

Titre: Title:	Virtualisation d'interfaces matérielles : proposition, implémentation et évaluation d'un nouveau paradigme d'interactions humain-machine
Auteur: Author:	Alexandre Plouznikoff
Date:	2009
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	Plouznikoff, A. (2009). Virtualisation d'interfaces matérielles : proposition, implémentation et évaluation d'un nouveau paradigme d'interactions humain-machine [Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/135/

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/135/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Michel C. Desmarais, & Jean-Marc Robert
Advisors:

Programme: Génie informatique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

VIRTUALISATION D'INTERFACES MATÉRIELLES: PROPOSITION,
IMPLÉMENTATION ET ÉVALUATION D'UN NOUVEAU PARADIGME
D'INTERACTIONS HUMAIN-MACHINE

ALEXANDRE PLOUZNIKOFF

DÉPARTEMENT DE GÉNIE INFORMATIQUE ET DE GÉNIE LOGICIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR (Ph.D.)
(GÉNIE INFORMATIQUE)

JUIN 2009

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée :

VIRTUALISATION D'INTERFACES MATÉRIELLES: PROPOSITION,
IMPLÉMENTATION ET ÉVALUATION D'UN NOUVEAU PARADIGME
D'INTERACTIONS HUMAIN-MACHINE

présentée par : PLOUZNIKOFF Alexandre,
en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiae Doctor
a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

M. ROBILLARD Pierre N., Ph.D., président

M. DESMARAIS Michel, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. ROBERT Jean-Marc, Doctorat, membre et codirecteur de recherche

Mme. CHERIET Farida, Ph.D., membre

M. COOPERSTOCK Jeremy R., Ph.D., membre externe

À mes parents et à mon frère, pour tout.

REMERCIEMENTS

Je tiens, en premier lieu, à remercier mon directeur de recherche, M. Michel Desmarais, et mon codirecteur, M. Jean-Marc Robert, pour leur soutien et leurs encouragements constants, leur grande disponibilité tout au cours de ces années, leurs judicieux conseils et, surtout, pour la confiance qu'ils m'ont témoignée en m'acceptant comme étudiant.

J'aimerais aussi remercier le Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT) ainsi que le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie (CRSNG) pour l'appui financier qu'ils m'ont apporté durant mes recherches doctorales; je n'aurais pas pu me consacrer pleinement à mes études sans ces bourses d'excellence.

RÉSUMÉ

En acquérant de nouvelles fonctions, les machines environnantes ont vu leur interface se complexifier. Cette évolution rapide et non-contrôlée a mené à des interactions humain-machine moins performantes, forçant deux courants de pensées à émerger. Puisant dans l'informatique pervasive, le premier a favorisé le développement de machines intelligentes, en les augmentant de multiples senseurs pour automatiser la plupart de leurs fonctionnalités, afin de décharger leur interface et limiter les interactions humain-machine aux actions strictement essentielles. Le deuxième s'est concentré, entre autres, sur la formulation de philosophies de design (design centré sur l'utilisateur, conception pour tous, interfaces unifiées...) et sur l'élaboration de méthodes d'évaluation (*cognitive walkthrough*, évaluations heuristiques...), afin de simplifier et de standardiser ces interfaces. Bien que ces recherches ont et continuent de façonnner le monde des interfaces humain-machine tel que nous le connaissons, il nous reste encore beaucoup de progrès à faire pour offrir, à chaque utilisateur et dans un marché de masse, des interfaces optimales et minimales, répondant spécifiquement à leurs besoins, à leurs modèles mentaux et à leurs préférences individuels.

Pour contrer ces difficultés, cette thèse propose un nouveau paradigme d’interactions humain-machine, en libérant les interfaces génériques actuelles de leur support physique, limitant leur adaptabilité, afin de favoriser la naissance d’une infinité d’interfaces virtuelles personnelles, qui pourraient efficacement remplacer leurs contreparties matérielles. En utilisant des ordinateurs portés pour traduire les commandes d’un utilisateur et les réponses d’une machine, il semble possible d’imposer à des appareils spécifiques des interfaces virtuelles personnalisées, en les intégrant à l’environnement de façon transparente en réalité augmentée.

Nous avons tout d’abord implémenté une version fonctionnelle de notre paradigme, afin de tester ses limites et ses capacités. Pour ce faire, nous avons eu recours, pour détecter et suivre différentes interfaces matérielles dans une source vidéo continue, à une combinaison de techniques de vision basées sur les SIFT et les flots optiques. En utilisant ces données, nous fûmes en mesure d’aligner et d’intégrer des interfaces virtuelles spécifiques dans l’environnement, présentées à l’utilisateur par l’intermédiaire d’un affichage tête haute binoculaire opaque. Les interactions avec ces interfaces virtuelles furent ensuite détectées en utilisant des techniques conventionnelles de segmentation des mains. Des adaptateurs particuliers assurèrent finalement le relais des commandes de l’utilisateur à la machine et des réponses de cette dernière à l’ordinateur porté.

Nous avons ensuite élaboré et dirigé une séance de tests utilisateurs en deux parties, pour comparer les interfaces virtuelles aux interfaces matérielles, lorsque connues et inconnues des utilisateurs. Les résultats collectés ont constamment montré que les utilisateurs préféraient recourir à une interface virtuelle familière plutôt qu'à une interface traditionnelle inconnue, et qu'ils étaient en mesure, face à la première, de réaliser les tâches demandées plus rapidement et en ressentant une charge mentale plus faible. Cette conclusion montre clairement que, si adoptées, les interfaces virtuelles pourraient efficacement remplacer les interfaces matérielles actuelles, lorsqu'inconnues des utilisateurs, et supprimer cette phase d'adaptation que nous rencontrons lorsque confrontés à une interface inconnue. Les résultats collectés démontrent aussi que les interfaces virtuelles, au stade actuel de développement et sans avoir été personnalisées aux préférences d'un utilisateur, peuvent concurrencer certaines interfaces matérielles familières, en termes de temps d'exécution d'une tâche et du nombre d'erreurs commises.

La contribution majeure de cette thèse à l'avancement des connaissances scientifiques et techniques est la formulation, l'implémentation et l'évaluation d'un nouveau paradigme d'interactions humain-machine, permettant aux utilisateurs de contourner les interfaces matérielles génériques actuelles, en imposant leurs propres interfaces en réalité augmentée, pour dialoguer efficacement avec certains appareils. Bien que ce concept semble viable, des recherches plus poussées sont nécessaires pour le raffiner et pour donner l'opportunité aux interfaces virtuelles de prendre naturellement la relève de leurs

contreparties matérielles. À terme, avec la démocratisation des ordinateurs portés, cette évolution sensée vers des interfaces personnalisées et auto-adaptatives redéfinira sûrement nos méthodes de conception, nos relations avec les machines et notre vision du monde, où les interfaces matérielles disparaîtront, pour céder la place à de simples conteneurs où nous pourrons arrimer nos interfaces personnelles.

ABSTRACT

As machines acquired new capabilities, their interfaces ultimately became more complex. This unrestrained and rapid evolution led to problematic man-machine interactions, forcing two currents of thought to emerge. Drawing upon pervasive computing, the first moved towards intelligent machines, using multiple sensors to automate most of their functionalities, to streamline their interfaces and to limit man-machine interactions to essential actions. The second focused, among other concepts, on design philosophies (user-centered design, design for all, unified interfaces...) and evaluation methods (cognitive walkthrough, heuristic evaluations...), in a quest to simplify and standardize these interfaces. While such research shaped and continues to shape the world of man-machine interfaces as we know it, we are still far from offering, in a mass-market environment, ideal and minimal interfaces, tailored to a user's specific and individual needs, mental models and preferences.

To address this issue, this thesis proposes a new man-machine interaction paradigm, based on the hypothesis that, if these current generic interfaces could be freed from their physical support, hampering their flexibility, we would witness the birth of a new and infinite number of custom virtual interfaces, which could efficiently replace their

physical counterparts. Using wearable computers to translate a user's commands and a machine's responses, it seems possible to seamlessly integrate, and force upon specific machines, personalized virtual interfaces in augmented reality.

We first implemented a working version of our paradigm, in order to test its limits and capabilities. To do so, we relied on a combination of SIFT and optical flow techniques to detect and track various physical interfaces in a live camera feed. Using this data, we were able to register specific virtual interfaces in a user's view, rendered in a binocular opaque head-up display. Interactions with these interfaces were then detected using conventional hand segmentation techniques. Custom adaptors finally ensured the relay of all the user's commands and the machines' responses.

We then devised and conducted a two-part user study, to compare virtual interfaces with familiar and unfamiliar physical ones. The collected results and observations consistently showed that, to complete the required tasks, users preferred to interact with a known virtual interface rather than with an unknown traditional one, and did so more quickly while experiencing less mental stress. This conclusion clearly indicates that, if adopted, virtual interfaces could efficiently replace unknown traditional ones, by suppressing the adaptation phase that users must go through when confronted to them. The collected results also demonstrated that known virtual interfaces, at their current development stage and even prior to being personalized to a user's preferences, could

compete with some familiar physical interfaces, in terms of time taken to complete the required tasks and number of errors committed.

The major contribution of this thesis to the advancement of scientific and technical knowledge is the formulation, the implementation and the evaluation of a new man-machine interaction paradigm, enabling users to go around current physical generic interfaces, and to impose their own to efficiently interact with specific machines. Though this concept seems viable, further research is needed to refine it and empower virtual interfaces to naturally take over from their physical counterparts. In the long run, with the democratization of wearable computers, this sensible evolution to custom and self-adaptable interfaces will surely redefine our design methods, our relations with machines and our vision of the world, where physical interfaces will disappear, to be replaced with simplified placeholders.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT	ix
TABLE DES MATIÈRES	xii
LISTE DES TABLEAUX.....	xix
LISTE DES FIGURES	xxviii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xxxiii
LISTE DES ANNEXES	xxxv
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1 Des interfaces de plus en plus complexes	1
1.2 Quelques solutions limitées.....	3
1.3 Une nouvelle avenue de recherche : la virtualisation.....	4

1.4 Structure de la thèse	5
CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE SUR LA SIMPLIFICATION DES INTERFACES MATÉRIELLES ET L'INFORMATIQUE PORTÉE	7
2.1 Simplification de la complexité d'utilisation des machines.....	8
2.1.1 Appareils intelligents.....	9
2.1.2 Contrôleurs universels.....	11
2.2 Informatique portée.....	18
2.2.1 Ordinateur porté	19
2.2.2 Périphériques d'entrée et de sortie	20
2.2.3 Réalités augmentée et interposée	23
CHAPITRE 3 : PROBLÉMATIQUE LIÉE À LA VIRTUALISATION D'INTERFACES MATÉRIELLES	28
3.1 Vers une nouvelle génération d'interfaces humain-machine	29
3.1.1 Impacts sur le plan de la conception	31
3.1.2 Impacts sur le plan de la mise à jour	31
3.1.3 Impacts sur le plan de l'utilisation	32
3.2 Virtualisation d'interfaces matérielles	33
3.2.1 L'ordinateur porté comme agent face aux appareils environnants.....	34
3.2.2 L'informatique portée par rapport à l'informatique disséminée	35
3.2.3 Schématisation des interactions humain-machine envisagées	37
3.2.4 Circonscription de l'étude	39

3.3 Objectifs de recherche.....	44
3.3.1 Objectif principal.....	44
3.3.2 Objectifs spécifiques	45
CHAPITRE 4 : CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT D'INTERFACES VIRTUELLES.....	49
4.1 Architecture matérielle.....	50
4.1.1 Résumé des composantes initiales de l'ordinateur porté.....	50
4.1.2 Modifications apportées aux composantes initiales	53
4.1.3 Dispositif principal d'entrée.....	53
4.1.4 Dispositif de présentation d'information.....	54
4.2 Architecture logicielle : couche de détection.....	55
4.2.1 Module SIFT de détection d'une interface matérielle.....	56
4.2.2 Module de suivi d'une interface matérielle par flot optique	68
4.2.3 Module de détection des mains de l'utilisateur	71
4.3 Architecture logicielle : couche de présentation et gestion.....	73
4.3.1 Description d'une interface personnalisée	75
4.3.2 Module de présentation des interfaces personnalisées	77
4.3.3 Machine à états interne.....	81
4.3.4 Module d'interprétation des gestes de l'utilisateur	83
4.4 Architecture logicielle : couche de communication.....	87
4.4.1 Module de communication.....	87

CHAPITRE 5 : MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE	90
5.1 Conception des expériences	90
5.1.1 Coût d'utilisation des interfaces virtuelles	91
5.1.2 Comparaison entre une interface virtuelle connue et une interface matérielle inconnue	93
5.1.3 Comparaison entre une interface virtuelle connue et une interface matérielle connue	95
5.1.4 Justification du choix des interfaces virtuelles	97
5.2 Description des tâches	98
5.2.1 Tâche à réaliser	99
5.2.2 Estimation des temps d'exécution de la tâche	100
5.2.3 Justification du choix de la famille d'appareils	101
5.2.4 Justification du choix de la tâche	102
5.3 Recrutement des participants	103
5.3.1 Méthode de recrutement	103
5.3.2 Caractéristiques des participants recherchés	104
5.3.3 Renseignements divulgués aux participants	105
5.3.4 Justification de la taille des groupes	106
5.4 Matériel utilisé	110
5.4.1 Présentation des appareils multifonctions choisis	110
5.4.2 Justification du choix des appareils multifonctions	112
5.4.3 Description des chemins pour accomplir la tâche retenue	113

5.4.4	Modifications matérielles apportées à l'infrastructure	116
5.4.5	Modifications logicielles apportées à l'infrastructure	117
5.4.6	Description des interfaces virtuelles développées	123
5.5	Déroulement d'une séance	131
5.5.1	Organisation de la salle de tests	131
5.5.2	Séance typique	133
5.5.3	Processus de tests et rôle des responsables	137
5.5.4	Mesures recueillies	138
CHAPITRE 6 : RÉSULTATS DE L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ET DISCUSSION		140
6.1	Notes préliminaires	140
6.1.1	Échelles de Likert	141
6.1.2	Significativité statistique	141
6.1.3	Erreurs commises lors de la réalisation de la tâche	142
6.1.4	Désignation des groupes	143
6.1.5	Rejet des participants familiers avec les interfaces inconnues	144
6.1.6	Courbes d'apprentissage	144
6.2	Profil des participants	145
6.3	Comparaison des deux groupes de participants	148
6.4	Résultats obtenus face à l'interface du Canon Pixma MP750	149
6.4.1	Résultats obtenus face à l'interface connue	149
6.4.2	Résultats obtenus face à l'interface inconnue	153

6.4.3	Résultats obtenus face à l'interface virtuelle.....	156
6.4.4	Courbes d'apprentissage.....	160
6.5	Résultats obtenus face à l'interface du Epson Stylus CX9400Fax	161
6.5.1	Résultats obtenus face à l'interface connue	161
6.5.2	Résultats obtenus face à l'interface inconnue	165
6.5.3	Résultats obtenus face à l'interface virtuelle.....	169
6.5.4	Courbes d'apprentissage.....	172
6.6	Résultats globaux du premier groupe.....	174
6.7	Résultats globaux du second groupe.....	177
6.8	Résultats techniques	180
6.9	Analyse inférentielle des résultats obtenus	183
6.9.1	Comparaison entre les interfaces matérielles connues	183
6.9.2	Comparaison entre les interfaces matérielles inconnues	188
6.9.3	Comparaison des interfaces connues à leur contrepartie virtuelle ...	194
6.9.4	Comparaison des interfaces inconnues à leur alternative virtuelle ..	200
6.9.5	Comparaison des interfaces connues à leur alternative virtuelle	208
6.10	Discussion	216
6.10.1	Détermination de l'interface la plus appropriée pour la tâche	216
6.10.2	Coût d'utilisation des interfaces virtuelles.....	218
6.10.3	Positionnement des interfaces virtuelles face aux interfaces inconnues	222

6.10.4 Positionnement des interfaces virtuelles face aux interfaces connues ...	224
6.10.5 Acceptabilité du paradigme proposé	228
CHAPITRE 7 : CONCLUSION	232
7.1 Synthèse	232
7.2 Contributions.....	235
7.3 Futures avenues de recherche.....	237
7.3.1 Améliorations de la plateforme	237
7.3.2 Étude de modes opératoires supplémentaires.....	239
7.3.3 Découverte des fonctionnalités offertes par les appareils environnants.	
.....	240
7.3.4 Description et dissémination d'interfaces personnalisées	241
7.3.5 Interfaces adaptatives et informatique disséminée.....	242
7.3.6 Étude des comportements des utilisateurs.....	243
RÉFÉRENCES.....	245
ANNEXES.....	261

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Étapes du dialogue humain-machine, selon le paradigme proposé.....	39
Tableau 4.1 : Caractéristiques des composantes initiales de l'ordinateur porté	51
Tableau 5.1 : Énoncé de la tâche donné à chaque participant.....	99
Tableau 5.2 : Temps d'exécution minimal pour la tâche choisie, recueillis de façon empirique face aux interfaces retenues	101
Tableau 5.3 : Étude de la puissance d'un test des rangs signés de Wilcoxon en fonction du nombre de sujets par groupe et des écarts types (effet de 20 secondes, α fixé à 0.05).....	108
Tableau 5.4 : Extrait du fichier de description des capacités du Canon Pixma MP750	119
Tableau 5.5 : Extrait du fichier de description des points clés du Canon Pixma MP750	125
Tableau 5.6 : Extrait du fichier XML décrivant les composantes du Canon MP750	129
Tableau 5.7 : Décomposition horaire d'une séance de tests typique	133
Tableau 5.8 : Quiz soumis au participant pour tester sa compréhension de l'interface connue	135

Tableau 5.9 : Participation aux tests selon le groupe d'appartenance d'un participant. Légende - AF: avec familiarisation préalable, SF: sans familiarisation préalable	135
Tableau 5.10 : Compte des ordres des expériences.....	137
Tableau 6.1 : Ordre des expériences effectuées par les participants surnuméraires ..	145
Tableau 6.2 : Études de la significativité statistique des différences entre les aptitudes des deux groupes créés.....	148
Tableau 6.3 : Temps d'exécution et nb. d'erreurs commises (interface Canon connue)	149
Tableau 6.4 : Réponses aux énoncés de Likert [Q9] à [Q19] (interface Canon connue)	150
Tableau 6.5 : Charges perçues et effort moyen déployé (interface Canon connue)	152
Tableau 6.6 : Temps d'exécution et nb. d'erreurs commises (interface Canon inconnue).....	153
Tableau 6.7 : Réponses aux énoncés de Likert [Q20] à [Q30] (interface Canon inconnue).....	154
Tableau 6.8 : Charges perçues et effort moyen déployé (interface Canon inconnue)	156
Tableau 6.9 : Temps d'exécution et nb. d'erreurs commises (interface Canon virtuelle)	157

Tableau 6.10 : Réponses aux énoncés de Likert [Q31] à [Q41] (interface Canon virtuelle)	157
Tableau 6.11 : Charges perçues et effort moyen déployé (interface Canon virtuelle).....	
.....	160
Tableau 6.12 : Modèle d'apprentissage (interfaces Canon matérielle et virtuelle)	160
Tableau 6.13 : Temps d'exécution et nb. d'erreurs commises (interface Epson connue)	
.....	162
Tableau 6.14 : Réponses aux énoncés de Likert [Q9] à [Q19] (interface Epson connue)	
.....	162
Tableau 6.15 : Charges perçues et effort moyen déployé (interface Epson connue)...	165
Tableau 6.16 : Temps d'exécution et nb. d'erreurs commises (interface Epson inconnue)	
.....	165
Tableau 6.17 : Réponses aux énoncés de Likert [Q20] à [Q30] (interface Epson inconnue).....	166
Tableau 6.18 : Charges perçues et effort moyen déployé (interface Epson inconnue).....	
.....	168
Tableau 6.19 : Temps d'exécution et nb. d'erreurs commises (interface Epson virtuelle)	
.....	169
Tableau 6.20 : Réponses aux énoncés de Likert [Q31] à [Q41] (interface Epson virtuelle)	170
Tableau 6.21 : Charges perçues et effort moyen déployé (interface Epson virtuelle)	
.....	172

Tableau 6.22 : Modèle d'apprentissage (interfaces Epson matérielle et virtuelle).....	173
Tableau 6.23 : Ordonnancement des interfaces par ordre de préférence (1 ^{er} groupe)	
.....	174
Tableau 6.24 : Réponses aux énoncés de Likert sur le paradigme proposé (1 ^{er} groupe)	
.....	175
Tableau 6.25 : Tests du chi-carré de Pearson sur les préférences des participants et leurs opinions sur le paradigme proposé (1 ^{er} groupe)	176
Tableau 6.26 : Ordonnancement des interfaces par ordre de préférence (2 ^{ième} groupe)	
.....	177
Tableau 6.27 : Réponses aux énoncés de Likert sur le paradigme proposé (2 ^{ième} groupe)	
.....	178
Tableau 6.28 : Tests du chi-carré de Pearson sur les préférences des participants et leurs opinions sur le paradigme proposé (2 ^{ième} groupe)	179
Tableau 6.29 : Réponses aux énoncés de Likert [Q42] à [Q44]	180
Tableau 6.30 : Réponses aux énoncés de Likert [Q42] à [Q44] (interface Epson virtuelle)	181
Tableau 6.31 : Tests du chi-carré de Pearson sur les perceptions de l'interface Canon virtuelle	182
Tableau 6.32 : Tests du chi-carré de Pearson sur les perceptions de l'interface Epson virtuelle	182

