 175–182, New York, NY, USA, 1987. ACM.
- [ON09] Michael Ortega and Laurence Nigay. Airmouse : Finger gesture for 2D and 3D interaction. In *Proceedings of the 12th IFIP TC 13 International Conference on Human-Computer Interaction : Part II*, INTERACT '09, pages 214–227, Berlin, Heidelberg, 2009. Springer-Verlag.
- [OS05] Ji-Young Oh and Wolfgang Stuerzlinger. Moving objects with 2D input devices in cad systems and desktop virtual environments. In *Proceedings of Graphics Interface 2005*, GI '05, pages

- 195–202, School of Computer Science, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2005. Canadian Human-Computer Communications Society.
- [PWS88] R. L. Potter, L. J. Weldon, and B. Shneiderman. Improving the accuracy of touch screens : an experimental evaluation of three strategies. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, CHI '88, pages 27–32, New York, NY, USA, 1988. ACM.
- [RB07] Gonzalo A. Ramos and Ravin Balakrishnan. Pressure marks. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, CHI '07, pages 1375–1384, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [RDH09] Jason L. Reisman, Philip L. Davidson, and Jefferson Y. Han. A screen-space formulation for 2D and 3D direct manipulation. In *Proceedings of the 22nd annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '09, pages 69–78, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [Rek02] Jun Rekimoto. Smartskin : an infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems : Changing our world, changing ourselves*, CHI '02, pages 113–120, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [RHL08] Anne Roudaut, Stéphane Huot, and Eric Lecolinet. Taptap and magstick : improving one-handed target acquisition on small touch-screens. In *Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces*, AVI '08, pages 146–153, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [RLG] Anne Roudaut, Eric Lecolinet, and Yves Guiard. Microrolls : expanding touch-screen input vocabulary by distinguishing rolls vs. slides of the thumb. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in computing systems*, CHI '09, year = 2009, pages = 927-936.
- [RP09] Ilya Rosenberg and Ken Perlin. The unmousepad : an interpolating multi-touch force-sensing input pad. *ACM Trans. Graph.*, 28(3) :65 :1–65 :9, July 2009.
- [RS06] Jun Rekimoto and Carsten Schwesig. Presenseii : bi-directional touch and pressure sensing interactions with tactile feedback. In *CHI '06 extended abstracts on Human factors in computing systems*, CHI EA '06, pages 1253–1258, New York, NY, USA, 2006. ACM.

- [RSB08] Karan Singh Ryan Schmidt and Ravin Balakrishnan. Sketching and composing widgets for 3D manipulation. *Comput. Graph. Forum*, pages 301–310, 2008.
- [SC93] M Srinivasan and J Chen. Human performance in controlling normal forces of contact with rigid objects. *Advances in Robotics, Mechatronics, and Haptic Interfaces*, pages 49 :119–125, 1993.
- [Sch98] K Schultz. Optimal viewing angle for touch-screen displays : Is there such a thing? In *International Journal of Industrial Ergonomics*, volume 22, pages 343–350, novembre 1998.
- [Sho92] Ken Shoemake. Arcball : a user interface for specifying three-dimensional orientation using a mouse. In *Proceedings of the conference on Graphics interface '92*, pages 151–156, San Francisco, CA, USA, 1992. Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- [Sin97] Michael Sinclair. The haptic lens. In *ACM SIGGRAPH 97 Visual Proceedings : The art and interdisciplinary programs of SIGGRAPH '97*, SIGGRAPH '97, pages 179–, New York, NY, USA, 1997. ACM.
- [sita] Etronics, <http://etronics.free.fr>.
- [sitb] <http://ialok.wordpress.com/>.
- [sitc] <http://www.3dvf.com>.
- [sit01] Mesures, www.mesures.com/archives/054_057_sol.pdf, 2001.
- [SRKE10] Craig Stewart, Michael Rohs, Sven Kratz, and Georg Essl. Characteristics of pressure-based input for mobile devices. In *Proceedings of the 28th international conference on Human factors in computing systems, CHI '10*, pages 801–810, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [STC+09] E.E. Shen, S.D. Tsai, H. Chu, Y.J. Hsu, and C.E. Chen. Double-side multi-touch input for mobile devices. In *Proceedings of the 27th international conference extended abstracts on Human factors in computing systems*, pages 4339–4344, New York, New York, USA, 2009. ACM New York, NY, USA.
- [Syn] Synaptics. Forcepad. <http://www.synaptics.com/solutions/products/forcepad>.
- [TSGF06] Edward Tse, Chia Shen, Saul Greenberg, and Clifton Forlines. Enabling interaction with single user applications through speech and gestures on a multi-user tabletop. In *Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces, AVI '06*, pages 336–343, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [VB07] Daniel Vogel and 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*, pages 657–666, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [VIR⁺09] N. Villar, S. Izadi, D. Rosenfeld, H. Benko, J. Helmes, J. Westhues, S. Hodges, E. Ofek, A. Butler, X. Cao, and Others. Mouse 2.0 : multi-touch meets the mouse. In *Proceedings of the 22nd annual ACM symposium on User interface software and technology*, pages 33–42. ACM, 2009.
- [WARM05] Jacob O. Wobbrock, Htet Htet Aung, Brandon Rothrock, and Brad A. Myers. Maximizing the guessability of symbolic input. In *CHI '05 extended abstracts on Human factors in computing systems, CHI EA '05*, pages 1869–1872, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [Wat64] Geoffrey S. Watson. Smooth regression analysis. *Sankhyā Ser.*, 26 :359–372, 1964.
- [WB03] Mike Wu and Ravin Balakrishnan. Multi-finger and whole hand gestural interaction techniques for multi-user tabletop displays. In *Proceedings of the 16th annual ACM symposium on User interface software and technology, UIST '03*, pages 193–202, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [WBH11] Graham Wilson, Stephen A. Brewster, and Martin Halvey. The effects of walking and control method on pressure-based interaction. In *Proceedings of the 2011 annual conference extended abstracts on Human factors in computing systems, CHI EA '11*, pages 2275–2280, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [WCRI09] Feng Wang, Xiang Cao, Xiangshi Ren, and Pourang Irani. Detecting and Leveraging Finger Orientation for Interaction with Direct-Touch Surfaces. In *Ratio*, pages 23–32, 2009.
- [WEH01] Wayne Westerman, John G. Elias, and Alan Hedge. Multi-touch : A new tactile 2D gesture interface for human-computer interaction. *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, 45 :632–636(5), 2001.
- [Wel91] Pierre Wellner. The digitaldesk calculator : tangible manipulation on a desk top display. In *Proceedings of the 4th annual ACM symposium on User interface software and technology, UIST '91*, pages 27–33, New York, NY, USA, 1991. ACM.
- [WIH⁺08] Andrew D. Wilson, Shahram Izadi, Otmar Hilliges, Armando Garcia-Mendoza, and David Kirk. Bringing physics to the surface. In *Proceedings of the 21st annual ACM symposium on User interface software and technology, UIST '08*, pages 67–76, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [WLF⁺06] D. Wigdor, D. Leigh, C. Forlines, S. Shipman, J. Barnwell, R. Balakrishnan, and C. Shen. Under the table interaction.

- In *Proceedings of the 19th annual ACM symposium on User interface software and technology*, page 268. ACM, 2006.
- [WMW09] Jacob O. Wobbrock, Meredith Ringel Morris, and Andrew D. Wilson. User-defined gestures for surface computing. In *Proceedings of the 27th international conference on Human factors in computing systems*, CHI '09, pages 1083–1092, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [WR09] Feng Wang and Xiangshi Ren. Empirical evaluation for finger input properties in multi-touch interaction. In *Proceedings of the 27th international conference on Human factors in computing systems*, CHI '09, pages 1063–1072, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [WSB10] Graham Wilson, Craig Stewart, and Stephen A. Brewster. Pressure-based menu selection for mobile devices. In *Proceedings of the 12th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services*, MobileHCI '10, pages 181–190, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [WSR⁺06] Mike Wu, Chia Shen, Kathy Ryall, Clifton Forlines, and Ravin Balakrishnan. Gesture registration, relaxation, and reuse for multi-point direct-touch surfaces. In *Proceedings of the First IEEE International Workshop on Horizontal Interactive Human-Computer Systems*, TABLETOP '06, pages 185–192, Washington, DC, USA, 2006. IEEE Computer Society.
- [ZF99] Robert Zeleznik and Andrew Forsberg. Unicam : 2D gestural camera controls for 3D environments. In *Proceedings of the 1999 symposium on Interactive 3D graphics*, I3D '99, pages 169–173, New York, NY, USA, 1999. ACM.
- [ZFS97] Robert C. Zeleznik, Andrew S. Forsberg, and Paul S. Strauss. Two pointer input for 3D interaction. In *Proceedings of the 1997 symposium on Interactive 3D graphics*, I3D '97, pages 115–120, New York, NY, USA, 1997. ACM.
- [Zha98] Shumin Zhai. User performance in relation to 3D input device design. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 32(4) :50–54, November 1998.