Tableau 6.33 : Analyse de l'asymétrie et de l'aplatissement des distributions des variables continues recueillies (interfaces matérielles Canon et Epson connues)	184
Tableau 6.34 : Tests de normalité de Shapiro-Wilk sur les variables continues recueillies	185
Tableau 6.35 : Étude de la significativité statistique des différences entre les temps d'exécution, les nombres d'erreurs commises, les charges perçues et les efforts moyens déployés, pour les deux interfaces matérielles connues	186
Tableau 6.36 : Étude de la significativité statistique des différences entre les réponses aux énoncés de Likert [Q10] à [Q19], pour les deux interfaces matérielles connues	187
Tableau 6.37 : Analyse de l'asymétrie et de l'aplatissement des distributions des variables continues recueillies (interfaces matérielles Canon et Epson inconnues)	189
Tableau 6.38 : Tests de normalité de Shapiro-Wilk sur les variables continues recueillies	190
Tableau 6.39 : Étude de la significativité statistique des différences entre les temps d'exécution, pour les deux interfaces matérielles inconnues	191
Tableau 6.40 : Étude de la significativité statistique des différences entre les nombres d'erreurs commises, les charges perçues et les efforts moyens déployés, pour les deux interfaces matérielles inconnues	191

Tableau 6.41 : Étude de la significativité statistique des différences entre les réponses aux énoncés de Likert [Q21] à [Q30], pour les deux interfaces matérielles inconnues	193
Tableau 6.42 : Étude de la significativité statistique des différences entre les temps d'exécution, les nombres d'erreurs commises, les charges perçues et les efforts moyens déployés, entre l'interface matérielle connue du Canon et sa contrepartie virtuelle	194
Tableau 6.43 : Étude de la significativité statistique des différences entre les temps d'exécution, les nombres d'erreurs commises, les charges perçues et les efforts moyens déployés, entre l'interface matérielle connue du Epson et sa contrepartie virtuelle	195
Tableau 6.44 : Augmentation de la charge mentale et physique perçue, et de l'effort moyen déployé, lors d'interactions avec une interface virtuelle connue, par rapport à sa contrepartie matérielle	196
Tableau 6.45 : Étude de la significativité statistique des différences entre les réponses aux énoncés de Likert [Q10] à [Q19] et les réponses aux énoncés de Likert [Q32] à [Q41], entre l'interface matérielle connue du Canon et sa contrepartie virtuelle	198
Tableau 6.46 : Étude de la significativité statistique des différences entre les réponses aux énoncés de Likert [Q10] à [Q19] et les réponses aux énoncés de Likert [Q32] à [Q41], entre l'interface matérielle connue du Epson et sa contrepartie virtuelle	199

Tableau 6.47 : Analyse de l'asymétrie et de l'aplatissement des distributions des variables continues recueillies (interface virtuelle connue calquée sur le Canon MP750)	201
Tableau 6.48 : Analyse de l'asymétrie et de l'aplatissement des distributions des variables continues recueillies (interface virtuelle connue calquée sur le Epson CX9400Fax).....	201
Tableau 6.49 : Étude de la significativité statistique des différences entre les temps d'exécution, les nombres d'erreurs commises, les charges perçues et les efforts moyens déployés, entre l'interface matérielle inconnue du Canon MP750 et l'interface virtuelle connue calquée sur le Epson CX9400Fax	202
Tableau 6.50 : Étude de la significativité statistique des différences entre les temps d'exécution, les nombres d'erreurs commises, les charges perçues et les efforts moyens déployés, entre l'interface matérielle inconnue du Epson CX9400Fax et l'interface virtuelle connue calquée sur le Canon MP750	202
Tableau 6.51 : Étude de la significativité statistique des différences entre les réponses aux énoncés de Likert [Q21] à [Q30] et les réponses aux énoncés de Likert [Q32] à [Q41], entre l'interface matérielle inconnue du Canon MP750 et l'interface virtuelle connue calquée sur le Epson CX9400Fax	204

Tableau 6.52 : Étude de la significativité statistique des différences entre les réponses aux énoncés de Likert [Q21] à [Q30] et les réponses aux énoncés de Likert [Q32] à [Q41], entre l'interface matérielle inconnue du Epson CX9400Fax et l'interface virtuelle connue calquée sur le Canon MP750	206
Tableau 6.53 : Différences significatives détectées entre l'interface matérielle inconnue du Canon MP750 et l'interface virtuelle connue calquée sur le Epson CX9400Fax	207
Tableau 6.54 : Différences significatives détectées entre l'interface matérielle inconnue du Epson CX9400Fax et l'interface virtuelle connue calquée sur le Canon MP750	208
Tableau 6.55 : Étude de la significativité statistique des différences entre les temps d'exécution, les nombres d'erreurs commises, les charges perçues et les efforts moyens déployés, entre l'interface matérielle connue du Canon MP750 et l'interface virtuelle connue calquée sur le Epson CX9400Fax	209
Tableau 6.56 : Étude de la significativité statistique des différences entre les temps d'exécution, les nombres d'erreurs commises, les charges perçues et les efforts moyens déployés, entre l'interface matérielle connue du Epson CX9400Fax et l'interface virtuelle connue calquée sur le Canon MP750	210

Tableau 6.57 : Étude de la significativité statistique des différences entre les réponses aux énoncés de Likert [Q10] à [Q19] et les réponses aux énoncés de Likert [Q32] à [Q41], entre l'interface matérielle connue du Canon MP750 et l'interface virtuelle connue calquée sur le Epson CX9400Fax	213
Tableau 6.58 : Étude de la significativité statistique des différences entre les réponses aux énoncés de Likert [Q10] à [Q19] et les réponses aux énoncés de Likert [Q32] à [Q41], entre l'interface matérielle connue du Epson CX9400Fax et l'interface virtuelle connue calquée sur le Canon MP750	214
Tableau 6.59 : Différences significatives détectées entre l'interface matérielle connue du Canon MP750 et l'interface virtuelle connue calquée sur le Epson CX9400Fax	215
Tableau 6.60 : Différences significatives détectées entre l'interface matérielle connue du Epson CX9400Fax et l'interface virtuelle connue calquée sur celle du Canon MP750	215
Tableau 6.61 : Augmentation des temps d'exécution, des charges mentale et physique perçues, et des efforts moyens déployés, lors d'interactions avec les interfaces virtuelles développées, par rapport à leur contrepartie matérielle, toutes connues des utilisateurs	218

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 :	Illustration de la virtualisation d'une interface matérielle (interactions humain-interface matérielle, à gauche, et humain-interface virtualisée, à droite)	5
Figure 3.1 :	Schématisation des interactions humain-machine suite à la virtualisation d'une interface matérielle.....	38
Figure 4.1 :	Composantes de l'ordinateur porté intégrées dans la veste Campco	51
Figure 4.2 :	Schématisation de l'architecture matérielle de l'ordinateur porté.....	52
Figure 4.3 :	Dispositif d'affichage tête haute, incorporant le capteur CCD utilisé, monté en position centrale (vue de face, à gauche et vue de derrière, à droite)	55
Figure 4.4 :	Schématisation de la localisation d'extrema dans une image, sur 2 octaves, en utilisant 4 niveaux par octave ($k \cong 1.189$).....	59
Figure 4.5 :	Illustration du calcul des caractéristiques locales aux points clés.....	63
Figure 4.6 :	Détection des points clés de référence sur l'interface d'une chaîne Panasonic SA-AK520 (A) et localisation de cette interface dans différentes images de tests, par mise en correspondance des points clés affichés en rose (B à G).....	67

Figure 4.7 :	Suivi par flot optique de l'interface d'une chaîne stéréophonique Panasonic SA-AK520, durant un intervalle de 3.2 secondes.....	71
Figure 4.8 :	Segmentation de la main de l'utilisateur dans la zone à l'intérieur de laquelle l'interface d'une chaîne stéréophonique Panasonic SA-AK520 fut localisée	73
Figure 4.9 :	Fichiers de description graphique d'une interface personnalisée de la famille « chaînes stéréophoniques » : (A) interface au repos, (B) interface active, (C) masque de transparence et (D) fichier de code de couleur identifiant chaque composante.....	76
Figure 4.10 :	Placement et intégration d'une interface personnalisée face à une chaîne stéréophonique Panasonic SA-AK520, incluant l'identification de l'extrémité du doigt actif et l'utilisation d'un masque d'affichage lors du rendu de l'interface (A); les écrans de contrôle du flot optique (1) et de détection SIFT (2), l'image originelle (3), les écrans de segmentation des mains (4, 5) et la console de déboggage (6) sont aussi présentés....	81
Figure 4.11 :	Émetteur/récepteur universel infrarouge.....	88
Figure 4.12 :	Transmission d'instructions de contrôle à une chaîne stréréophonique Panasonic SA-AK520, par l'intermédiaire d'une interface personnalisée et d'un émetteur infrarouge USB : (A) identification de la composante à activer grâce au fichier de code de couleur (mis en transparence pour illustration) et (B) transmission de la commande	89
Figure 5.1 :	Site internet présentant l'étude aux participants intéressés.....	104

Figure 5.2 :	Étude de la puissance d'un test des rangs signés de Wilcoxon en fonction du nombre de sujets par groupe, pour détecter un effet de 1 unité (écart type de 1 unité et α fixé à 0.05).....	109
Figure 5.3 :	Appareils retenus (Canon MP750 à gauche, Epson CX9400Fax à droite)	111
Figure 5.4 :	Schéma annoté de l'interface du Canon MP750.....	111
Figure 5.5 :	Schéma annoté de l'interface du Epson CX9400Fax	112
Figure 5.6 :	Chemin pour réaliser la tâche demandée (Canon Pixma MP750)	114
Figure 5.7 :	Chemin pour réaliser la tâche demandée (Epson Stylus CX9400Fax)	115
Figure 5.8 :	Illustration du flot d'informations à l'intérieur du module de contrôle.....	120
Figure 5.9 :	Schématisation des modules ajoutés ou modifiés, ainsi que de leurs rôles et interactions, pour supporter les interfaces virtuelles testées	122
Figure 5.10 :	Photo de l'interface matérielle du Canon Pixma MP750 à partir de laquelle les points clés de référence (en bleu) furent calculés pour la décrire géométriquement.....	124
Figure 5.11 :	Photo de l'interface matérielle du Epson Stylus CX9400Fax à partir de laquelle les points clés de référence (en bleu) furent calculés pour la décrire géométriquement.....	125

Figure 5.12 : Détection des interfaces matérielles des appareils multifonctions retenus; les points roses représentent les points clés pour lesquels une correspondance avec les caractéristiques de référence a été établie.	126
Figure 5.13 : Illustration de la localisation et du calcul de l'orientation de l'interface matérielle du Canon MP750 sous différents angles de vue (A, B, C & D), en présence d'obstruction partielle (E) et en faible éclairage (F). ..	126
Figure 5.14 : Description graphique de l'interface virtuelle (A) calquée sur l'interface matérielle du Canon Pixma MP750 (B).....	127
Figure 5.15 : Description graphique de l'interface virtuelle (A) calquée sur l'interface matérielle du Epson Stylus CX9400Fax (B).....	128
Figure 5.16 : Imposition, face à un appareil Canon MP750 inconnu de l'utilisateur, d'une interface virtuelle familière calquée sur celle du Epson CX9400Fax; les images originelles situées dans les coins supérieurs droits furent rajoutées post-capture, à titre informatif. ..	128
Figure 5.17 : Capture, lors de la réalisation de la tâche demandée face à un appareil Epson CX9400Fax, des réponses de l'interface virtuelle utilisée, calquée sur celle du Canon MP750; les images originelles situées dans les coins supérieurs droits furent rajoutées post-capture.	130
Figure 5.18 : Organisation de la salle d'utilisabilité	132
Figure 5.19 : Cartons disposés sur les tableaux récapitulatifs.....	133
Figure 5.20 : Extrait des 24 pages du guide de familiarisation du Canon Pixma MP750	136

Figure 5.21 : Extrait des 23 pages du guide de familiarisation du Epson CX9400Fax	136
Figure 6.1 : Profil des participants appartenant au premier groupe.....	146
Figure 6.2 : Profil des participants appartenant au second groupe.....	147
Figure 6.3 : Courbes d'apprentissage (interfaces Canon matérielle et virtuelle).....	161
Figure 6.4 : Courbes d'apprentissage (interfaces Epson matérielle et virtuelle)	173
Figure 6.5 : Courbes d'apprentissage (interfaces Canon matérielle et virtuelle, rectifiée en éliminant les délais d'activation des composantes).....	220
Figure 6.6 : Courbes d'apprentissage (interfaces Epson matérielle et virtuelle, rectifiée en éliminant les délais d'activation des composantes).....	220
Figure 6.7 : Courbes d'apprentissage (interfaces Canon et Epson matérielles et virtuelles)	226
Figure 6.8 : Courbes d'apprentissage (interfaces Canon et Epson matérielles et virtuelles, rectifiées en éliminant les délais d'activation des composantes).....	228

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

API	"Application Programming Interface", interface de programmation applicative.
DOF	"Degree Of Freedom", degrés de liberté.
fps	"Frames Per Second", images par seconde.
GOMS	"Goals, Operators, Methods, Selection rules", méthode d'analyse de tâche basée sur les buts, les opérateurs, les méthodes et les règles de sélection.
GUI	"Graphical User Interface", interface utilisateur graphique.
HSV	"Hue-Saturation-Value", espace de couleur basé sur les composantes de teinte, de saturation et de valeur.
IP	"Internet Protocol", protocole Internet situé au niveau réseau du modèle TCP/IP.
IV	Interface virtuelle, présentée en réalité augmentée.
LCD	"Liquid Crystal Display", affichage à cristaux liquides.
LED	"Light Emitting Diode", diode électroluminescente.
max.	Maximum ou maximal(e), utilisé, entre autres, lors du rapport de mesures.
min.	Minimum ou minimal(e), utilisé, entre autres, lors du rapport de mesures.

moy.	Moyen(ne), utilisé, entre autres, lors du rapport de mesures.
PDA	"Personal Digital Assistant" , assistant numérique personnel.
PUC	"Personal Universal Controller" , contrôleur ou télécommande personnel universel.
RGB	"Red Green Blue" , espace de couleur basé sur les composantes de rouge, de vert et de bleu.
SIFT	"Scale Invariant Feature Transform" , transformation des caractéristiques d'une image en une description invariante aux changements d'échelles. Les descripteurs retenus sont appelés points clés (<i>keypoints</i>) ou, par abus de langage, caractéristiques SIFT (<i>SIFTfeatures</i>).
std.	Standard, utilisé lors du rapport de mesures statistiques.
TCP	"Transmission Control Protocol" , protocole de contrôle de transmissions situé au niveau de la couche transport du modèle TCP/IP.
USB	"Universal Serial Bus" , port série universel.
VGA	"Video Graphic Array" , utilisé dans cette thèse en tant que connecteur analogique (et non comme standard d'affichage), servant à raccorder une carte graphique à un moniteur.
WIMP	"Window Icon Menu Pointing device" , style d'interaction basé sur les fenêtres, les icônes, les menus et les pointeurs.

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A : CERTIFICAT DE CONFORMITÉ ÉTHIQUE	261
ANNEXE B : QUESTIONNAIRE REMPLI PAR LES PARTICIPANTS LORS DE L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE.....	263
ANNEXE C : EXTRAITS DU FICHIER DE DESCRIPTION XML DES ÉTATS D'UNE INTERFACE VIRTUELLE CALQUÉE SUR UN APPAREIL MULTIFONCTION EPSON STYLUS CX9400FAX	270

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

Ce premier chapitre présente nos recherches qui tentent de pallier à la complexification des interfaces matérielles¹, tant réelle que perçue. Il commence par identifier rapidement les origines de cette complexification ainsi que les solutions qui ont été avancées au fil du temps, pour nous permettre, une fois les limites de ces dernières exposées, de mettre en scène une nouvelle avenue de recherche s'attaquant à l'immuabilité de ces interfaces, source de leur difficulté à s'adapter aux besoins et aux attentes de chaque utilisateur. En terminant, ce chapitre expose la structure de cette thèse, afin de permettre au lecteur d'en comprendre l'organisation.

1.1 Des interfaces de plus en plus complexes

La miniaturisation électronique, combinée à une tendance à la fusion des fonctionnalités des différentes machines de notre environnement, a mené, au cours des deux dernières décennies, à la conception d'appareils cumulant de plus en plus de rôles distincts et de

¹ *déf. interface matérielle : terme décrivant une interface humain-machine électromécanique exhibée par un appareil de l'environnement.*

fonctions secondaires. De concert avec ce phénomène de convergence, les interfaces matérielles ont évolué afin de permettre aux utilisateurs d'accéder à ces nouvelles fonctionnalités, historiquement étrangères à un appareil donné.

Malheureusement, alors qu'intégrer un microprocesseur pour supporter à l'interne les nouvelles fonctionnalités d'un appareil s'avère relativement rapide et peu coûteux, la conception et les tests d'une interface de plus en plus étendue sont devenus longs, ardu et onéreux, poussant parfois certains manufacturiers à mettre en marché plusieurs interfaces de faible qualité. Nous avons ainsi assisté au cours des dernières années à une convergence des fonctionnalités, certes, mais aussi à une complexification réelle des interfaces, que ce soit face au nombre sans cesse croissant des composantes qu'elles exposent à l'utilisateur ou des longs chemins qu'elles nous imposent pour accéder à une fonction donnée [1, 2]. Comme si ce n'était pas assez, il semble que cette complexification commence à s'alimenter elle-même, que cette augmentation du nombre de composantes et de fonctionnalités aide insidieusement chaque interface à se différencier des autres, source de cette incohérence, de cette complexité perçue qui nous déroute lorsque, face à une machine inconnue, nous tentons de faire les parallèles avec l'interface d'un appareil familier supportant globalement les mêmes fonctionnalités, mais dont l'interface est toute autre. Bref, ce phénomène de complexification semble bien réel et il ne faut pas chercher très loin pour citer, à titre d'exemple, tous ces modèles de radios qui, initialement limités à deux ou trois roulettes en guise de panneau de contrôle, proposent maintenant des interfaces extrêmement étendues et hétérogènes,

afin de supporter leurs rôles de multiples lecteurs de cassettes et de disques compacts, d'enregistreurs, de mixeurs de signal, de minuterie, etc.

1.2 Quelques solutions limitées

Heureusement, parallèlement à cette évolution, des procédés (ex. : design centré sur l'utilisateur [3], conception pour tous [4]) et des lignes directrices de conception [5] ont été formalisés pour tenter de contrôler la complexification des interfaces, des méthodes d'évaluation de l'utilisabilité ont vu le jour (méthodes heuristiques [6], *cognitive walkthrough* [7]), des normes ont été édifiées [8] et de plus en plus de chercheurs et d'industries s'entendent pour mettre de l'avant une certaine cohérence entre les interfaces, afin de diminuer quelque peu la charge cognitive de l'utilisateur [9], [10].

Toutefois, ces travaux, qui tentent de minimiser la complexité d'une interface générique pour améliorer l'utilisabilité de la machine qu'elle supporte, ne règlent qu'une partie du problème. Au mieux, en supposant que ces notions soient adoptées par tous, elles permettront, pour une famille d'appareils donnée, de proposer à un marché de masse une unique interface, statique, générique et médiane, répondant globalement aux attentes des tous, mais non aux besoins spécifiques de chacun, ne domptant ainsi pas complètement ce phénomène de complexification que nous énoncions plus tôt. Au pire, elles ne seront d'aucune utilité face aux interfaces déjà conçues et déployées dans notre environnement.

1.3 Une nouvelle avenue de recherche : la virtualisation

L'immuabilité des interfaces matérielles, source de leur inadaptabilité aux besoins de chaque utilisateur, semble ainsi être au centre des limites des solutions actuelles. Face à ce constat, une issue prometteuse prône leur virtualisation : en abstrayant les interfaces de leur support matériel, en les exprimant de façon purement logicielle et en les réintégrant aux machine sous une forme de réalité augmentée, les interfaces, initialement statiques, deviendraient dynamiques, modifiables et personnalisables. Par l'intermédiaire d'ordinateurs portés jouant le rôle de médiateurs au sein d'une réalité interposée², la virtualisation d'interfaces pourrait ainsi permettre de diminuer la complexité des interfaces mécaniques et électriques environnantes, en dissociant les fonctionnalités de leurs contrôles, en favorisant la naissance d'une infinité d'interfaces répondant aux besoins de chacun (Figure 1.1).

Cette virtualisation des interfaces matérielles, mère du nouveau paradigme d'interactions humain-machine que nous proposons, permettra initialement à chaque utilisateur de contourner des interfaces mal adaptées à ses besoins, d'imposer les siennes à des appareils donnés, d'en contrôler la complexité et d'unifier, sur une base intimement personnelle, les interfaces de son environnement.

² *déf. réalité interposée (mediated reality) : terme décrivant la diminution, la modification ou l'augmentation de la réalité par un système interposé altérant la perception de l'utilisateur de son environnement; en ce sens, la réalité interposée englobe la réalité augmentée [11].*

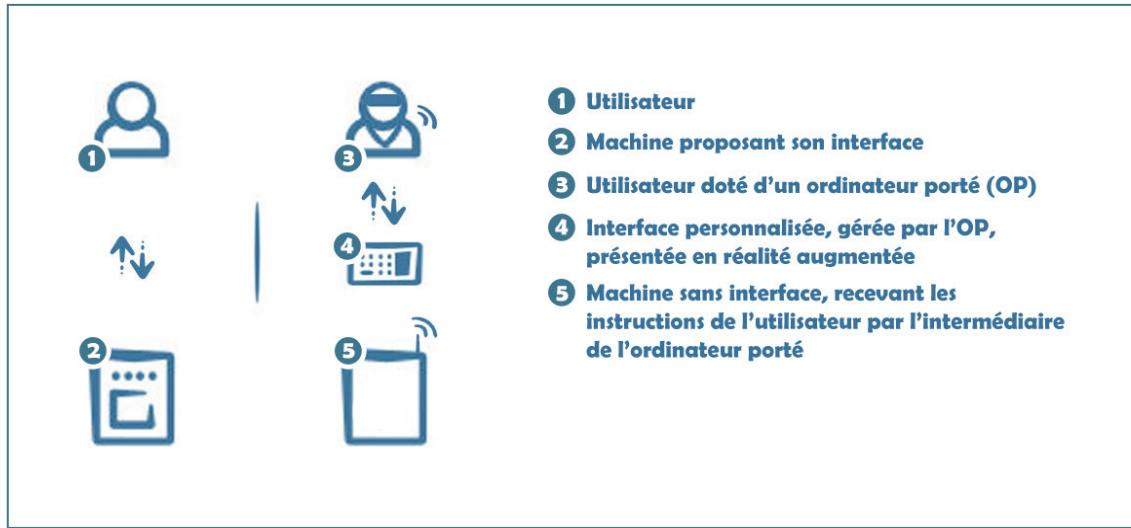


Figure 1.1 : Illustration de la virtualisation d'une interface matérielle (interactions humain-interface matérielle, à gauche, et humain-interface virtualisée, à droite)

Les interfaces matérielles seraient ainsi peu à peu appelées à disparaître, au profit d'interfaces virtuelles, malléables, permettant enfin d'appliquer toutes les notions de design d'interfaces sur un plan personnel, introduisant ultimement dans le monde réel toutes les caractéristiques de leurs consœurs logicielles, tels l'adaptabilité et le guidage, afin de permettre aux utilisateurs de dialoguer efficacement avec une nouvelle génération d'appareils, dépourvus de tout contrôle.

1.4 Structure de la thèse

Après avoir présenté ici les motivations et la portée de notre étude, nous poursuivrons notre mise en situation des techniques actuelles de virtualisation dans le prochain chapitre, sous forme d'une revue de littérature qui s'attardera sur les appareils

intelligents, les contrôleurs universels personnels (*personal universal controller* ou PUC), petits frères des interfaces virtuelles telles que nous les proposons, ainsi que sur les techniques, le matériel et les applications reliés à la réalité augmentée. Le troisième chapitre introduira formellement la problématique de cette thèse, ainsi que les objectifs généraux et spécifiques que nous tenterons d'atteindre. Une fois sorti du cadre théorique, le quatrième chapitre présentera le développement, tant matériel que logiciel, de la plateforme supportant le concept de virtualisation d'interfaces que nous proposons, avant de passer à une étude d'utilisabilité des interfaces virtuelles, étude dont nous présenterons la méthodologie dans le cinquième chapitre ainsi que les résultats et leur interprétation dans le sixième chapitre. Cette discussion étudiera, entre autres, la viabilité, l'efficacité et la propension des interfaces virtuelles, telles qu'implémentées, à contrer le phénomène de complexification que nous exposons plus tôt, et à supplanter différentes interfaces matérielles, connues et inconnues des utilisateurs. Le septième chapitre nous permettra, quant à lui, d'effectuer une synthèse de ce nouveau paradigme d'interactions humain-machine, de présenter les contributions, tant théoriques que pratiques, de nos recherches sur la virtualisation d'interfaces et d'exposer les travaux futurs envisagés.

CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE SUR LA SIMPLIFICATION DES INTERFACES MATÉRIELLES ET L'INFORMATIQUE PORTÉE

La virtualisation des interfaces matérielles peut être considérée comme l'aboutissement naturel des recherches sur leur simplification et des poussées faites dans les domaines de la réalité augmentée et de l'informatique portée. La première partie de cette revue de littérature s'attardera donc sur les travaux actuels visant à diminuer la complexité d'utilisation d'une machine, tels ceux portant sur les appareils intelligents et les contrôleurs universels personnels. La deuxième partie, quant à elle, présentera un état de l'art sur l'informatique portée et sur la réalité augmentée, ces deux domaines allant de paire, et montrera pourquoi les ordinateurs portés constitueraient un support de choix pour proposer aux utilisateurs des interfaces virtuelles, personnelles et transparentes, disponibles en tous lieux et en tout temps. Chaque fois, après avoir exposé l'état actuel des recherches dans chacun des domaines énoncés, une critique synthétisant les avancées et les limites des travaux présentés sera explicitée, afin d'identifier leurs rôles dans la proposition et la mise en place de ce concept de virtualisation d'interfaces matérielles.

2.1 Simplification de la complexité d'utilisation des machines

Pour pallier au problème de complexité d'utilisation des machines, et outre les techniques et lignes directrices de design d'interfaces énoncées à la section 1.2, deux courants de pensées ont émergé au cours des dernières années : l'un cible la logique interne des appareils afin de les rendre plus « intelligents », pour automatiser certains services (concept d'appareils intelligents ou de *smart appliances* [12]), tandis que l'autre s'attaque directement aux interfaces actuelles et prône le contournement de celles de piètre qualité. Ces deux courants s'inscrivent en fait dans la conception de l'informatique ubiquitaire que Weiser imaginait [13] et qui se décompose ici en une diffusion de l'informatique dans l'environnement (*pervasive computing*), afin de rendre chaque appareil « conscient » de son contexte d'utilisation [14], et en une diffusion sur l'utilisateur (*wearable computing*), pour doter chacun d'entre nous d'un nouvel outil de communication avec chaque machine. Ces deux courants tentent non seulement d'atteindre ultimement le même but mais se complètent aussi l'un l'autre. D'un côté, afin de contourner les panneaux de contrôle des machines actuelles, ces dernières doivent être augmentées, sur le plan matériel et logiciel, pour pouvoir dialoguer avec l'utilisateur d'une autre manière. De l'autre, l'utilisateur ne peut être exclu du contexte d'utilisation des machines et le doter de capteurs ou d'un moyen de dialogue implicite avec chaque appareil permettra à ces dernières de mieux prendre « conscience » de leur environnement.

2.1.1 Appareils intelligents

Le concept d'appareils intelligents [12] était initialement limité à des appareils incorporant différents senseurs à l'interne et évoluant indépendamment pour :

- économiser de l'énergie (ex. : détection d'eau en ébullition dans une cafetière);
- automatiser certaines fonctions manuelles afin de simplifier l'utilisation d'une machine et décharger son interface (ex. : estimation automatique de la charge dans une machine à laver);
- introduire de nouvelles fonctionnalités (ex. : stabilisation du volume à la sortie d'une chaîne stéréophonique, indépendamment de l'amplitude à la source).

Depuis, plusieurs recherches tentent de faire collaborer ces machines entre elles, afin que chacune puisse utiliser les données recueillies par les autres pour obtenir une meilleure représentation du contexte global dans lequel elles évoluent et minimiser les interventions de l'utilisateur. Nous avons ainsi assisté, au cours de la dernière décennie, à la mise au point de plusieurs espaces intelligents (*smart spaces*) tels la Reactive Room [15] et la Intelligent Classroom [16] de l'Université McGill, contrôlant respectivement l'appareillage d'une salle de vidéoconférence et d'une salle de classe en fonction d'actions implicites des présentateurs et des professeurs, le Microsoft EasyLiving [17], détectant la présence d'utilisateurs dans l'environnement et ajustant les conditions ambiantes en conséquence, le iRoom de l'Université de Stanford [18], le projet Oxygen du M.I.T. [19] et le projet Aura de l'Université Carnegie Mellon [20].

Parallèlement, d'autres recherches tentant d'unifier les langages de communication entre ces machines ont été menées, afin de passer d'espaces intelligents très localisés et propriétaires à des environnements plus flexibles. Notons entre autres dans ce domaine la mise au point de « *middlewares* » tels *Cogma* [21] et *SodaPop* [22] qui, à terme, permettront peut-être d'aboutir à la notion d'intelligence ambiante (*ambient intelligence*) [23], mise de l'avant par le *European Commission's Information Technologies Advisory Group*. Les recherches actuelles sur le Web sémantique [24] ne sont non plus pas étrangères au domaine des appareils intelligents et semblent plus structurantes que les « *middlewares* » proposés. Bien que ces travaux soient principalement axés sur l'élaboration d'une signification intelligible par les ordinateurs des informations disponibles sur Internet, ces recherches ont déjà des retombées dans le monde réel et permettent à des machines d'échanger de l'information et des commandes sous un format commun intelligible depuis quelques années. Finalement, le projet d'un espace sémantique (*semantic space*), évolution directe des espaces intelligents, lancé par Wang et al. en 2004 [25], propose maintenant une infrastructure globale de communication entre les machines de l'environnement et l'illustre par l'exemple d'un téléphone sensible au contexte, capable de détecter s'il doit reléguer un appel à une boîte vocale ou le signaler en mode vibration, dépendant du contexte dans lequel se situe l'utilisateur (selon la planification disponible dans son agenda, l'identité de l'appelant, etc.).

Critique

Ces travaux, dotant la machine d'une certaine forme d'intelligence, permettent de minimiser le dialogue entre l'utilisateur et les appareils de son environnement (ex. : limiter les changements manuels de modes d'un téléphone dans les recherches de Wang et al. [25]). De ce fait, ils simplifient leur utilisation, en automatisant certaines des interactions que nous devrions avoir avec ces appareils et en déchargeant quelque peu leur interface des contrôles des fonctions maintenant entièrement automatisées. Toutefois, ces recherches sur les appareils intelligents ne résolvent qu'en partie le problème de complexification des interfaces car elles n'apportent pas de solution lorsqu'un dialogue humain-machine devient nécessaire et que nous faisons alors face à une interface inconnue, mal adaptée à nos besoins ou mal conçue. C'est dans cette optique que s'inscrit l'idée de contourner ces interfaces matérielles génériques, de les adapter, afin de pouvoir dialoguer efficacement avec chaque machine lorsque nous en aurons besoin.

2.1.2 Contrôleurs universels

L'idée de contourner l'interface matérielle d'une machine a déjà été étudiée. L'utilisation de simples télécommandes, qui exposent parfois des interfaces de meilleure qualité que leur panneau de contrôle respectif, devant à la fois s'intégrer au design mais aussi à l'ingénierie d'une machine (routage des fils, consommation d'énergie des affichages, aire consacrée au placement des boutons, etc.), peut en être un exemple probant. C'est dans cette même lignée que s'inscrivent les recherches actuelles sur les

contrôleurs universels qui convergent toutes vers l'introduction d'une télécommande unique, proposant une interface facile d'utilisation, adaptée³ et adaptable⁴ à tous les appareils de l'environnement.

Aspects matériels

Pour dialoguer efficacement avec les appareils de notre environnement, les recherches de Nichols et Myers sur les *Personal Universal Controllers* (partie du *Pebbles project* de l'Université Carnegie Mellon [26]) et de Saito sur le *Smart Baton System* [27] proposent de recourir à des assistants numériques personnels (PDA), de plus en plus abordables et répandus, afin de mettre à profit des écrans tactiles, disponibles en tous lieux et en tout temps, sur lesquels afficher l'interface remaniée d'un appareil donné. En dotant chaque utilisateur d'un tel support et en exprimant chaque interface matérielle sous une forme purement logicielle, ces recherches aboutissent naturellement à une « abstraction » des panneaux de contrôle originels tout en garantissant une adéquation complète entre les interfaces de ces différents appareils. Pour que ces derniers soient réceptifs aux commandes de l'utilisateur et pour qu'ils puissent y répondre, des modifications matérielles sont toutefois parfois nécessaires au niveau du matériel des appareils visés. Ainsi, face à des appareils ne supportant aucune communication bidirectionnelle infrarouge (IrDA [28]), Nichols et Myers ont introduit des adaptateurs (*appliance adaptor*) convertissant les signaux externes sous le protocole utilisé à l'interne par

³ déf. adaptée : terme désignant une interface conçue *a priori* pour un appareil donné.

⁴ déf. adaptable : terme désignant une interface pouvant être adaptée, *a posteriori*, à un appareil donné.

l'appareil et vice-versa; ils ont ainsi déjà complété des adaptateurs pour les protocoles Jini [29], AV/C, HAVi [30] et UPnP [31]. D'autres travaux, quelque peu similaires à ceux présentés plus tôt et menés par Tezuka [32] et Chang-Chien [33], préconisent l'introduction d'un système propriétaire, à l'instar d'un assistant numérique personnel, dans le domaine de la domotique, pour contrôler différents appareils ménagers. Comme Nichols et Myers, Tezuka et Chang-Chien ont recours à différents adaptateurs pour communiquer avec les appareils ne possédant pas d'émetteurs et de récepteurs infrarouges ou Bluetooth [34]. Finalement, d'autres recherches plus en périphérie, telles celles de Hodes [35], peuvent être mentionnées car, même si elles s'attardent plus sur l'infrastructure réseau que sur les interfaces, elles introduisent elles-aussi ce concept d'un même interacteur universel (*universal interacter*), utilisé pour contrôler différents appareils de l'environnement.

Bref, sur le plan matériel, il semble que de nombreuses recherches s'attardent sur ce concept d'une télécommande universelle, pour, d'un côté, unifier les télécommandes actuelles en une seule (notons d'ailleurs que, sur le plan commercial, de telles télécommandes sont déjà disponibles depuis plusieurs années, comme la série Harmony de Logitech [36]) et, de l'autre, introduire cette télécommande unique dans l'univers des appareils qui n'en possédaient pas encore, grâce à différents adaptateurs, pour contourner certains panneaux de contrôle mal adaptés.

Aspects logiciels

Sur le plan logiciel, les recherches sur les *Personal Universal Controllers* et le *Smart Baton System* apportent chacune des contributions distinctes et importantes pour la virtualisation d'interfaces. Saito, contrairement aux PUC qui communiquent directement avec chaque appareil, introduit dans son système un gestionnaire de certificats qui contrôle l'accès à chaque machine, en fonction de l'identification de l'utilisateur, encodée dans la fréquence du laser utilisé pour pointer l'appareil d'intérêt. Ce gestionnaire contrôle ainsi les droits d'accès à un appareil donné et module l'interface qu'un utilisateur reçoit de cette machine. Cette modulation de l'interface est extrêmement intéressante car, bien que minimale et tributaire de l'interface imposée par la machine (et non souhaitée par l'utilisateur), elle lance les fondations pour l'adaptation d'une interface prédéfinie en fonction du client. La gestion des préférences de l'utilisateur dans la présentation d'une interface pourrait être ainsi assimilée au même principe. Nichols et Myers, quant à eux, proposent un système de génération automatique des interfaces pour leur PUC [37, 38]. Ils le justifient en mentionnant qu'à long terme, un tel processus sera moins coûteux que de concevoir manuellement chaque interface pour leur contrôleur. En basant leur système sur des règles de génération globales, Nichols et Myers s'assurent d'imposer une certaine cohérence automatique entre différentes interfaces et de supporter, dans le futur, plusieurs fonctionnalités non encore développées [39]. Pour l'instant, l'interface générée dépend uniquement des capacités et des fonctionnalités des appareils représentés mais il serait fort probable de pouvoir réutiliser ce même concept en incorporant les préférences de l'utilisateur lors de

la génération des interfaces. Techniquement, le système de génération, localisé sur l'assistant personnel, reçoit une description XML des fonctionnalités de l'appareil et se base sur cette dernière pour concevoir automatiquement l'interface [40]. Récemment, Nichols et al. ont proposé de se baser sur des patrons (*smart templates*) pour améliorer la qualité des interfaces générées automatiquement [41].

Outre ces recherches, d'autres travaux s'attardent aussi sur des langages de spécification d'interfaces indépendantes du matériel. Soulignons notamment le projet ICrafter [42] supportant à la fois des interfaces statiques et, de façon embryonnaire, des interfaces générées automatiquement même si cela ne constitue pas le but primaire du projet. Notons aussi la mise en place du UIML [43] qui devrait permettre d'élaborer une description d'interface indépendante des appareils et qui est supporté actuellement par différents générateurs tels HTML, JavaSwing et VoiceXML. Malheureusement, bien que des recherches actuelles tentent de corriger ces problèmes [44], l'UIML est encore fortement basé sur une relation explicite entre les éléments décrits et leurs formes concrètes, ce qui diminue quelque peu son indépendance. Finalement, bien qu'aucune évolution n'ait pu être notée depuis 2002, nous pouvons souligner les efforts de standardisation du groupe INCITS V2 [45] qui tentait d'aboutir à un langage de description commun des fonctions d'une interface.

Critique

Une étude préliminaire de Nichols et Myers [38] met en relief la piètre qualité de certaines interfaces matérielles actuelles en démontrant que la réalisation de différentes

tâches sur un téléphone ou une chaîne stéréophonique spécifique par l'intermédiaire de leur contrôleur universel nécessite moitié moins de temps et produit moitié moins d'erreurs que leur réalisation à l'aide du panneau de contrôle intégré de ces appareils. Face à des interfaces matérielles de faible qualité, l'idée de pouvoir les contourner et de dialoguer avec chaque appareil par l'intermédiaire d'un unique outil proposant une interface révisée et forçant une certaine cohérence d'un appareil à l'autre est attrayante et semble, à la lumière de ces résultats, améliorer l'utilisabilité de ces machines.

Malheureusement, de par son support et son implémentation, cette idée n'est pas menée aussi loin qu'elle pourrait l'être et aboutit simplement, pour le moment, à la conception d'une télécommande adaptable à chaque appareil de l'environnement et proposant une meilleure interface générique. D'un côté, cette vision, pour certains appareils pouvant supporter initialement ou après quelques modifications des commandes à distance, ne revient qu'à proposer une télécommande révisée et standardisée. D'un autre côté, elle se généralise mal, ne s'adapte pas aux appareils dont l'utilisation ne peut être entièrement réalisée par télécommande (guichet bancaire, téléphone, grue, etc.) et diminue involontairement leur utilisabilité : l'utilisation d'un PUC pour composer un numéro téléphonique imposerait par exemple 1) de décrocher le combiné, 2) de le déposer afin de 3) mettre en fonction le PUC et composer le numéro de téléphone par son intermédiaire pour finalement 4) reprendre le combiné pour parler à l'interlocuteur. Les contrôleurs universels actuels proposent donc une idée attrayante mais faillissent sur plusieurs points :

1. ils n'incorporent pas les préférences et les besoins spécifiques de l'utilisateur dans l'interface proposée, ce qui pourrait améliorer considérablement l'utilisabilité des machines représentées;
2. ils restreignent l'utilisateur à un espace de travail fini, souvent diminué par rapport à l'espace initial (ex. : transposer le panneau de contrôle complet d'une chaîne stéréophonique sur un écran de quelques centimètres carrés);
3. ils délocalisent l'interface proposée de son support matériel (c.-à-d. qu'ils n'intègrent pas l'interface utilisée au monde réel) et ne peuvent donc par exemple pas guider l'utilisateur en altérant virtuellement une interface physique ou une partie d'intérêt sur la machine [46];
4. ils imposent une scission de la focalisation de l'attention lors de la réalisation d'une tâche (ex. : passer d'insérer une carte bancaire à un guichet automatique à dialoguer avec un contrôleur universel);
5. ils altèrent et dénaturent les modes d'opération des composantes originaux d'une interface, en réduisant par exemple des manettes et des pédales à de simples boutons tactiles sur un écran;
6. ils imposent l'utilisation d'un outil non transparent, tant sur le plan physique (assistant numérique occupant les mains l'utilisateur) que perceptuel, ce qui va à l'encontre des caractéristiques d'un bon outil technologique selon Norman, outil qui devrait s'effacer devant la tâche [47];
7. ils se coupent de leur contexte d'utilisation, de par les plateformes utilisées dont les fonctionnalités sont limitées, et ne peuvent en tirer profit pour faciliter une

tâche en adaptant, par exemple, l'interface d'une machine en fonction des activités passées de l'utilisateur, de son environnement, etc. (*situated computing* [48]).

Bien que nous espérons que la virtualisation d'interfaces puisse, à terme, proposer une solution plus générale et répondant à toutes les limites des PUC énumérées ci-haut, nos travaux ne tenteront de répondre qu'aux problèmes de restriction de l'espace de travail (2), de délocalisation de l'interface (3) et de scission de la focalisation (4) qu'entraîne l'utilisation d'outils non transparents (6) comme les PUC. Une fois ces limitations résolues et l'utilité des interfaces virtuelles établie, des travaux futurs pourront améliorer la personnalisation (statique ou dynamique) des interfaces proposées (1), intégrer à ces dernières les résultats des recherches actuelles sur la sensibilité au contexte des ordinateurs portés (7) et faire appel à des périphériques supplémentaires, déjà communs en informatique portée, pour supporter d'autres modes opératoires (5) (ex. : détecteurs d'inflexion, dispositifs de retour d'efforts, etc.).

2.2 Informatique portée

Comme nous le verrons, l'informatique portée [49] semble proposer les outils nécessaires à une implémentation efficace des interfaces virtuelles, afin d'améliorer de façon transparente l'utilisabilité des appareils actuels et futurs. Cette section propose ainsi une revue de littérature sur la nature des ordinateurs portés (rôle, caractéristiques,

périphériques d'entrée et de sortie) et sur différentes techniques, matériel et applications associés à la réalité augmentée, qui nous permettront d'intégrer des interfaces intimement personnelles dans l'environnement d'un utilisateur. Comme précédemment, nous présenterons aussi la façon dont ces recherches s'articulent autour de la proposition et l'implémentation des interfaces virtuelles.

2.2.1 Ordinateur porté

Le rôle principal d'un ordinateur porté [49] est d'assister l'utilisateur à accomplir différentes tâches dans un environnement où les interactions humain-ordinateur porté restent secondaires. Quatre caractéristiques distinguent un ordinateur porté des supports informatiques traditionnels [49, 50] :

- un ordinateur porté est fonctionnel et utile tout en étant porté par l'utilisateur, généralement en étant intégré à ses vêtements ou à ses accessoires;
- un ordinateur porté est constant, c'est-à-dire toujours disponible, toujours allumé et toujours prêt à interagir avec l'utilisateur;
- un ordinateur porté est (pro)actif; il est ainsi sensible au contexte et attentif à l'utilisateur et à l'environnement dans lequel les interactions humain-ordinateur porté se déroulent;
- un ordinateur porté introduit un certain degré de transparence dans ses interactions avec l'utilisateur, interactions qui, idéalement, devraient s'intégrer sans discontinuité dans le flot des activités de l'utilisateur dans le monde réel.

Critique

De par ses caractéristiques fondamentales, l'ordinateur porté semble répondre aux différents problèmes identifiés dans les PUC actuels telles l'opacité, l'insensibilité au contexte et la scission de la focalisation. En fait, à ce niveau, les ordinateurs portés semblent pouvoir regrouper les deux espaces de travail distincts que nous avions identifiés plus tôt, engendrés par l'introduction des contrôleurs universels, espaces de travail qui entrent en compétition pour les ressources cognitives et perceptuelles de l'utilisateur selon le modèle des ressources multiples de Wickens [51, 52], résultant en une interférence entre les deux tâches, qui n'en étaient qu'une initialement, diminuant irrémédiablement la performance de la tâche globale (ex. : effectuer un dépôt à un guichet automatique, se transformerait, suite à l'introduction d'un PUC, en une manipulation des entités matérielles initiales, comme la carte de guichet et l'argent à déposer, et en une manipulation du contrôleur, pour dialoguer avec le guichet). De par leur rôle de médiateurs entre l'humain et la réalité, comme l'affirme Starner [50], ces ordinateurs portés pourraient constituer l'outil idéal pour supporter et moduler discrètement le dialogue entre un utilisateur et une machine, en tous lieux et en tout temps, sans que l'utilisateur en fasse explicitement la demande, bref, pour introduire le concept d'interfaces virtuelles tel que nous le proposons.

2.2.2 Périphériques d'entrée et de sortie

Les périphériques d'entrée, de pointage et de sortie standards sont mal adaptés aux ordinateurs portés et au concept de virtualisation d'interfaces, de par leur taille et

l'attention qu'ils requièrent [49]. En effet, un des problèmes des PUC résidait dans l'opacité du matériel et de l'interface utilisés. Il est donc important, lorsque nous nous tournons vers l'informatique portée pour supporter la virtualisation d'interfaces, de prendre en considération les nouveaux périphériques qui ont été mis de l'avant au cours des dernières années, périphériques adaptés aux ordinateurs portés et capables d'assurer un support transparent sans introduire de discontinuité dans le flot des activités de l'utilisateur dans le monde réel.

Périphériques d'entrée

Il est intéressant, au niveau des périphériques d'entrée, de mentionner des dispositifs tel le *lightglove* [53], qui interprète les mouvements des doigts [54] et les gestes de l'utilisateur [50], et qui permettrait de détecter les entrées tactiles sur une interface présentée en réalité augmentée. D'autres périphériques, tels des caméras [50] et des accéléromètres [55], maintenant courants dans le domaine de l'informatique portée, permettraient d'analyser les mouvements de l'utilisateur et de conserver les modes opératoires lors de la transition d'une interface matérielle vers une interface virtuelle (analyser la profondeur du doigt pour identifier si un bouton virtuel d'un guichet automatique a été enfoncé [56], détecter la flexion de la cheville pour actionner une pédale virtuelle, etc.). Finalement, tout comme dans des recherches sur d'autres domaines d'application de l'informatique portée, des GPS [57] ou même des capteurs biologiques [58] pourraient être utilisés pour obtenir des données relatives au contexte, afin d'inculquer ici une forme d'adaptabilité à nos interfaces. En conclusion,

mentionnons que, bien que la tendance soit actuellement à la miniaturisation de ces périphériques, il sera judicieux de ne pas encombrer inutilement l'utilisateur, afin de conserver, autant que faire se peut, la relative transparence matérielle que nous offre l'informatique portée.

Périphériques de sortie

Au niveau de la virtualisation d'interfaces, les périphériques de sortie utilisés devront être en mesure 1) de présenter l'interface virtuelle à l'utilisateur et 2) de lui fournir une rétroaction sur ses entrées. Nous nous tournerons ainsi dans le cadre de cette thèse vers des dispositifs d'affichage visuels [50], périphériques de sortie les plus utilisés dans le domaine de l'informatique portée, composés en général d'un ou de deux écrans miniatures placés à quelques centimètres de l'œil ou des yeux. Deux types de dispositifs visuels existent: des dispositifs opaques (correspondant à des dispositifs égocentriques de classe 3 dans la classification de Milgram sur la taxonomie de la réalité mixte [59]) et des dispositifs semi-transparents (correspondant à des dispositifs de classe 4 de cette même taxonomie) qui présentent l'avantage de ne pas avoir à retransmettre le champ de vision à l'utilisateur pour y insérer des informations virtuelles. Plusieurs limitations en termes d'étendue du champ de vision, de lisibilité, de luminosité ou de contraste existent encore pour ces dispositifs d'affichage et un choix judicieux doit être fait pour la virtualisation des interfaces, choix qui devra permettre d'intégrer l'interface virtuelle dans le monde réel de façon précise, lisible et transparente. Notons finalement que, même si les dispositifs d'affichage monoculaires sont les moins restrictifs en ce qui a

trait à l'obstruction du champ de vision de l'utilisateur, ils peuvent engendrer de sérieux problèmes [60] : rivalité oculaire, interférence visuelle produite par des motifs semblables en avant-plan et en arrière-plan, interférences causées par des images réelles et virtuelles à des distances focales différentes, etc. Bien que la plupart de ces limitations pourraient être résolues par une nouvelle technique d'affichage actuellement en développement et peignant une image directement sur la rétine de l'œil à l'aide d'un laser faible puissance [61], nous préférerons ne pas avoir recours à des dispositifs monoculaires dans notre étude, et privilégierons utiliser des dispositifs binoculaires, plus encombrants mais moins problématiques, notamment en ce qui a trait à la génération d'une vue altérée unique de l'environnement, et ultimement stéréoscopique.

Mentionnons finalement que d'autres périphériques de sortie, encore en développement, tels ceux faisant appel au toucher pour transmettre différentes informations à l'utilisateur par vibrations [62, 63], pourraient ultimement apporter une dimension matérielle aux interfaces virtuelles, tout comme des dispositifs haptiques plus encombrants pourraient le faire. Cependant, nous ne prendrons pas en compte de tels périphériques dans notre étude exploratoire et en laisserons le soin à des recherches futures (cf. section 7.3.1).

2.2.3 Réalités augmentée et interposée

En proposant aux utilisateurs d'adopter un ordinateur porté comme agent face aux appareils environnants, nous devrons non seulement correctement choisir ses périphériques d'entrée et de sortie, pour que le matériel et les interfaces virtuelles supportées puissent s'intégrer de façon transparente aux interactions humain-machine,

mais il nous faudra aussi judicieusement sélectionner les techniques de présentation de l'information et d'interactions. Comme plusieurs recherches prometteuses dans le domaine de l'informatique portée, nous nous tournerons nous-aussi vers la réalité augmentée [64] pour permettre aux ordinateurs portés, et à la tâche de modulation du dialogue que nous leur attribuerons, de continuer à prétendre à un certain degré de transparence.

Présentation d'information en réalité augmentée

De nombreuses recherches en réalité augmentée touchent à la présentation d'information. D'un point de vue théorique, les travaux de Billinghurst [65], qui étudient spécifiquement les ordinateurs portés pour comparer les performances utilisateurs dans des tâches de recherche, ont démontré que la présentation d'informations visuelles cohérentes avec l'orientation et la position de l'utilisateur dans le monde réel était préférable à un affichage statique. Ces travaux exposent ainsi l'importance, en réalité augmentée mobile, de mettre en place une forte cohérence temporelle et spatiale entre l'information virtuelle et le monde réel. Ces conseils sont d'ailleurs déjà mis à profit depuis plusieurs années dans différents projets de recherche, tel le *Mobile Augmented Reality System* [66], permettant à l'utilisateur de percevoir des informations virtuelles semblant faire partie de l'environnement et qui est à la base d'un guide touristique augmenté, d'un système de documentaires situés, d'une plate-forme de jeu (*ARQuake* [63]) et d'un système destiné au domaine militaire (*Battlefield Augmented Reality System*). Similairement à ces recherches, le simple ajout d'informations virtuelles

statiques dans notre étude, plus bas niveau de la réalité augmentée dans la taxonomie de Milgram [59], ne serait pas suffisant pour assurer la transparence de nos interfaces virtuelles et se résumerait, en fait, à l'implémentation d'un contrôleur universel sous une autre plateforme matérielle, qui risquerait encore d'introduire cette scission dans l'espace de travail et de mener à de faibles gains de performance. Il sera donc important pour nous, tout comme dans les travaux cités, de pousser vers de plus hauts niveaux de réalité augmentée, niveaux incorporant une intégration tridimensionnelle et temporelle de l'information à l'environnement réel, plus difficile à réaliser, mais qui nous permettra de supprimer efficacement une interface matérielle de l'environnement, pour la remplacer, en lieu et place, par une interface virtuelle adaptée à l'utilisateur. Les travaux de Mann dans le domaine de la réalité interposée (*mediated reality*, terme englobant la réalité augmentée et introduit en 1994 [11]) ne sont d'ailleurs pas étrangers à notre volonté d'altérer l'environnement. En 2002, ils ont notamment mené au remplacement d'entières portions du monde réel (des affiches publicitaires dans ce cas) par de l'information virtuelle utile [58]. Ces recherches sont ainsi très intéressantes car :

- premièrement, elles nous permettent de préciser le vocabulaire employé : il sera donc plus juste de parler de réalité interposée que de réalité augmentée lors de la présentation du concept de virtualisation d'interfaces. En effet, globalement, nous ne tenterons pas d'ajouter de l'information au monde réel mais bien de remplacer de l'information déjà présente (les interfaces matérielles actuelles) par de l'information mieux adaptée (des interfaces virtuelles de qualité, adaptées aux besoins de chacun);

- deuxièmement, elles nous indiquent que l'ambition de remplacer certaines interfaces matérielles par de nouvelles interfaces virtuelles est fondée, tout du moins au niveau de la présentation d'information.

Interactions en réalité augmentée

Contrairement au domaine de la présentation d'information en réalité augmentée où la littérature abonde, les travaux touchant aux interactions avec de telles informations sont moins nombreux et ceux s'intéressant à la répercussion de ces interactions sur le monde réel, comme il en sera le cas dans notre thèse, sont encore plus rares. Mentionnons toutefois les travaux de Grasset et al. [67] sur la réalité interposée interactive. Bien qu'ils ne s'inscrivent pas dans le domaine de la réalité interposée mobile, ces recherches, proposant un établi d'artiste augmenté, ont illustré la possibilité d'altérer les propriétés (couleurs et textures) d'un objet réel par de l'information virtuelle, mais ont aussi fourni à l'utilisateur des méthodes pour contrôler et interagir avec cette information et ce, non pas par l'intermédiaire de périphériques externes (pointeur, etc.) mais bien par l'emploi d'outils conventionnellement utilisés dans la tâche (dans ce cas un crayon). Ces travaux ne s'éloignent toutefois pas autant des modes opératoires standards des ordinateurs qu'ils pourraient le faire et imposent encore aujourd'hui à l'artiste de copier/coller des pixels, de sélectionner d'autres instruments par l'intermédiaire d'une palette, etc. Malgré cela, ils rejoignent en quelque sorte une partie des nôtres [68] qui étudient le recours à des techniques d'interactions implicites pour diriger un ordinateur porté de façon transparente et qui ont d'ailleurs démontré que l'utilisation de telles méthodes était

préférable, en termes de performance et de satisfaction des utilisateurs, à des techniques explicites [69]. Bien qu'ils ne soient pas nombreux, ces travaux ont tout de même démontré la possibilité de ne plus se limiter à un comportement passif face à de l'information virtuelle précalculée et le potentiel de manipuler cette dernière et ce, de façon implicite, tel que nous le souhaiterions dans notre étude où l'utilisateur sera mené, de la manière la plus naturelle possible, à dicter ses demandes à une machine, à interagir avec une interface virtuelle qui réagira à ses commandes.

Soulignons toutefois en conclusion que, malgré le succès relatif de tous les travaux cités, plusieurs problèmes majeurs restent encore non résolus. Notons entre autres que la grande majorité des recherches sur la réalité interposée ne sont pas mobiles (notamment celles de Grasset et al.) et se basent encore sur des techniques de repérage électromagnétique et des marqueurs fiduciaires (majoritairement basés sur ceux de ARToolkit [70]), dispositifs que nous nous refuserons d'utiliser dans nos recherches, afin de ne pas entraver la mobilité et la généralisation du concept que nous proposons. D'autres problèmes reliés à la nature mixte de la réalité interposée, et que nous risquons de rencontrer dans notre étude, persistent aussi et ce, malgré les astuces citées plus tôt : le délai entre les actions de l'utilisateur et les réponses du système, le placement adéquat des objets virtuels, les erreurs de localisation de l'utilisateur et de son champ de vision en sont quelques uns.

CHAPITRE 3 : PROBLÉMATIQUE LIÉE À LA VIRTUALISATION D'INTERFACES MATÉRIELLES

La conception d'une interface matérielle répondant aux besoins de tous représente un défi majeur et aboutit souvent, face à une large population hétérogène, à un compromis tentant de satisfaire l'utilisateur moyen. Les attentes individuelles sont donc rarement prises en compte lors de l'élaboration d'une interface, que ce soit les limitations physiques de certains utilisateurs, les modèles mentaux qu'ils ont élaborés pour une tâche donnée en fonction de leurs expériences passées, leur propension à user de raccourcis, leur désir de n'apprendre qu'une interface minimale, ne présentant que les commandes nécessaires pour effectuer certaines tâches, etc. À la vue de ces compromis, il est évident que les interfaces actuelles, tributaires des paradigmes d'interactions humain-machine présents, aboutissent trop souvent à un dialogue humain-machine sous-optimal. Suite à la revue de littérature que nous avons présentée dans le chapitre précédent et qui nous a permis d'exposer l'importance des recherches actuelles sur la simplification des interfaces, nous continuons dans ce chapitre en détaillant le nouveau paradigme d'interactions humain-machine que nous mettons de l'avant pour répondre

aux limitations des paradigmes actuels. Nous en profiterons aussi, en présentant ici la problématique liée à la virtualisation d'interfaces matérielles, pour cerner la portée de notre nouveau paradigme et les objectifs de recherche de cette étude exploratoire.

3.1 Vers une nouvelle génération d'interfaces humain-machine

Comme nous le mentionnions, il est difficile pour une interface de prétendre, en étant conçue pour un large groupe d'utilisateurs, à une certaine optimalité. Pour atteindre ce statut, une interface humain-machine doit restreindre son champ d'applications pour, idéalement, ne prendre en compte que les besoins d'un seul et unique individu. Il est ainsi sensé, pour qu'une interface soit considérée comme optimale pour un utilisateur donné, d'exiger que celle-ci exhibe, entre autres, les caractéristiques suivantes:

- une interface optimale doit être **adaptée** aux besoins actuels de l'utilisateur. Elle doit ainsi soit a) être conçue pour un utilisateur précis ou, alternativement, b) être adaptée, lors de son déploiement, pour répondre aux besoins de cet utilisateur;
- une interface optimale doit aussi être **adaptable**, afin de répondre aux besoins changeants de l'utilisateur, à court comme à long terme. Certes, concevoir une interface parfaitement adaptée aux besoins actuels d'un utilisateur est déjà très demandant mais, comme ces besoins risquent de changer rapidement, il serait souhaitable, ne serait-ce que d'un point de vue économique, qu'une interface optimale ne soit pas éphémère, condamnée à rester figée dans le temps, mais qu'elle puisse évoluer avec l'utilisateur;

- une interface optimale devrait, finalement et idéalement, être **adaptative**⁵ et sensible à l'environnement ou à l'utilisateur, afin de minimiser les tâches d'adaptation manuelle et les interventions de ce dernier.

Les interfaces matérielles actuelles, génériques, ne présentent que rarement ces trois caractéristiques. En fait, seules les interfaces matérielles reposant en partie sur une interface logicielle peuvent exposer ces trois caractéristiques, à certains degrés, car il leur est alors possible, par exemple, de modifier l'aspect et le contenu de leurs messages de sortie facilement, d'altérer leur logique, de réorganiser les boutons tactiles sur un écran selon l'historique d'utilisation, etc. Les autres interfaces, de par leur nature matérielle et donc statique, ne peuvent être adaptées aussi aisément aux besoins d'un utilisateur, et encore moins s'adapter d'elles-mêmes au fil du temps.

Le nouveau paradigme d'interactions humain-machine que nous proposons repose ainsi sur l'idée de mettre pleinement à profit la dimension logicielle qui permet actuellement à certaines interfaces matérielles de s'adapter à différents utilisateurs. En virtualisant une interface matérielle, cette thèse défend l'introduction d'un nouveau paradigme d'interaction où l'utilisateur contournerait les contrôles physiques propres à différents appareils, en tout ou en partie, pour dialoguer avec eux au travers d'une interface

⁵ *déf. adaptative (ou auto-adaptative) : terme décrivant une interface capable de s'adapter d'elle-même à un appareil, sans intervention extérieure.*

virtuelle spécifique, par réalité interposée. Comme nous le verrons, ce concept pourrait ultimement être bénéfique sur trois plans: a) la conception, b) la mise à jour et c) l'utilisation de tels appareils, partie sur laquelle cette thèse met l'emphase.

3.1.1 Impacts sur le plan de la conception

En virtualisant une interface matérielle et en la dissociant ainsi des fonctionnalités mécaniques d'un appareil, nous compartimenterons, sur le plan technique, le développement de la machine et de son interface. Ceci permettra d'assouplir la conception de ces dernières, en minimisant les compromis souvent faits au dépend des interfaces pour accommoder le design technique (ex. : placement de boutons selon le routage électrique, modalités d'interactions tributaires des spécifications techniques, etc.). Même si cette scission ne pourra, à première vue, s'étendre à l'ensemble de leurs composantes, notamment au niveau de la localisation d'entités d'insertion et d'extraction d'artéfacts (ex. : localisation d'un lecteur de cartes), elle mènera majoritairement à l'apparition d'un espace de travail virtuel presque infini, en usant du monde réel comme espace d'affichage et d'interactions, s'affranchissant ainsi des limites des panneaux de contrôle actuels.

3.1.2 Impacts sur le plan de la mise à jour

Ce gain de liberté sur le plan de l'élaboration des interfaces se répercute lors de leur évolution et simplifiera l'introduction de modifications éventuelles aux appareils sous-jacents. En effet, en recourant à des interfaces virtuelles purement logicielles, la mise à

jour des appareils ne sera plus tenue de prendre en compte les altérations matérielles à apporter au niveau des interfaces, pour communiquer avec celles-ci, et ces dernières, ne consistant plus qu'en une description de ressources, libres de leurs connexions matérielles, seront plus aisément modifiables. Ceci dit, comme notre étude tente d'abord d'établir la viabilité de cette nouvelle génération d'interfaces et se concentre donc principalement sur le plan de leur utilisation, nous laisserons le soin à d'autres recherches d'étudier leurs répercussions, tant au niveau de leur cycle de vie et de celui des appareils, des pratiques de conception, des coûts de développement et de mise à jour, etc.

3.1.3 Impacts sur le plan de l'utilisation

Sur le plan de l'utilisation, la virtualisation d'interfaces matérielles se répercute à trois niveaux et pourra :

- favoriser la convergence des interfaces à l'intérieur et entre chaque classe d'appareils, sans nécessairement, à ce stade, prendre en compte les besoins spécifiques de chaque utilisateur. En fournissant des outils capables de lever les barrières matérielles contraignant les interfaces actuelles, et en permettant leurs modifications, la virtualisation semble pouvoir jouer le rôle d'un facilitateur dans la poursuite d'interfaces plus cohérentes et standardisées, pour un groupe ou un utilisateur donné;
- accroître l'adaptabilité des interfaces aux besoins de chaque utilisateur (préférences, handicaps visuels, différences culturelles, etc.). En effet, la

virtualisation semble apte à répondre aux limites actuelles des interfaces physiques traditionnelles, conçues pour un utilisateur moyen, qui n'existe plus [71], et difficilement adaptables, car intimement liées au matériel. Nous pourrons ainsi assister à la création de multiples variantes d'interfaces pour une même machine, spécifiques, minimales et accommodant la diversité des utilisateurs [72];

- éventuellement étendre à des appareils traditionnels le concept d'interfaces adaptatives, déjà implémenté dans certains systèmes informatiques, qui permettrait à chaque utilisateur de faire face à des interfaces virtuelles générées dynamiquement, évoluant avec lui, selon son historique, ses habitudes ou les données environnementales. Ceci viendrait alors rejoindre les mécanismes d'adaptation et de spécialisation selon l'utilisateur mis de l'avant pour les interfaces unifiées [71].

3.2 Virtualisation d'interfaces matérielles

Pour matérialiser cette nouvelle génération d'interfaces humain-machine, que nous pouvons théoriquement considérer comme l'évolution naturelle des interfaces actuelles, adaptées, adaptables et intelligentes, un support doit être sélectionné, en prenant garde de ne pas introduire les mêmes limitations que les PUC. Comme indiqué à la section 2.2, nous nous tournerons vers l'informatique portée, choix que nous expliquerons ici en montrant pourquoi, et comment, ce support pourra assumer le rôle de traducteur que

nous souhaitons lui confier, pour faciliter l'échange de directives et de réponses entre l'utilisateur et la machine.

3.2.1 L'ordinateur porté comme agent face aux appareils environnants

Pour supporter correctement ces interfaces virtuelles, proposant de répondre aux besoins spécifiques de tous, nous devrons avoir recours à un outil capable de minimiser l'extrapolation pressentie de ces interfaces face au monde réel. Bien que cette extrapolation, due à la virtualisation des interfaces, soit nécessaire pour introduire cette malléabilité prometteuse, il faudra que l'utilisateur la perçoive le moins possible, pour faciliter son adaptation à ce nouveau paradigme et ne pas introduire de scission de son attention lors de la réalisation de tâches. Il nous faudra donc choisir, dans la mise en application de notre paradigme, un outil capable :

- d'afficher ces interfaces dans le monde réel, en les y intégrant de façon précise afin de minimiser la dissociation tridimensionnelle entre la machine et son interface virtuelle;
- de répliquer virtuellement les modes opératoires des interfaces matérielles actuelles (boutons, leviers, roulettes...), afin de minimiser les différences entre une interface matérielle et sa correspondante virtuelle, et donc l'adaptation requise de la part de l'utilisateur pour dialoguer avec un appareil donné;
- de détecter les interactions de l'utilisateur et de les interpréter par rapport à l'interface actuellement affichée;

- de relayer ces interactions à la machine et, dans le sens inverse, de mettre à jour l’interface en fonction des réponses de l’appareil;
- d’être sensible à l’environnement et à l’évolution de l’utilisateur afin d’adapter automatiquement ces interfaces virtuelles.

L’informatique portée (*wearable computing*), combinée à différentes techniques de réalité augmentée, met à notre disposition un outil qui répond non seulement aux critères énoncés ci-haut mais aussi un outil constant et portable, capable de suivre l’utilisateur dans ses mouvements et l’aider ainsi pleinement en s’interposant de façon transparente dans son dialogue avec toutes les machines de son environnement. Appliqué au concept de virtualisation d’interfaces, l’ordinateur porté se transforme en un conduit façonnant les interactions entre l’utilisateur et la machine [56]. Il devient un point d’accès privé, un agent personnel face au monde de l’informatique disséminée (*pervasive computing*).

3.2.2 L’informatique portée par rapport à l’informatique disséminée

Cette idée de privilégier l’informatique portée par rapport à la modification des appareils de l’environnement pour introduire ce nouveau paradigme d’interactions présente plusieurs avantages. En effet, contrairement au support choisi, recourir principalement à l’informatique disséminée pour implémenter ce paradigme impliquerait :

- des modifications matérielles non négligeables aux machines actuelles pour qu’elles présentent une interface entièrement logicielle, apte à s’adapter à chaque utilisateur;

- une centralisation de l'information et une mise en réseau colossale de toutes les machines, pour partager les préférences des utilisateurs, entraînant une diminution de la confidentialité de ces informations;
- une identification préalable de chaque utilisateur face à chaque appareil, afin d'accéder à ses préférences.

Et ce, sans compter que, malgré leur étendue, de telles modifications aux interfaces actuelles :

- ne leur permettraient pas de mettre à profit l'environnement de chaque appareil, en limitant les nouvelles interfaces au support physique que représenterait un panneau de contrôle entièrement numérique, ce qui pourrait entraîner un bouleversement complet de certaines interfaces réparties tout autour de l'utilisateur (ex. : nacelles, cockpits, etc.);
- dénatureraient les interfaces actuelles de la majorité de leurs modes opératoires, en ne supportant que quelques types de boutons sur un écran tactile, ce qui reviendrait quelque peu à introduire un PUC, et la plupart de ses limites, dans les interactions humain-machine, mais cette fois, localisé sur l'appareil;
- ne leur permettraient pas de suivre chaque utilisateur dans ses activités quotidiennes et seraient donc moins enclin à tirer profit de son évolution.

Le recours à l'informatique portée, quant à lui, bien que présentement plus intrusif du point de vue de l'utilisateur, minimisera les modifications à apporter au matériel

actuellement déployé. Pour dialoguer avec l'ordinateur porté, agent de l'utilisateur dans le monde, les machines ne requerront que l'incorporation d'adaptateurs (cf. section 2.1.2) et pourraient même conserver leurs interfaces matérielles actuelles pour dialoguer de façon conventionnelle avec les utilisateurs ne disposant pas d'un ordinateur porté. Il est important de noter que l'informatique portée joue ici bien plus qu'un rôle d'« identification » de l'utilisateur et de ses préférences face à la machine : elle détecte les actions de l'utilisateur, le représente face aux appareils et prend en compte ses préférences pour générer elle-même une interface spécifique en réalité augmentée, selon les fonctionnalités de chaque appareil, et où l'espace de travail n'est pas limité par la machine, voire même par le monde réel. Bien entendu, comme nous le verrons à la section 4.1, les ordinateurs portés sont encore encombrants mais, à en croire les tendances de convergence et de miniaturisation auxquelles nous assistons depuis plusieurs années, ainsi que les recherches actuelles (cf. section 2.2), ils seront de plus en plus appelés à s'immiscer de façon transparente dans les activités humaines quotidiennes pour, entre autres, nous représenter efficacement face aux machines environnantes.

3.2.3 Schématisation des interactions humain-machine envisagées

Selon ce nouveau paradigme, un ordinateur porté, agent de l'utilisateur face aux machines environnantes, sera en charge de les identifier, d'interpréter leurs fonctionnalités, d'afficher leur interface et de relayer à chaque appareil les directives que l'utilisateur dictera au travers de cette dernière, dissociée physiquement de la machine.

Comme illustré à la Figure 3.1, ce paradigme prône le contournement des interfaces

actuelles et, ultimement, leur disparition au profit de cet agent, s'interposant dans le dialogue humain-machine tel que nous le connaissons actuellement, pour moduler les contrôles et les réponses de chaque appareil selon les préférences de l'utilisateur. Nous présentons aussi au Tableau 3.1 les étapes successives de ce nouveau dialogue, schématisé à la Figure 3.1, afin d'expliquer les rôles que l'appareil, l'utilisateur et son agent devront assumer.

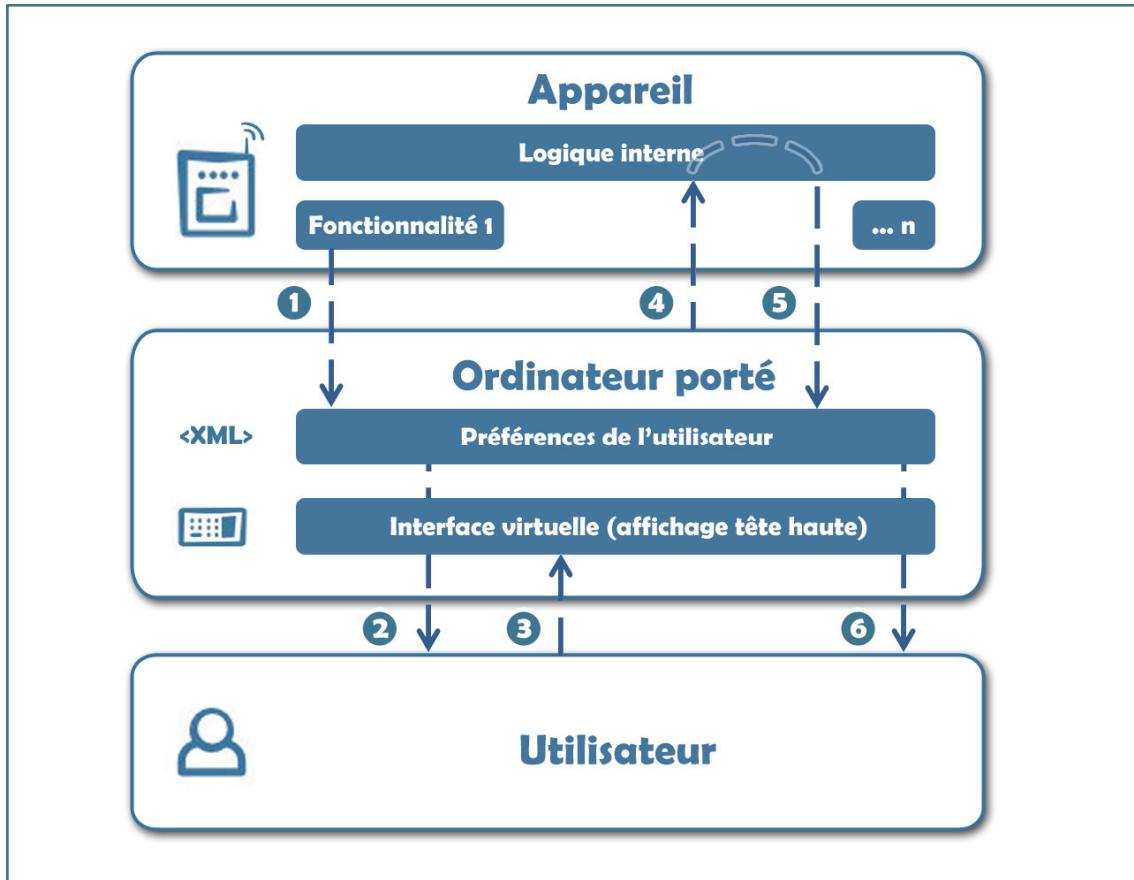


Figure 3.1 : Schématisation des interactions humain-machine suite à la virtualisation d'une interface matérielle

Tableau 3.1 : Étapes du dialogue humain-machine, selon le paradigme proposé

Étape	Nom	Description
1	Identification de l'appareil	Un appareil s'identifie à l'ordinateur porté de l'utilisateur comme une machine d'une catégorie donnée (ex. : chaînes stéréophoniques) et expose ses fonctionnalités (ex. : lecteur multiple de disques compacts, lecteur de cassette, contrôle des basses, etc.).
2	Élaboration de l'interface	L'ordinateur porté consulte les préférences de l'utilisateur face aux appareils de la catégorie identifiée et propose à ce dernier une interface qui lui est spécifique (positionnement des boutons, logique de l'interface, mise en place de raccourcis et d'automatismes, etc.), en réalité interposée, en tenant compte des limitations fonctionnelles de l'appareil actuel.
3	Commande de l'utilisateur	L'utilisateur interagit avec l'interface virtuelle proposée (ex. : rotation d'une roulette contrôlant l'amplitude sonore, pression d'un bouton pour éjecter un disque, etc.).
4	Relais de la commande	L'ordinateur porté transmet à l'appareil la commande correspondante à l'interaction de l'utilisateur.
5	Réponse à la commande	La machine répond à la commande, mécaniquement, à l'interne ou en tentant de transmettre une information à l'utilisateur.
6	Présentation de la réponse de la machine	L'ordinateur porté capte une réponse éventuelle de l'appareil et la communique à l'utilisateur, par l'intermédiaire de l'interface virtuelle, en tenant compte de ses préférences. Une boucle de rétroaction s'installe alors jusqu'à ce que l'utilisateur cesse d'interagir avec l'interface virtuelle (répétition des étapes 3 à 6).

3.2.4 Circonscription de l'étude

L'avènement de la réalité augmentée au sein des activités quotidiennes ouvrira la porte à de nombreuses applications, tout comme l'introduction de ces techniques dans les interactions humain-machine. Il est donc important de ne pas perdre de vue l'objectif de cette étude exploratoire, qui tente de lancer les fondations nécessaires, tant techniques

que théoriques, pour articuler et évaluer le concept de virtualisation d'interfaces matérielles. Ainsi, bien que les outils et les techniques auxquels nous aurons recours dans nos recherches nous permettraient d'explorer plusieurs sujets parallèles intéressants, tels le guidage appliqué à des interfaces matérielles et virtuelles, la virtualisation partielle d'interfaces et le design d'interfaces virtuelles optimales, nous nous limiterons à déterminer si ce paradigme est viable, tant techniquement que du point de vue de l'utilisateur, à identifier ses limites, et à le positionner, en termes de performances et de réception du public, par rapport aux interfaces actuelles. Ceci dit, avant de clore les sujets mentionnés précédemment, nous les expliciterons ci-dessous, en montrant comment ils reposent et s'immiscent dans nos recherches préliminaires.

Guidage appliqué à des interfaces matérielles

Le guidage, appliqué aux interfaces matérielles, partage les mêmes ambitions que notre espoir de les virtualiser, et tente lui-aussi de minimiser l'effort requis pour accomplir une tâche donnée et d'améliorer les performances de l'utilisateur, en termes d'erreurs commises, de temps pour accomplir la tâche, etc. En fait, ce rapprochement avec la virtualisation peut être poussé encore plus loin si nous remarquons qu'implémenter un tel guidage, en optant pour l'introduction d'indices visuels afin de diriger l'utilisateur, équivaut à virtualiser partiellement une interface matérielle, pour mettre en relief certaines composantes d'intérêt, que ce soit en altérant leur couleur, leur forme, leur libellé, etc. Pour ce faire, le guidage requiert, sur le plan technique, de localiser l'interface dans l'environnement mais aussi de l'identifier (pour comprendre le rôle de

chacune de ses composantes) et de communiquer avec celle-ci, de façon unidirectionnelle (que ce soit par exemple en détectant le mode actuel affiché sur un écran de contrôle ou en recevant de la part de l'appareil un énoncé radio), pour suivre l'exécution de la tâche et guider correctement l'utilisateur. Ainsi, à quelques détails près (notamment au niveau de la communication unidirectionnelle ici, comparée à l'échange bidirectionnel que nous détaillons dans notre architecture matérielle et logicielle au chapitre 4), le guidage appliqué à des interfaces matérielles repose sur les mêmes bases que nous tentons de lancer dans nos recherches et il semblerait équivalent, à première vue, de privilégier l'utilisation de l'une ou l'autre de ces deux techniques. Toutefois, bien que ce genre de guidage ait le potentiel d'améliorer les performances de l'utilisateur, comme une de nos recherches parallèles l'a démontré [46], il semble plus complexe à implémenter car il nécessite de comprendre préalablement les intentions de l'utilisateur pour le diriger dans la tâche souhaitée, problème qui est encore loin d'être résolu. De plus, en termes de retombées, il semble contre-productif de préférer guider un utilisateur sur une interface inconnue plutôt que de remplacer cette interface par une autre, répondant exactement à ses besoins et modèles mentaux. En effet, il est fort probable qu'un tel guidage sur une interface matérielle sous-optimale ne puisse concurrencer les gains que l'utilisateur pourrait obtenir, en termes de performance, en recourant à une interface virtuelle connue et adaptée. Recourir à un tel outil semble ainsi seulement rentable face à des classes d'appareils encore inconnues, pour lesquelles une interface virtuelle propre à l'utilisateur ne serait pas encore établie, et où un guidage en réalité augmentée serait opportun, en supposant que les intentions de l'utilisateur

puissent être comprises. C'est pour ces raisons que nous privilégions de nous pencher d'abord sur l'introduction du concept de virtualisation que sur le guidage des utilisateurs en réalité augmentée, guidage qui pourra subséquemment bénéficier de nos recherches.

Guidage appliqué à des interfaces virtuelles

Le guidage, tel qu'énoncé plus haut, pourrait aussi être appliqué à des interfaces purement virtuelles, afin d'aider l'utilisateur à accomplir une tâche, en comprenant d'abord ses intentions, pour améliorer ses performances et minimiser son effort. Comme une telle aide se baserait sur le concept de virtualisation que nous mettons de l'avant, il serait prématuré de s'attarder sur ce sujet avant d'avoir établi une plateforme logicielle et matérielle pour le supporter, avant d'avoir étudié la réception des utilisateurs à notre paradigme, d'en avoir validé la viabilité, d'en avoir identifié les faiblesses, etc. C'est pour cela que nous n'en discuterons pas dans notre étude, bien qu'il pourrait constituer un ajout futur de taille aux interfaces virtuelles.

Virtualisation partielle d'interfaces matérielles

La virtualisation partielle prône une altération limitée des interfaces matérielles, que ce soit pour supprimer virtuellement quelques composantes inutiles pour un utilisateur sur une interface donnée, pour repositionner quelques entités sur cette dernière ou pour insérer une interface virtuelle palliative, parallèle à l'interface matérielle, afin d'introduire, par exemple, différents raccourcis. Cette virtualisation partielle, menant à la naissance d'interfaces globalement mixtes, à la fois virtuelles et matérielles, repose toutefois sur les mêmes requis qu'une pleine virtualisation et nécessite elle-aussi la

localisation et l'identification d'une interface ainsi que, hormis dans le cas simpliste d'une suppression d'éléments, la détection des interactions de l'utilisateur et la négociation d'une communication bidirectionnelle avec l'appareil afin d'échanger les réponses et les directives des différents acteurs. C'est pour cela que, bien que les techniques proposées dans notre étude supporteraient aisément une virtualisation partielle, nous avons choisi de ne pas nous arrêter à ce concept limitatif, pour pousser plus avant vers des interfaces pleinement adaptées à chaque utilisateur, et déterminer clairement, dans ce domaine, comment le virtuel rivalise avec le réel. Notons toutefois que, contrairement à une virtualisation complète où toutes les composantes de l'interface matérielle seront supprimées et avec lesquelles l'utilisateur n'aura plus aucun échange, la virtualisation partielle demanderait une adaptation supplémentaire des appareils, afin de faire coexister des commandes indirectes (c.-à-d. issues de l'interface virtuelle partielle) et directes (c.-à-d. issues des composantes matérielles que l'utilisateur percevrait toujours et avec lesquelles il pourrait interagir normalement).

Design et optimisation d'interfaces virtuelles

Un autre sujet intéressant, engendré par l'introduction dans notre environnement de ce nouveau genre d'interfaces, touche à leur design et à leur optimisation. Bien que les interfaces virtuelles tentent de se rapprocher le plus possible des interfaces matérielles originelles, en termes par exemple de localisation dans l'espace, de retour d'informations, de modes opératoires, et ce, afin de limiter l'adaptation des utilisateurs, il n'est pas clair encore si cette tentative de rester le plus proche possible des paradigmes

actuels est optimale. Il suffit par exemple de ne penser qu'à l'absence, en virtuel, de toute consistance physique qui influencera sûrement le choix de contrôles optimaux, et ce, sans compter les difficultés logistiques pour créer une interface spécifique à chaque utilisateur. Bref, l'introduction de ce paradigme et de ses possibilités amènent de nouveaux questionnements forts intéressants mais nous tenterons d'abord de fournir les outils nécessaires pour se poser ces questions, en identifiant les façons de supporter ces modes opératoires, en établissant la viabilité du concept, etc.

3.3 Objectifs de recherche

En accord avec la problématique définie ci-haut, et suite à la circonscription de notre étude, l'objectif principal de nos recherches, ainsi que les objectifs spécifiques connexes que nous tentons d'atteindre, sont présentés ci-dessous.

3.3.1 Objectif principal

L'objectif principal de notre étude est de proposer un nouveau paradigme d'interactions humain-machine, prônant la virtualisation des interfaces matérielles, afin de les personnaliser. Plus précisément, nous décrirons théoriquement ce paradigme, le mettrons en application et l'évaluerons dans des situations réelles, pour le situer par rapport aux interfaces conventionnelles. Cette thèse contribuera ainsi à l'avancement des connaissances en proposant une alternative aux interfaces matérielles actuelles, en établissant sa faisabilité technique et en quantifiant empiriquement les gains ou pertes de

performances associés au recours à un tel paradigme, tant du point de vue du temps d'exécution de la tâche, de la charge associée que du degré de satisfaction de l'utilisateur, pour n'en nommer que quelques uns.

3.3.2 Objectifs spécifiques

Nous détaillons ci-dessous les objectifs spécifiques de notre étude, cernant chacun un but précis de l'objectif principal.

1^{er} objectif spécifique: élaboration d'une plateforme matérielle et logicielle

Cet objectif cible à la fois la proposition d'un modèle de données, la conception d'une plateforme matérielle et l'élaboration d'une architecture logicielle, aptes à supporter, de façon limitée, la mise en place du nouveau paradigme d'interactions humain-machine que nous mettons de l'avant. Il cerne ainsi les requis techniques de la thèse, qui seront mis à profit lors de l'atteinte du deuxième objectif, se concentrant sur la mise en application du concept proposé, dans des situations réelles.

Sur le plan des artefacts, l'atteinte de cet objectif nous permettra d'aboutir à :

- une spécification technique permettant de représenter les fonctionnalités de différentes classes d'appareils, ainsi que les préférences de l'utilisateur face à leur interface. Il faudra toutefois s'assurer, lors de l'élaboration de ce modèle, de dissocier complètement la description des fonctionnalités de leur représentation matérielle, afin de ne pas compromettre la malléabilité des interfaces proposées, pour être en mesure de les adapter aisément au besoin des utilisateurs. Notons

aussi que nous n'aurons pas la prétention de proposer un modèle de données complet ni optimal, car ceci, en soi, serait matière à d'autres recherches; nous tenterons ainsi seulement de proposer une spécification, parmi d'autres, qui nous permettra de décrire différentes interfaces personnelles simples, afin de tester l'application et les performances de notre paradigme, dans des situations précises;

- une plateforme matérielle, apte à suivre un utilisateur dans ses déplacements sans l'encombrer de façon notable, et composée des périphériques nécessaires pour identifier différents appareils au sein de l'environnement, pour virtualiser leur interface, pour détecter les interactions de l'utilisateur et pour le représenter face à ces machines, en échangeant différentes requêtes et réponses par l'intermédiaire d'adaptateurs, similaires à ceux présentés à la section 2.1.2;
- une architecture logicielle, composée des modules de vision nécessaires pour localiser une interface matérielle ainsi que des algorithmes utilisés pour recréer les modes opératoires désirés en réalité augmentée et pour identifier et gérer les interactions entre l'utilisateur et les interfaces, en accord avec ses préférences et les limites des appareils.

L'atteinte de cet objectif sera jugée à l'interne, au cours du développement, par de courtes mises en application qui nous permettront de tester les algorithmes et le matériel employés, afin de s'assurer de la robustesse et de l'adaptabilité de la plateforme proposée.

2^{ième} objectif spécifique: mise en application du paradigme

Ce deuxième objectif cible la mise en application du paradigme proposé dans une situation réelle, en se basant sur la plateforme obtenue lors de l'atteinte du premier objectif spécifique. Il s'agira donc ici de choisir une classe d'appareils précise, faciles à acquérir, à comprendre par les utilisateurs, à tester sans grandes modifications, et dont les modes opératoires seront supportés pour notre architecture logicielle. En sélectionnant une famille d'appareils représentative (c.-à-d. comportant de nombreuses similarités avec d'autres classes d'appareils au niveau de l'interface et des modes opératoires), l'atteinte de cet objectif nous permettra de démontrer que notre plateforme est saine mais surtout que la virtualisation d'interfaces matérielles est un concept réaliste et applicable à plusieurs appareils.

3^{ième} objectif spécifique: évaluation des avantages et limites des interfaces virtuelles

Une fois la plateforme de support définie et la virtualisation de plusieurs interfaces complétée, il s'agira ici de tester empiriquement, pour une tâche donnée, les performances, les avantages et les limites des interfaces virtuelles par rapport à leur contrepartie matérielle. Cet objectif peut être scindé chronologiquement en trois, soit en :

- la sélection d'une tâche représentative des appareils choisis et l'élaboration d'un plan de tests pour comparer la réalisation de cette tâche, par l'intermédiaire d'interfaces virtuelles et matérielles;

- la mise en fonction du plan de tests, se résumant à la réalisation de la tâche demandée par une cohorte de sujets⁶, pour recueillir différentes données (facilité d'utilisation, temps d'exécution, taux d'erreurs, charge mentale et physique perçues durant la tâche, pourcentage de faux positifs dans la détection des interfaces environnantes par les algorithmes utilisés, etc.) qui nous permettront de juger de l'utilité et de la qualité des interfaces virtuelles telles qu'implémentées;
- l'analyse des données collectées, afin de déterminer si, et sur quel plan, une interface virtuelle pourrait concurrencer une interface matérielle, mais aussi pour isoler les limites techniques de l'implémentation proposée. Cette analyse nous permettra ainsi de conclure sur la viabilité du paradigme proposé et de mettre en relief différentes pistes d'améliorations et de recherches futures.

⁶ *Même si quelques sujets suffiraient à identifier les problèmes majeurs reliés aux interfaces virtuelles [73], nous tentons aussi ici de collecter des données statistiquement significatives sur les performances des utilisateurs face à ces interfaces et à leur contrepartie matérielle; c'est pour cela qu'il sera nécessaire de recruter une trentaine de sujets.*

CHAPITRE 4 : CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT D'INTERFACES VIRTUELLES

La plateforme que nous proposons comme base à cette étude exploratoire est décrite dans ce chapitre. Nous nous attarderons d'abord sur le matériel utilisé et aborderons ensuite les techniques qui furent implémentées pour supporter le paradigme proposé. Ces dernières furent réparties sur trois couches logicielles distinctes, que nous détaillerons dans le sens du flux d'information, du traitement des signaux reçus par nos capteurs jusqu'à l'émission des instructions de l'utilisateur. Nous décrirons ainsi, dans un premier temps, les algorithmes utilisés par la couche de détection, chargée du traitement de l'information collectée par les périphériques d'entrée pour localiser les interfaces matérielles d'intérêt et isoler les mains de l'utilisateur. Nous continuerons en détaillant les mécanismes implémentés au niveau de la couche de présentation et de gestion, responsable de l'intégration des interfaces personnalisées dans les images capturées, de leur cohérence et de l'interprétation des gestes de l'utilisateur face à leurs composantes. Nous conclurons finalement en présentant l'ébauche de notre couche de communication, chargée de la transmission des instructions de l'utilisateur aux machines

contrôlées et du relais de leurs réponses à l'interne. Ce chapitre touche ainsi au premier objectif spécifique de la thèse, en exposant la conception et l'implémentation d'une plateforme générique, permettant à un utilisateur d'imposer, de façon transparente, ses interfaces personnalisées aux appareils environnants.

4.1 Architecture matérielle

L'élaboration de l'architecture matérielle de l'ordinateur porté, proposé comme support aux interfaces humain-machine anticipées, constitua la première étape de conception. Elle complit la sélection et l'acquisition des composantes matérielles, leur intégration, et de courts tests expérimentaux pour mesurer leurs performances et s'assurer de leur bon fonctionnement.

4.1.1 Résumé des composantes initiales de l'ordinateur porté

L'ordinateur porté assemblé fut basé sur l'architecture proposée par Plouznikoff [69]. Il regroupe ainsi, à l'intérieur d'une veste Campco Safari portée par l'utilisateur (cf. Figure 4.1), une source d'énergie chargée d'alimenter une plateforme IB104+, un processeur Transmeta Crusoe 1GHz, un capteur CCD issu d'une caméra Logitech Quickcam 4000, utilisé en guise de périphérique d'entrée, et un dispositif d'affichage tête haute Vuzix VR920. Le Tableau 4.1 résume les caractéristiques de ces composantes tandis que la Figure 4.2 présente leurs interconnexions. Selon les méthodes de communication exposées par un appareil donné, ou les adaptateurs anticipés, plusieurs périphériques

d'entrée/sortie additionnels pourront être ajoutés à notre plateforme pour prendre en charge le dialogue avec une machine spécifique (cf. sections 4.4 et 5.4.4).

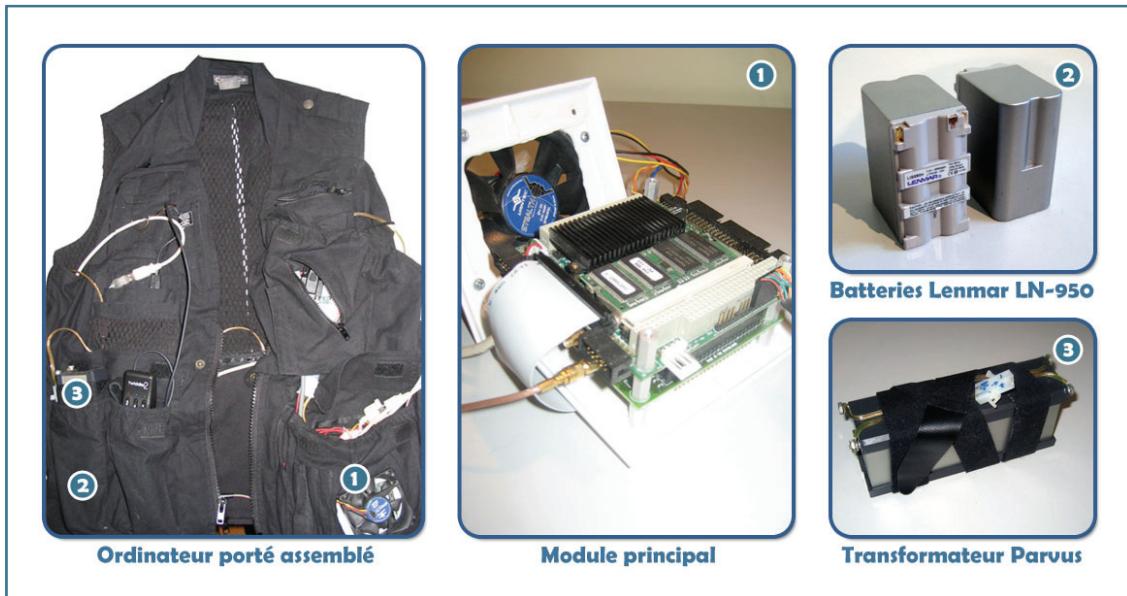


Figure 4.1 : Composantes de l'ordinateur porté intégrées dans la veste Campco

Tableau 4.1 : Caractéristiques des composantes initiales de l'ordinateur porté

Catégorie	Composantes	Caractéristiques principales
Support vestimentaire	Veste Campco Safari Travel modifiée	Matériau: 100% coton Capacité: 20 poches Poids: 1.14kg
Plateforme centrale	Module d'ordinateur embarqué IB104+	Processeur: Transmeta Crusoe 1GHz RAM: 256MB SDRAM Carte vidéo: VGA 2MB
Périphérique principal de sortie	Vuzix VR920, incluant un dispositif intégré de repérage de l'orientation à 3 degrés de liberté	Type: binoculaire opaque Résolution: 640x480 pixels, 24 bits Champ de vision: 32 degrés Connexion: VGA & USB (aliment.)

Tableau 4.1 : Caractéristiques des composantes initiales de l'ordinateur porté (suite)

Périphérique principal d'entrée	Capteur CCD couleur, extrait d'une caméra Logitech Quickcam 4000	Résolution: 640x480 pixels, 30 fps Connexion: USB
Source d'énergie	2 batteries Lenmar LN-950 montées en série	Capacité: 5.5Ah, 7.2V (40Wh)
	Transformateur continu-continu Parvus	Entrée: 14.4V (batteries en série) Sortie: 5V et 12V

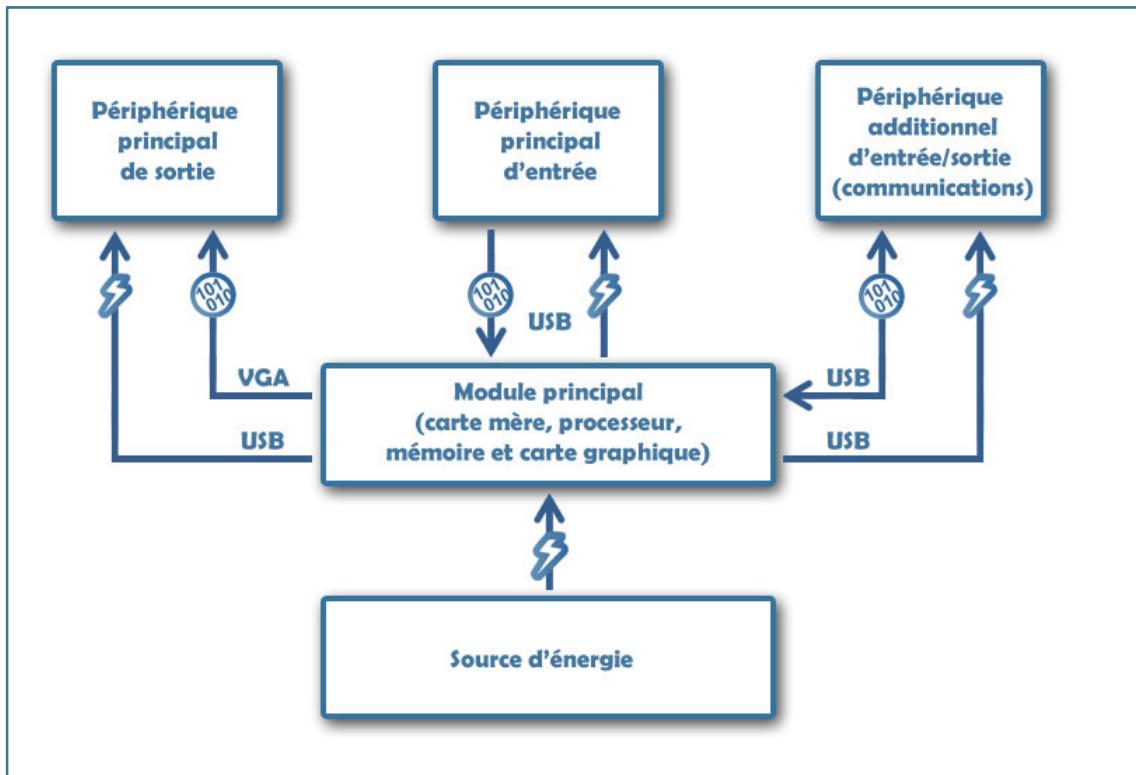


Figure 4.2 : Schématisation de l'architecture matérielle de l'ordinateur porté

4.1.2 Modifications apportées aux composantes initiales

En implémentant les algorithmes de détection utilisés (cf. section 4.2), nous nous sommes rapidement aperçus que le module principal, initialement retenu pour sa faible consommation d'énergie et son autonomie sur batteries, établie à près de 3 heures, ne pourrait traiter qu'un nombre limité d'images par seconde et risquait de compromettre la fluidité de l'affichage et les performances des utilisateurs. Suite à quelques pré-tests, ce module fut remplacé, au détriment de la mobilité de l'ordinateur porté, par une plateforme micro ATX dotée d'un processeur Intel Q6600 2.4GHz à quatre cœurs. L'accès à cette plus grande puissance de calcul, combinée à une parallélisation des algorithmes utilisés, nous permit d'atteindre un débit moyen plus intéressant de 23.7 images par seconde, mesuré tout au cours des séances de notre étude expérimentale (cf. section 5.4.5).

4.1.3 Dispositif principal d'entrée

Le capteur CCD retenu, monté en position centrale sur l'affichage tête haute utilisé (cf. Figure 4.3), fut chargé de l'acquisition continue du point de vue de l'utilisateur pour le retransmettre à l'intérieur du dispositif d'affichage, une fois analysé et, au besoin, altéré. Comme la résolution native de ce dispositif fut fixée à 640x480 pixels, et que nos algorithmes de détection ne pourraient efficacement traiter une plus grande quantité d'informations (cf. fréquence de traitement atteinte à la section 4.1.2), un capteur d'une résolution identique fut jugé suffisant. Sur le plan chromatique, il nous parut important, pour continuer à aspirer à un certain degré de transparence, de recourir à un capteur

couleur, afin de proposer à l'utilisateur une retranscription fidèle de son environnement. Ce choix facilita aussi grandement la tâche de certains de nos algorithmes de détection, notamment ceux chargés d'isoler les gestes de l'utilisateur, en leur permettant de segmenter les images capturées selon la teinte des objets présents. Mentionnons finalement qu'il ne fut pas jugé nécessaire de tendre vers de haut taux de capture, comme les interactions anticipées entre l'utilisateur et les machines contrôlées ne semblaient pas impliquer de gestes brusques ni de changements de point de vue rapides. Nous nous sommes ainsi arrêtés à une fréquence d'acquisition de 30 images par seconde.

4.1.4 Dispositif de présentation d'information

Le dispositif de présentation choisi est un dispositif binoculaire opaque (cf. Figure 4.3). Nous nous sommes arrêtés sur une telle configuration car il aurait été impossible de cacher et de remplacer une interface matérielle en utilisant un dispositif semi-transparent, qui aurait introduit une dualité matérielle/virtuelle. Un dispositif monoculaire opaque aurait quant à lui abouti à ces mêmes difficultés, en introduisant notamment différents problèmes de rivalités oculaires comme mentionné à la section 2.2.2, et aurait exigé une forte concentration de la part de l'utilisateur pour focaliser son attention sur l'affichage et ignorer les données perçues par l'autre œil. Notons aussi que le dispositif Vuzix VR920 choisi supporte un affichage stéréoscopique, qui pourrait être utilisé conjointement avec deux caméras pour permettre à l'utilisateur de juger des profondeurs. Il incorpore de plus un système de repérage à trois degrés de liberté

(tangage, roulis, lacet), dont les données pourraient, par exemple, nous aider à corriger les prédictions des algorithmes de suivi des interfaces identifiées (cf. section 4.2.2).



Figure 4.3 : Dispositif d'affichage tête haute, incorporant le capteur CCD utilisé, monté en position centrale (vue de face, à gauche et vue de derrière, à droite)

4.2 Architecture logicielle : couche de détection

La première couche de l'architecture logicielle proposée touche aux traitements des signaux reçus de la part des périphériques d'entrée. Pour l'instant, cette couche ne se base que sur les images transmises par le capteur CCD mais pourrait aussi, dans un futur proche (cf. section 7.3), utiliser les données du dispositif de repérage intégré au Vuzix VR920, pour corroborer les orientations détectées au niveau du flot optique, ou confirmer, à partir d'un dispositif laser similaire à celui de Cassinelli [74], la position tridimensionnelle des doigts de l'utilisateur.

4.2.1 Module SIFT de détection d'une interface matérielle

Ce premier module est chargé de détecter une interface matérielle particulière dans l'environnement de l'utilisateur, en se basant sur ses caractéristiques géométriques. Ces dernières sont tout d'abord pré-calculées en utilisant une image de référence de l'interface d'intérêt puis mémorisées du côté de l'appareil, qui se chargera ensuite de les transmettre au module de communication de notre plateforme, lorsque les deux se trouveront à proximité. Pour décrire géométriquement l'interface matérielle à remplacer, il nous fallut choisir, parmi toutes les techniques de reconnaissance d'objets, celle reposant sur des caractéristiques faiblement sensibles aux changements d'échelles (attribuables à un rapprochement ou un éloignement de la caméra face à l'interface matérielle à remplacer), aux rotations (attribuables aux mouvements de la tête de l'utilisateur), aux changements d'illumination (changeante en conditions non contrôlées) et aux transformations tridimensionnelles du point de vue de la caméra. C'est pour cela que nous avons privilégié l'utilisation de SIFT [75] à ce niveau. Les caractéristiques issues de SIFT, appelées points clés (*keypoints*), sont en effet invariantes aux changements d'échelles et aux rotations et partiellement invariantes aux changements d'illumination et de point de vue. Elles offrent de plus l'avantage d'être bien réparties, tant sur le plan spatial que fréquentiel [76], augmentant ainsi grandement les probabilités de reconnaissance d'une interface particulière, décrite par ces points clés, en présence d'occlusions (par les mains de l'utilisateur ou un objet de la tâche par exemple) et de bruit. Comparativement aux autres descripteurs locaux, les SIFT sont aussi les plus stables (donnant les meilleurs résultats pour retrouver, dans une image donnée, les

caractéristiques recherchées suite à des transformations affines allant jusqu'à 50 degrés), les plus distinctifs (présentant les différences les plus élevées entre leurs valeurs propres) et les plus robustes aux dégradations d'image et aux changements d'illumination (auxquels les descripteurs basés sur les contours sont plus sensibles).

Identification de points clés comme description géométrique d'une interface d'intérêt

Nous avons ainsi élaboré, en nous basant sur les travaux de Lowe [75], un logiciel externe pour extraire les points clés présents sur différentes images d'interfaces matérielles de référence. Nous présentons ci-dessous l'algorithme implémenté et les optimisations élaborées pour accroître sa rapidité. Il s'agit d'un algorithme en cascade, à quatre étapes, filtrant les candidats retenus au fur et à mesure, et appliqué sur des images monochromes.

Localisation d'extrema dans l'espace d'échelles (*scale space*) : la première étape de l'algorithme se résume à localiser tous les points invariants aux changements d'échelles dans l'image, ou, en d'autres termes, à identifier les positions de tous les minima et maxima locaux entre plusieurs changements d'échelles successifs (cf. Figure 4.4). Pour identifier ces candidats, il suffit, premièrement, d'appliquer différents changements d'échelles à l'image originelle $I(x, y)$, en la convoluant par une gaussienne d'échelle variable $G(x, y, \sigma)$ définie comme suit, pour obtenir un ensemble d'images $L(x, y, \sigma)$, à

un facteur d'échelle σ , pouvant être assimilées à des versions floues de l'image originelle, ou de plus faible résolution :

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2}$$

Dans le cadre de notre implémentation, nous nous sommes limités à des convolutions incrémentales sur 16 niveaux d'échelles, réparties sur 4 octaves. De plus, pour minimiser les calculs lors du passage à un octave supérieur, nous avons choisi de ne considérer qu'un pixel sur deux de la première image de l'octave courant, au lieu d'appliquer notre fenêtre gaussienne sur l'image précédente. Une fois ces convolutions effectuées, il ne nous reste qu'à calculer les différences entre les gaussiennes voisines obtenues $L(x, y, k\sigma)$ et $L(x, y, \sigma)$, séparées par un facteur k fixé à $2^{1/nb\ de\ niveaux\ par\ octave}$. Ces différences, nommées $D(x, y, \sigma)$, sont ensuite parcourues pour isoler les positions des extrema locaux, en comparant, à une position donnée, l'intensité courante par rapport à ses voisins immédiats, tant sur le niveau actuel qu'avec les niveaux supérieur et inférieur (26 comparaisons total).

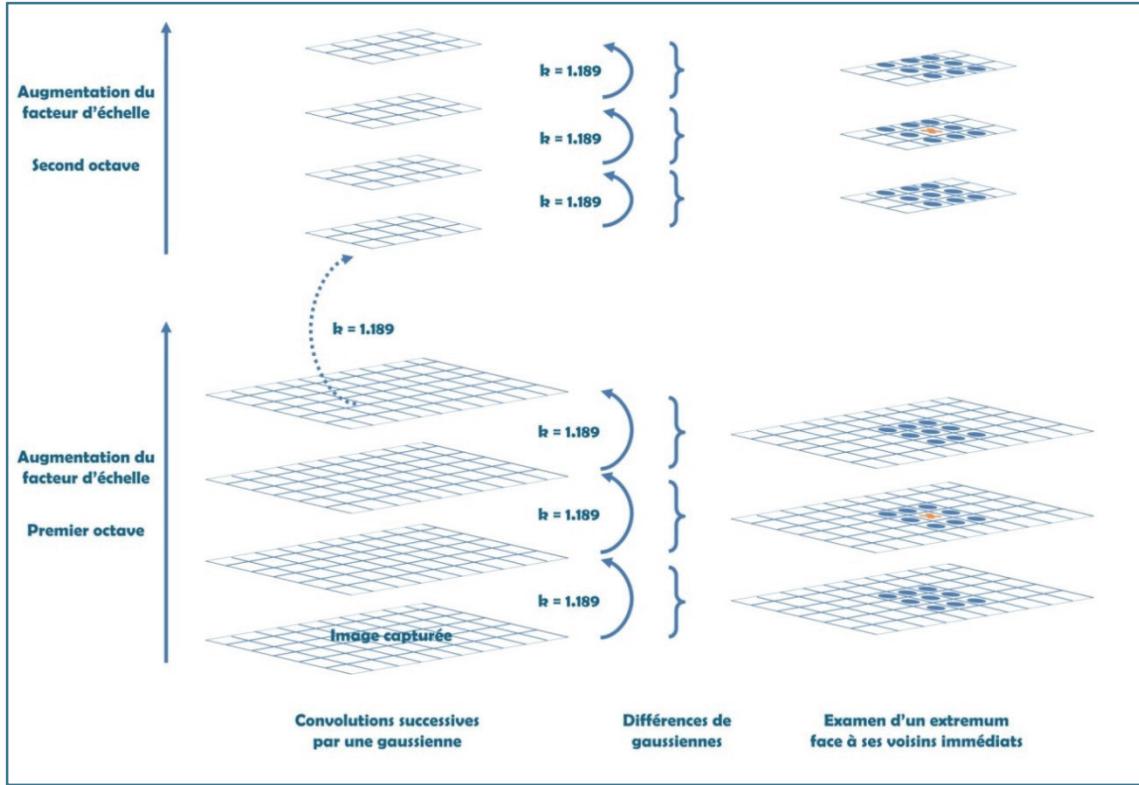


Figure 4.4 : Schématisation de la localisation d'extrema dans une image, sur 2 octaves, en utilisant 4 niveaux par octave ($k \approx 1.189$)

Élimination des extrema de faible contraste et sensibles au bruit : parmi tous les candidats identifiés, plusieurs ne présentent pas un contraste suffisant pour être considérés comme assez robustes. D'autres, fortement sensibles au bruit qui pourrait être introduit dans les images à comparer, sont tout aussi peu utiles et doivent également être rejetés. Nous avons ainsi écarté, au niveau du contraste, tout point clé localisé à une position (x, y, σ) dont la valeur $D(x, y, \sigma)$ se situait sous un seuil fixé à 0.03 (sur une échelle d'intensité monochrome allant de 0 à 1). Quant aux points sensibles au bruit, nous avons supprimé tous ceux faiblement localisés sur des contours. Pour ce faire, nous

avons isolé tous les points clés situés sur des arêtes dont la courbure principale en travers du contour était largement supérieure à celle dans le sens du contour. Pour déterminer ces courbures, nous aurions pu calculer les valeurs propres de la matrice hessienne H de second ordre, qui leurs sont proportionnelles:

$$H = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{xy} & D_{yy} \end{bmatrix}$$

Toutefois, comme cette opération peut être coûteuse en temps de calcul et que nous ne nous intéressons en fait qu'au ratio $r = \alpha/\beta$ entre ces deux valeurs propres (et non à leur valeur réelle), où α est la valeur propre la plus grande et β la plus petite, nous pouvons nous tourner vers le calcul de la trace et du déterminant de H , moins coûteux et exprimés comme suit :

$$Tr(H) = D_{xx} + D_{yy} = \alpha + \beta$$

$$Det(H) = D_{xx}D_{yy} - (D_{xy})^2 = \alpha\beta$$

Comme nous pouvons démontrer que :

$$\frac{Tr(H)^2}{Det(H)} = \frac{(\alpha + \beta)^2}{\alpha\beta} = \frac{(r\beta + \beta)^2}{r\beta^2} = \frac{(r + 1)^2}{r}$$

nous pouvons affirmer que le calcul de la trace et du déterminant de H suffisent à quantifier le ratio entre les courbures d'intérêt. En imposant un seuil supérieur sur $(r + 1)^2/r$ (fixé à 10 dans notre algorithme), qui atteint son minimum lorsque $r = 1$,

c'est-à-dire quand les valeurs propres de H et donc, quand les courbures sont égales, il nous est possible d'écartez tous les candidats sensibles au bruit et ce, en ne calculant que la trace et le déterminant de H .

Détermination de l'orientation des points clés dans l'image de référence : nous disposons maintenant de points clés robustes dans notre image de référence. Pour être mesure de les retrouver dans les images capturées et ce, même en présence de rotations, il nous faut les décrire dans un repère qui leur est invariant. Pour ce faire, nous établissons un repère local à chaque point clé, orienté dans le sens de son gradient. Nous calculons ainsi, dans l'image $L(x, y)$ à l'échelle du point clé d'intérêt, l'orientation $\theta(x, y)$ du gradient et son amplitude $m(x, y)$ à chaque pixel voisin du point clé :

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{L(x, y + 1) - L(x, y - 1)}{L(x + 1, y) - L(x - 1, y)} \right)$$

$$m(x, y) = ((L(x + 1, y) - L(x - 1, y))^2 + (L(x, y + 1) - L(x, y - 1))^2)^{1/2}$$

Ces amplitudes sont ensuite distribuées, selon les orientations calculées, dans un histogramme réparti en 36 sections et couvrant les 360 degrés autour du point clé. Lors de cette répartition, les amplitudes sont pondérées par une fenêtre circulaire gaussienne (σ fixé à 1.5 fois l'échelle du point clé), pour diminuer, dans le calcul de l'orientation principale, les effets des pixels éloignés du point clé. Le mode de l'histogramme est ensuite utilisé pour définir l'orientation du gradient recherché. De nouveaux points clés,

copies du point actuel, sont aussi créés à cette étape pour prendre en compte les orientations secondaires du gradient (pour toutes les orientations dont l'amplitude sur l'histogramme se situe au dessus de 80% de celle du mode), afin d'augmenter la stabilité des mises en correspondance futures.

Description des caractéristiques locales aux points clés : en nous basant sur l'orientation du gradient local à chaque point clé, nous sommes finalement en mesure de définir son environnement immédiat dans un repère invariant aux rotations. Pour établir cette description, nous appliquons une technique similaire à l'étape précédente afin de déterminer les orientations et les amplitudes des gradients des zones voisines à chaque point clé, hautement descriptives de son environnement. Dans le cadre de notre algorithme, nous retenons 16 zones de 4x4 pixels, alignées selon l'orientation du point clé. Nous attribuons ensuite, à chacune de ces zones, un histogramme d'orientations découpé en 8 sections, que nous remplissons de façon similaire à l'étape 3, grâce aux amplitudes et aux orientations des gradients calculés à chaque pixel, exprimées par rapport à l'orientation principale du point clé. À cette étape, nous conservons toutefois toutes les valeurs des histogrammes. Nous aboutissons ainsi à une description locale invariante aux rotations et de haute dimensionnalité, utilisant au total 16 (régions) x 8 (orientations par histogramme) = 128 paramètres par point clé, chacun représentant l'amplitude d'un gradient voisin dans une orientation précise (cf. Figure 4.5). Mentionnons finalement que, pour augmenter la robustesse aux transformations affines d'illumination, nous pouvons normaliser le vecteur descripteur, afin qu'un changement

de contraste (multipliant chaque gradient par la même constante) n'affecte pas nos paramètres. Quant aux changements de luminosité (additionnant à chaque pixel une constante), ils n'auront aucun impact sur les gradients utilisés, étant donné que ces derniers sont calculés par soustraction entre pixels.

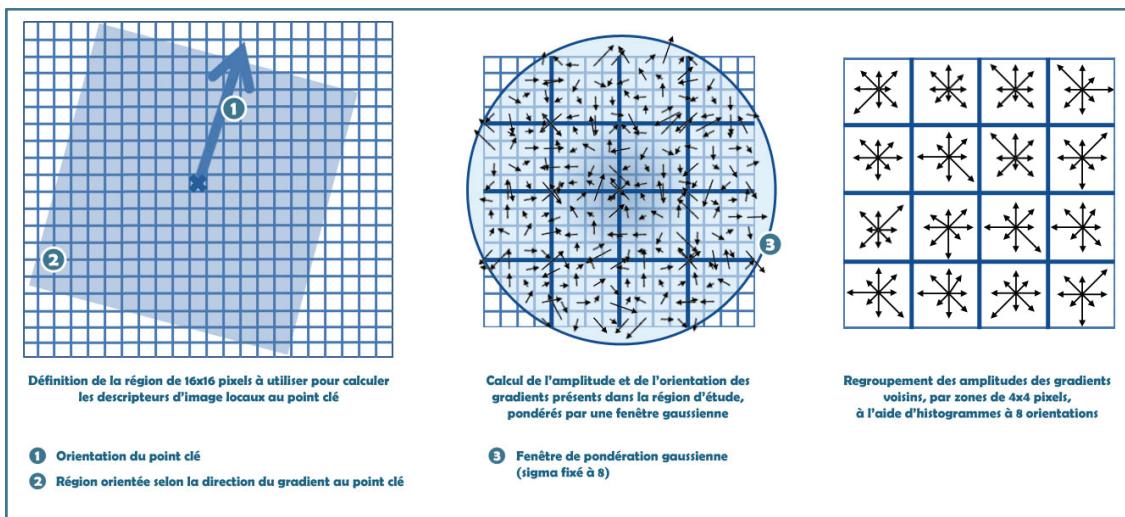


Figure 4.5 : Illustration du calcul des caractéristiques locales aux points clés

Identification et localisation d'une interface dans le champ de vision de l'utilisateur

Ce même algorithme, implémenté à l'externe pour extraire les points clés des interfaces de référence, fut retranscrit tel quel au sein du module de détection, sur notre plateforme, afin d'isoler les points clés présents dans chaque image capturée (sous-échantillonnée à 320x240 pixels, pour aspirer à une exécution temps réel), pour les mettre ultimement en correspondance avec les points clés de référence. En tentant d'identifier un nombre élevé de correspondances, corroborant la même transformation affine de l'interface matérielle, de son espace de description dans celui de la caméra, nous pourrons déterminer si cette

dernière se situe ou non dans le champ de vision de l'utilisateur et calculer la transformation qu'elle a subie.

Mise en correspondance des points clés : parmi tous les points clés obtenus dans l'image courante, nous retenons, comme correspondant à un point clé originel précis, celui minimisant la distance euclidienne entre leurs descripteurs locaux. Toutefois, pour empêcher toute association forcée, dans le cas où l'interface matérielle d'intérêt serait absente de l'image courante, ou lors de l'étude de points appartenant à l'arrière scène, un plafond doit être imposé sur la distance euclidienne entre les descripteurs des points considérés. Comme un seuil fixe ne permettrait pas de rejeter efficacement les points clés n'appartenant pas à l'interface matérielle (car certains sont plus discriminants que d'autres), nous utiliserons un ratio limite, fixé à 0.7, calculé entre la distance euclidienne actuelle et la deuxième distance euclidienne minimale (mesurée entre le point clé originel et le deuxième point clé le plus proche dans l'image courante, en termes de descripteurs). Cette technique fonctionne relativement bien car elle exige, pour établir une association, que le point clé considéré soit significativement plus proche du point clé originel que tout autre point clé de l'image courante. Quant aux associations tentant de faussement mettre en correspondance un candidat avec un point clé originel, elles ont de grandes chances d'échouer car plusieurs autres candidats seront détectés à proximité (en termes de distance euclidienne), dû à la haute dimensionnalité de l'espace des descripteurs. Mentionnons toutefois que cette haute dimensionnalité ne représente pas qu'un avantage. En effet, le temps de recherche exigé par les mises en correspondance

demandées peut croître rapidement et ce, sans pouvoir être optimisé, dans un espace à 128 dimensions, en recourant à des techniques de recherche plus sophistiquées qu'une recherche exhaustive; même les algorithmes de recherche de Friedman dans des arbres k-d ne procurent aucun gain de performance au-delà de 10 dimensions.

Calcul de la matrice de transformation : une fois ces correspondances établies, il est aisément de calculer la matrice MTC de transformation affine par la méthode des moindres carrés, entre les points clés du monde et ceux du modèle, selon :

$$MTC = [MK^T MK]^{-1} MK^T CK$$

où MTC (*model to camera*) est la matrice recherchée, de l'espace du modèle à la caméra, où CK (*camera keypoints*) contient les points clés utilisés dans l'image courante et où MK (*model keypoints*) représente les points clés originels pour lesquels une association a été établie :

$$MTC = [m_1 \ m_2 \ m_3 \ m_4 \ t_x \ t_y]^T$$

$$CK = [u_1 \ v_1 \ u_2 \ v_2 \ ...]^T$$

$$MK = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & x_1 & y_1 & 0 & 1 \\ x_2 & y_2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & x_2 & y_2 & 0 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

L'obtention de cette matrice n'est toutefois pas sans erreurs car la mise en correspondance effectuée plus tôt est imparfaite. En effet, malgré les techniques de plus

proches voisins utilisées, il est hautement probable qu'un nombre restreint de points clés de référence aient été associés de façon erronée à des points clés n'appartenant pas à l'interface d'intérêt dans l'image courante. Pour raffiner cette matrice, nous effectuons le chemin inverse en transformant les positions des points clés de référence, de leur espace dans celui de la caméra. Ceci nous permet de calculer l'erreur introduite par un point clé dans l'image, par rapport à sa position prédictive par la matrice de transformation affine. Tous les points introduisant une erreur supérieure à 3 fois l'écart type des erreurs sont ainsi supprimés, en autant que celle-ci soit d'au moins 6 pixels. La matrice de transformation est alors recalculée de façon itérative avec les points restants et ce, jusqu'à ce qu'il ne nous reste que 2 points ou qu'un consensus soit atteint. Dans le premier cas, nous concluons que l'interface d'intérêt est absente de l'image. Dans le cas contraire, quelques vérifications sont effectuées (ex. : impossibilité pour l'interface de subir une rotation dans le plan de plus de 50 degrés, respect des ratios des dimensions de l'interface détectée par rapport à celles de l'interface de référence, respect d'une aire minimale par rapport à l'aire de référence) avant d'accepter la présence de l'interface recherchée. En guise d'illustration, la Figure 4.6 présente la détection de points clés de référence sur l'interface matérielle d'une chaîne stéréophonique Panasonic SA-AK520, et les mises en correspondance effectuées pour la relocaliser dans différentes images de tests.

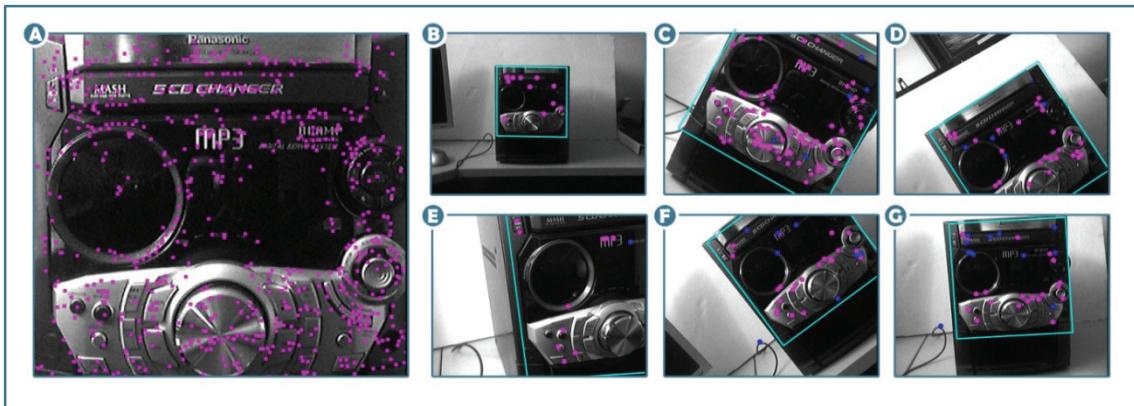


Figure 4.6 : Détection des points clés de référence sur l'interface d'une chaîne Panasonic SA-AK520 (A) et localisation de cette interface dans différentes images de tests, par mise en correspondance des points clés affichés en rose (B à G).

Recours sporadique au module SIFT de détection : ces algorithmes de recherche de points clés, de mises en correspondance et de calculs itératifs de matrices sont toutefois coûteux et ce, malgré les optimisations effectuées et la parallélisation, grâce à la librairie OpenMP, de la charge de calcul entre les quatre cœurs du processeur lorsque possible (ex. : convolutions par gaussiennes, recherche des extrema, calcul des descripteurs et obtention du voisin le plus proche de chaque point clé). C'est pour cela que nous introduisons un autre module chargé de suivre l'interface détectée, en se basant seulement sur des techniques de flot optique. Le module SIFT de détection ne sera donc appelé que de manière sporadique (toutes les secondes), pour localiser une nouvelle interface et pour corriger les calculs du flot optique quant à la position et l'orientation de l'interface suivie.

4.2.2 Module de suivi d'une interface matérielle par flot optique

Le module de flot optique est chargé de prendre la relève du module SIFT de détection, en quantifiant les transformations appliquées dans l'image courante, par rapport à l'image initiale dans laquelle l'interface matérielle d'intérêt fut localisée. Comme la scène est rigide et que les transformations détectées ne sont attribuables qu'à un changement de point de vue de la caméra, ce module permet de mettre progressivement à jour la matrice de transformation décrite plus haut et donc, de déterminer en tout temps la position et l'orientation de l'interface matérielle d'intérêt. Nous décrivons rapidement l'implémentation de cet algorithme ci-dessous, qui est un classique en vision.

Sélection des points d'intérêts

Le module se base sur des marqueurs Shi-Tomasi [77], pris sur des *coins* de l'image, pour lesquels les valeurs propres de leur matrice $M(x, y)$ d'autocorrelation des secondes dérivées locales (dans une fenêtre de dimension $2K$) sont relativement élevées (seuil de qualité sur la valeur propre la plus faible fixé à 0.1 dans notre algorithme) :

$$M(x, y) = \begin{bmatrix} \sum_{-K \leq i, j \leq K} I_x^2(x + i, y + j) & \sum_{-K \leq i, j \leq K} I_x(x + i, y + j)I_y(x + i, y + j) \\ \sum_{-K \leq i, j \leq K} I_x(x + i, y + j)I_y(x + i, y + j) & \sum_{-K \leq i, j \leq K} I_y^2(x + i, y + j) \end{bmatrix}$$

Ces marqueurs, constituant essentiellement des points où des arêtes (ou des textures) se rejoignent, sont sélectionnés dans l'image où une interface matérielle d'intérêt a été détectée par le module SIFT. Pour augmenter le nombre de marqueurs de base identifiés

et la robustesse de l'algorithme de suivi, la zone de sélection des marqueurs n'est pas restreinte à l'interface elle-même (qui peut être de petite taille ou partiellement visible par exemple) mais inclut aussi l'arrière-scène, dans le cas d'interfaces matérielles immobiles. Mentionnons que cette étape est facilement parallélisable, étant donné que chaque point peut être traité indépendamment des autres.

Suivi des marqueurs dans les images subséquentes

Une fois les marqueurs de base identifiés dans l'image initiale, le module de suivi tente de les retrouver dans les images subséquentes. Pour ce faire, nous identifions les marqueurs Shi-Tomasi présents dans l'image courante et tentons de les mettre en correspondance avec les marqueurs de base, selon l'algorithme de Lucas-Kanade [78]. L'utilisation d'un tel algorithme semble suffisant pour suivre une interface et présente plusieurs avantages en termes de performance car :

- il suppose de faible mouvements d'image en image (ce qui, dans notre application, est défendable car les mouvements de la tête de l'utilisateur, lors d'interactions avec un appareil, sont relativement limités) et nous permet de restreindre la mise en correspondance à de petites zones de recherche, ce que notre module SIFT ne supporte pas;
- la mise en correspondance peut être parallélisée, comme pour les SIFT, où chaque point peut être traité indépendamment;
- la mise en correspondance se base sur une faible dimensionnalité (comparé à 128 paramètres pour les points clés).

Une fois la mise en correspondance effectuée, nous calculons, de la même manière que pour le module SIFT, la transformation affine subie par les marqueurs, de l'image de base vers l'image courante. Ceci nous permet de quantifier le changement de point de vue de la caméra et de mettre à jour la position de l'interface matérielle et sa matrice de transformation (cf. Figure 4.7). Si le nombre d'associations entre marqueurs est insuffisant pour obtenir une prédiction viable, nous basculons immédiatement vers le module SIFT, afin de relocaliser l'interface, si elle est toujours présente dans le champ de vision de l'utilisateur. Rappelons aussi que le module SIFT est appelé de façon sporadique pour corriger les calculs du flot optique. Finalement, mentionnons que, contrairement à l'algorithme SIFT qui fut programmé en C/C++ à partir des librairies de base, celui-ci fut implémenté en tablant sur la librairie OpenCV de IntelTM.



Figure 4.7 : Suivi par flot optique de l'interface d'une chaîne stéréophonique Panasonic SA-AK520, durant un intervalle de 3.2 secondes

4.2.3 Module de détection des mains de l'utilisateur

Les deux modules précédents de la couche de détection sont responsables de localiser l'interface matérielle à remplacer, pour déterminer comment aligner et intégrer une interface personnalisée dans l'environnement. Le module actuel, quant à lui, se charge d'isoler, par segmentation, les mains de l'utilisateur dans l'image courante (cf. Figure 4.8), pour communiquer leur position à la couche de gestion des interactions entre l'utilisateur et les interfaces affichées. Comme il ne se base pas sur un historique de

recherche et qu'il serait contre-performant de parcourir l'image alors qu'aucune interface ne peut être commandée, ce module sera seulement activé lorsqu'une interface personnalisée sera intégrée à l'environnement.

Segmentation selon la couleur de la peau

La première étape de l'algorithme utilisé consiste à rejeter, dans l'image RGB actuelle, tous les pixels situés à l'extérieur de la zone de présentation de l'interface virtuelle. Nous appliquons ensuite, dans la région restante, une segmentation selon la couleur de la peau, dans l'espace HSV. Comme une très grande majorité des interfaces matérielles, par-dessus lesquelles les mains de l'utilisateur se situeront, ne sont pas de teinte similaire à la peau, ni ne présente une saturation identique, ce filtre nous laisse avec un nombre relativement restreint de faux positifs. Les pixels restants sont ensuite regroupés en blobs, afin d'isoler les objets présents. Parmi ceux-ci, celui de plus grande aire (en termes de pixels) est identifié comme représentant la main de l'utilisateur et mémorisé à l'interne, pour être plus tard récupéré par le module de présentation et de gestion, qui l'utilisera pour déterminer l'identité des composantes activées et qui l'appliquera comme masque à l'interface à superposer au monde, pour qu'elle ne cache pas la main de l'utilisateur en arrière scène.

Avantages de l'algorithme utilisé

L'algorithme utilisé, bien que simple, présente l'avantage :

- d'être parfaitement parallélisable, que ce soit lors de l'étape de rejet des pixels ou de regroupement en blobs;

- de ne requérir aucune initialisation explicite contrairement, par exemple, à l’implémentation de Kolsch et al. [66, 79], exigeant une pré-détection de la main dans une zone précise et selon une posture déterminée, ce qui nuirait à la transparence de la plateforme;
- de se baser sur un minimum d’hypothèses, contrairement aux algorithmes de suivi qui supposent par exemple des mouvements lents de la main, pour dicter les tailles des fenêtres de recherche, ou qui supportent mal des rotations paume-face.

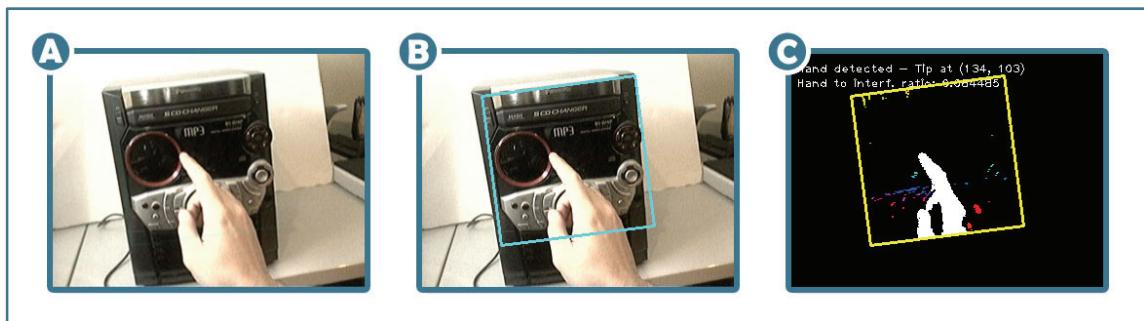


Figure 4.8 : Segmentation de la main de l’utilisateur dans la zone à l’intérieur de laquelle l’interface d’une chaîne stéréophonique Panasonic SA-AK520 fut localisée

4.3 Architecture logicielle : couche de présentation et gestion

La couche de présentation et de gestion est chargée, dans notre architecture, de régir les interactions entre l’utilisateur et ses interfaces personnalisées, présentées en réalité augmentée. Elle est composée de plusieurs éléments soit :

- un module de présentation des interfaces personnalisées, chargé, selon les capacités et la famille de l’appareil identifié par la couche de communication (cf.

section 4.4), de choisir et d'adapter l'interface virtuelle à utiliser, ainsi que de la fusionner à l'environnement, en fonction des données obtenues de la couche de détection (présence, localisation et orientation de l'interface matérielle recherchée);

- une machine à états, gérant les interactions humain-interface virtuelle, en fonction des préférences établies quant aux comportements des interfaces personnalisées;
- un module d'interprétation des gestes de l'utilisateur, chargé d'identifier les composantes de l'interface virtuelle à activer.

Sur le plan de l'implémentation, notons que toute cette couche se base sur la librairie OpenGL de SGITM, tant pour le rendu graphique que pour raccourcir des calculs géométriques d'intersections, comme nous le montrerons. De plus, mentionnons que les modules de cette couche ont été séparés de la couche de détection et regroupés dans leur propre processus léger (*thread*). Ceci nous permit de partager le temps processeur entre ces deux couches et d'éviter tout blocage au niveau de la couche de présentation, lors de calculs intensifs lancés par le module de détection. Mentionnons finalement que, pour éviter toute situation de compétition (*race condition*), ces deux couches furent synchronisées par mutex au niveau de l'utilisation de la matrice de transformation *MTC*.

4.3.1 Description d'une interface personnalisée

Avant de passer aux modules composant la couche actuelle, nous présentons, dans les deux sous-sections ci-dessous, les méthodes utilisées pour décrire une interface personnalisée, tant graphiquement que sur le plan comportemental.

Description graphique des interfaces personnalisées

Nous nous sommes arrêtés, pour décrire graphiquement une interface, sur l'utilisation des fichiers images plutôt que sur des règles abstraites, qui ne permettent pas encore de générer des interfaces de qualité [40]. Chaque interface personnalisée est ainsi décrite par quatre fichiers (cf. Figure 4.9) :

- le premier fichier représente l'interface personnelle au repos, sans composante activée;
- le deuxième fichier représente cette même interface, mais cette fois, en action (c.-à-d. sur laquelle toutes les composantes sont activées). En appliquant un masque sur chaque entité en cours d'interactions, ce fichier nous permettra de signaler graphiquement à l'utilisateur la mise en fonction d'une composante particulière;
- le troisième fichier contient la carte de transparence de l'interface et permet de représenter des interfaces non rectangulaires;
- quant à lui, le dernier fichier sert à mémoriser un code de couleur à la position de chaque composante. Comme il s'agit d'un fichier RGB 24 bits, nous pourrions théoriquement supporter plus de 16.7 millions de composantes différentes par interface. Ce fichier a une double utilité. Premièrement, il permet de localiser et

d'isoler les composantes entre elles, pour déterminer laquelle a été activée et laquelle doit être mise à jour au niveau de l'affichage. Deuxièmement, il permet d'associer, dans un fichier texte indépendant, un nom et un type à chaque code de couleur et donc, à chaque composante.



Figure 4.9 : Fichiers de description graphique d'une interface personnalisée de la famille « chaînes stéréophoniques » : (A) interface au repos, (B) interface active, (C) masque de transparence et (D) fichier de code de couleur identifiant chaque composante

Outre ces fichiers de description de l'interface, d'autres décrivant les fonds à utiliser pour les écrans LCD peuvent aussi être spécifiés, afin d'afficher différentes informations graphiques sur un écran virtuel (ex. : pictogrammes, boîtes de dialogue, etc.). Chacun de ces fichiers est aussi associé à une carte de transparence, afin de pouvoir en combiner plusieurs sur le même écran (ex. : affichage du niveau d'encre magenta, jaune et cyan, à côté d'un pictogramme décrivant la source du papier, pour une imprimante).

Description comportementale des interfaces personnalisées

Cette description est mémorisée dans un fichier XML, qui sera utilisé par la machine à états (cf. section 4.3.3), chargée de « l'exécuter ». Il contient les états majeurs de

l’interface personnalisée (ex. : lecture d’un disque compact, lecture d’une cassette et syntonisation de la radio), ses sous états (ex. : ajustement, lors de la lecture d’un disque compact, de la liste des pistes à jouer) ainsi que les fonctionnalités de chacune des composantes de l’interface, par état, incluant les messages à afficher sur un écran LCD, si ce dernier est présent dans l’interface personnelle. Sans entrer dans les détails (nous présentons à l’annexe C un exemple de fichier de configuration), nous supportons jusqu’à présent un nombre théoriquement illimité d’états et de sous-états (incluant une imbrication infinie de sous-états) ainsi que des composantes de type boutons, roulettes, LCD et LED. Chaque composante peut enclencher différentes actions (exécutées sur l’activation d’une composante) ou post-actions (exécutées sur la désactivation d’une composante), pouvant consister à sauter à un état particulier, à modifier une variable interne de la machine à états (addition, multiplication ou soustraction), à communiquer un message (paramétré, en distinguant les variables à utiliser d’un texte pur entre des signes dollars, ou non) sur un écran LCD, à modifier les fonds et pictogrammes affichés et à transmettre une commande à la machine contrôlée. Chacune de ces actions peut aussi être conditionnelle à l’état d’une variable (explicitée dans le fichier par un point d’interrogation, à l’instar des tests booléens en langage C).

4.3.2 Module de présentation des interfaces personnalisées

Une fois l’interface personnalisée initialisée, le module de présentation se charge de toutes les fonctions d’affichage ayant trait à l’interface et aux interactions de l’utilisateur. Il gère à la fois l’alignement et la fusion de l’interface personnalisée dans

l'environnement, sa stabilisation, la mise à jour des affichages LCD, si présents, ainsi que le retour d'indices visuels lors des interactions (cf. Figure 4.10).

Intégration de l'interface à l'environnement

La matrice de transformation calculée par la couche de détection est utilisée par le module de présentation pour déterminer la déformation et la translation à appliquer au fichier graphique décrivant l'interface virtuelle, afin de l'intégrer intimement dans l'espace de la caméra. Pour ce faire, les coins du fichier graphique sont premièrement transposés dans l'espace de la caméra. Un quadrilatère, texturé par l'interface personnalisée, est ensuite dessiné à cet endroit, par-dessus l'arrière scène représentant l'image capturée non modifiée. Dans le cas d'interfaces non rectangulaires, le fichier de transparence correspondant (cf. section 4.3.1) est utilisé comme masque lors du rendu graphique, pour ne pas empiéter sur des régions de l'arrière scène. Mentionnons aussi que ce module est chargé, lors de l'affichage de l'interface personnalisée, de ne pas cacher, dans l'image originale présentée en arrière plan, les mains de l'utilisateur appartenant à l'arrière scène. Comme expliqué plus tôt, cette opération est réalisée en utilisant le blob mémorisé par le module de détection des mains (cf. section 4.2.3) comme un masque d'affichage lors du rendu de l'interface personnalisée.

Stabilisation de l'interface personnalisée

Suite à des tests préliminaires, il fut constaté que les erreurs commises lors des calculs de la matrice de transformation par les modules SIFT et de flot optique se répercutaient sur la position de l'interface personnalisée, par de petits sautillements (*jitters*)

perceptibles d'une image à l'autre. Pour réduire l'amplitude de ces déplacements dérangeants, nous avons lissé la position des coins du quadrilatère en se basant sur leurs 4 dernières positions historiques. Mentionnons toutefois que la profondeur de l'historique utilisé représente un compromis entre la stabilisation de l'interface et son aptitude à se repositionner rapidement dans l'image, suite à un changement brusque de point de vue.

Mise à jour des affichages LCD

Selon l'état de l'interface personnalisée et les réponses transmises par la machine à contrôler, certaines mises à jour au niveau de l'écran LCD pourraient être requises, si ce dernier est présent sur l'interface virtuelle. Le module de présentation est aussi responsable de telles fonctionnalités, que nous pouvons séparer chronologiquement en trois parties :

1. localisation de l'écran LCD : la présence d'un écran LCD est indiquée dans le fichier de description des composantes. Ce fichier permet de faire le lien, grâce au code de couleur instauré, avec la composante jouant le rôle d'écran dans le fichier graphique de l'interface personnalisée. Il est ainsi possible de localiser cet écran dans le repère du modèle et de déterminer la position de ses coins dans l'espace de la caméra, en utilisant la matrice de transformation calculée plus tôt;
2. mise à jour des fonds et des pictogrammes de l'écran LCD : les fonds et les pictogrammes à utiliser, dictés par l'état de la machine interne (cf. section 4.3.3), sont ensuite déformés en tenant compte de la translation initiale à imposer dans le

repère du modèle. Ces fonds sont combinés les uns aux autres grâce aux cartes de transparence créées préalablement.

3. affichage des messages sur l'écran LCD : les messages, fixes ou paramétrés, dictés par le fichier XML de comportement, sont ensuite rajoutés par-dessus l'écran LCD, de la couleur et à la position spécifiée (en pourcentage, à partir du coin supérieur gauche de l'écran). Pour ce faire, la librairie FTGL est utilisée.

Retour d'indices visuels lors d'interactions

Le module de présentation des interfaces est finalement aussi responsable de tous les retours visuels d'informations. Il est ainsi chargé :

- d'indiquer à l'utilisateur, par l'intermédiaire d'un point vert localisé sur sa main, l'extrémité du doigt retenu par le module pour lui permettre d'interagir avec l'interface virtuelle. Cette couleur fut choisie car elle est la mieux perçue par la vision trichromatique humaine, à une longueur d'onde située près de 555nm [80].
- de fournir une rétroaction visuelle lors de l'activation d'une composante, en utilisant le fichier graphique de code de couleur pour déterminer la forme du masque à appliquer pour combiner les deux fichiers décrivant l'interface au repos et en action, afin de faire ressortir l'élément d'intérêt (cf. Figure 4.12).



Figure 4.10 : Placement et intégration d'une interface personnalisée face à une chaîne stéréophonique Panasonic SA-AK520, incluant l'identification de l'extrémité du doigt actif et l'utilisation d'un masque d'affichage lors du rendu de l'interface (A); les écrans de contrôle du flot optique (1) et de détection SIFT (2), l'image originelle (3), les écrans de segmentation des mains (4, 5) et la console de débogage (6) sont aussi présentés.

4.3.3 Machine à états interne

Cette machine à états est chargée de maintenir la cohérence de l'interface virtuelle, selon le comportement dicté par le fichier XML de configuration. Pour ce faire, elle fait appel à cinq classes inter-reliées:

- CState : cette classe représente un état ou un sous-état de l'interface personnalisée. Elle contient une liste de composantes utiles (c.-à-d. pouvant être

activées) dans cet état (CStateComponent) ainsi que les actions à entreprendre et les messages à communiquer, par l’intermédiaire de l’écran LCD (si présent), lors de l’entrée dans cet état.

- CStateComponent : cette classe représente une composante de l’interface. Elle mémorise son type (nous supportons jusqu’à maintenant des boutons, roulettes, écrans LCD et LED) ainsi que le message, les actions et les post-actions associés à son activation. Elle contient aussi le code de couleur qui lui a été attribué, son état (actif ou au repos) et l’indice temporel associé à sa dernière activation (utilisé, par exemple, pour incrémenter une variable de plus en plus rapidement). Soulignons que plusieurs objets décrivant une même composante peuvent coexister, afin de représenter ses différents impacts sur l’interface personnalisée, selon l’état à partir duquel elle sera utilisée.
- CStateVariable : cette classe représente une variable interne de la machine à états. Celles-ci peuvent être utilisées tant pour effectuer des calculs intermédiaires que pour mémoriser l’état actuel ou futur d’un appareil (numéro de téléphone composé, chaleur de cuisson, etc.). Certaines sont transmises lors de l’émission des commandes de l’utilisateur tandis que d’autres sont redirigées pour contrôler l’affichage de l’écran LCD, si demandé. Ces variables peuvent pour l’instant prendre la forme d’un intervalle d’entiers ou d’un ensemble d’entiers ou de chaînes de caractères. Chaque CStateVariable contient un pointeur sur la valeur actuelle et peut être additionné, multiplié ou soustrait à toute autre CStateVariable du même type.

- CStateMessage : cette classe représente un message à afficher sur l'écran LCD de l'interface personnalisée, que ce soit lors de l'activation d'une composante ou lors du passage à un état donné. Chaque message peut être paramétré en incorporant différentes variables (CStateVariable) qui seront évaluées dynamiquement lors de l'affichage du message.
- CStateAction : cette dernière classe représente une action (associée à l'activation d'une composante, ou au passage à un état) pouvant être déclinée en un saut à un autre état, en une mise à jour de variables, en un changement de fonds d'écran ou de pictogrammes (pour l'écran LCD), ou en la transmission d'une commande (paramétrée ou non) au module de communications chargé de relayer les instructions de l'utilisateur aux appareils commandés. Chaque action peut être exécutée sur l'activation d'une composante ou sur sa désactivation (post-action) et peut aussi être conditionnelle à une variable (ex. : envoi d'une commande de cuisson seulement si une durée a été établie).

4.3.4 Module d'interprétation des gestes de l'utilisateur

Ce dernier module de la couche de présentation et de gestion se charge de répliquer virtuellement les modes opératoires principaux d'une interface matérielle conventionnelle, afin de minimiser l'adaptation requise de la part de l'utilisateur sur le plan de l'action (cf. Figure 4.12). Bien que d'autres modes opératoires pourraient être supportés, nous nous sommes arrêtés sur les deux que nous jugeons principaux soit la pression de boutons et l'utilisation de roulettes disposées dans le plan d'une interface.

Identification de l'extrémité du doigt actif de l'utilisateur

Nous nous sommes limités, pour l'instant, à l'identification de l'extrémité d'un doigt comme pointeur des composantes d'intérêt. Bien que cette décision se répercute sur la nature des entités supportées et sur les techniques d'activation utilisées, elle est défendable dans la limite de notre étude car elle s'applique normalement à l'activation de boutons, de roulettes et même de glissières, qui composent une grande partie des interfaces matérielles à virtualiser. Quant à déterminer quel doigt utiliser, nous nous sommes arrêtés sur le doigt dont l'extrémité se situait à la position la plus haute dans le plan de l'image, après avoir étudié la posture de la main d'un utilisateur lors de l'activation de telles composantes. Cette constatation fut aisée à implémenter, en se basant sur le blob identifié par notre module de détection des mains. En effet, une fois la main isolée, il suffit, pour obtenir l'extrémité du doigt utilisé pour activer une composante, de déterminer la position du pixel le plus en haut parmi tous les candidats retenus.

Identification des composantes survolées

L'identification des composantes survolées par l'extrémité du doigt de l'utilisateur a été optimisée en se basant sur le fichier graphique de code de couleur présenté à la section 4.3.1. Comme nous disposons déjà de la matrice permettant d'intégrer l'interface personnalisée au monde, il nous est aussi possible de l'utiliser pour déformer ce fichier, sans le présenter dans l'affichage de l'utilisateur (en utilisant un double buffering au niveau graphique). Une fois cet alignement effectué, il suffit de récupérer la couleur du

pixel situé sous l'extrémité du doigt de l'utilisateur pour identifier la composante survolée. Cette technique nous permet à la fois :

- de ne pas avoir à décrire mathématiquement la position et la forme de chaque composante;
- d'éviter tout calcul mathématique pour déterminer si l'extrémité du doigt de l'utilisateur se situe à l'intérieur d'une zone particulière;
- de bénéficier d'une précision plus grande que celle que nous obtiendrions en nous basant sur des calculs de frontières, face à des composantes de formes irrégulières.

Activation d'une composante

Une fois la position du doigt de l'utilisateur connue et la composante d'intérêt identifiée, plusieurs techniques ont été étudiées pour l'activer. Nous nous sommes tout d'abord tournés vers des indices visuels nous permettant d'évaluer la profondeur du doigt dans l'image, ou plus précisément, le changement de profondeur lors de la pression naturelle d'un bouton. Un seuil a ainsi été fixé sur le rayon de l'extrémité du doigt de l'utilisateur, pour approximer sa profondeur dans l'image et déterminer s'il s'était assez approché de l'interface virtuelle pour activer une composante particulière. Cette technique toutefois, se comportait mal face à des changements de point de vue de la caméra, notamment lors de zoom avant et arrière, qui étaient interprétés comme des changements de profondeur du doigt, alors que ce dernier ne bougeait pas. Pour corriger ce problème, nous avons pris, comme référence, la taille de l'interface matérielle identifiée. En l'intégrant à notre

algorithme, il nous fut possible non pas de nous baser sur un seuil fixe, dépendant du point de vue de la caméra, mais de comparer le rayon de courbure à une dimension connue, pour s'intéresser à un ratio et enlever de l'équation le zoom actuel de la caméra. Bien que donnant de meilleurs résultats que la première avenue, une telle technique présentait deux désavantages majeurs :

- elle nécessitait une initialisation du rayon de courbure initiale du doigt de l'utilisateur, évaluation difficile à obtenir vue la précision requise;
- elle était sensible, autour du ratio seuil fixé, à l'activation à répétition d'une composante particulière ou à l'activation en série lors du survol des composantes qui n'étaient pas d'intérêt.

Nous avons finalement pris une avenue tout à fait différente, en ne se basant pas sur la profondeur du doigt de l'utilisateur, mais sur l'identification de pauses au dessus des composantes d'intérêt, présentes naturellement face à une interface matérielle, le temps d'interagir avec une composante particulière. Nous avons ainsi considéré comme activée toute composante au-dessus de laquelle l'utilisateur s'arrêta plus de 4 dixièmes de seconde. Notons toutefois qu'une telle solution est loin d'être parfaite car elle introduit, au niveau des interfaces virtuelles, un certain délai dans l'exécution des tâches. Nous proposons d'ailleurs des solutions à étudier pour résoudre ce problème à la section 7.3.1.

4.4 Architecture logicielle : couche de communication

La couche de communication se résume, pour l'instant, en un seul module. Il est chargé à la fois de transmettre les commandes de l'utilisateur à un appareil donné et de recevoir, de la part de ce dernier, la description SIFT de son interface matérielle ainsi que, au besoin, ses réponses aux instructions émises. Ces informations sont respectivement acheminées à la couche de détection et à la couche de présentation et de gestion.

4.4.1 Module de communication

Le module de communication est intimement lié à l'appareil contrôlé et, tant qu'une spécification des protocoles de communication ne sera pas énoncée, et tant que le paradigme proposé ne sera pas implémenté au niveau matériel, ce module sera dépendant du format des commandes tolérées et des fonctionnalités de communications spécifiques à chaque appareil (ex. : communications infrarouge ou radio), ou des possibilités d'intégration d'un adaptateur (ex. : par port réseau, par port USB, par intégration à l'électronique interne, etc.). Face à cette difficulté à proposer un concept générique pour établir un canal de communication, et face à l'incertitude quant à la nature des appareils qui seront utilisés pour évaluer notre plateforme durant les tests utilisateurs, ce module fut chargé, dans le cadre de nos pré-tests, de mémoriser à l'interne la description SIFT d'une interface matérielle à détecter, au lieu de la recevoir de la part des appareils environnants, comme nous le montrerons au chapitre 5. Quant à l'émission des commandes de l'utilisateur, nous finissons l'acquisition d'un

émetteur/récepteur universel infrarouge (cf. Figure 4.11), qui fut raccordé par port USB à notre module central.



Figure 4.11 : Émetteur/récepteur universel infrarouge

Ce dispositif nous permit, dans un premier temps, de recenser plusieurs des codes infrarouges intelligibles par une chaîne stéréophonique Panasonic SA-AK520. Ceux-ci nous aidèrent à dresser une table de traduction (qui sera plus tard transférée du côté de l'appareil contrôlé afin d'homogénéiser les communications, comme montré à la section 5.4.5) entre les commandes infrarouges à émettre et celles reçues de la part de la machine à états située sur la couche inférieure. Une fois ces associations établies, ce dispositif nous permit de compléter les tests de notre architecture, en nous donnant l'occasion de contrôler un appareil par l'intermédiaire d'une interface personnelle (cf. Figure 4.12).

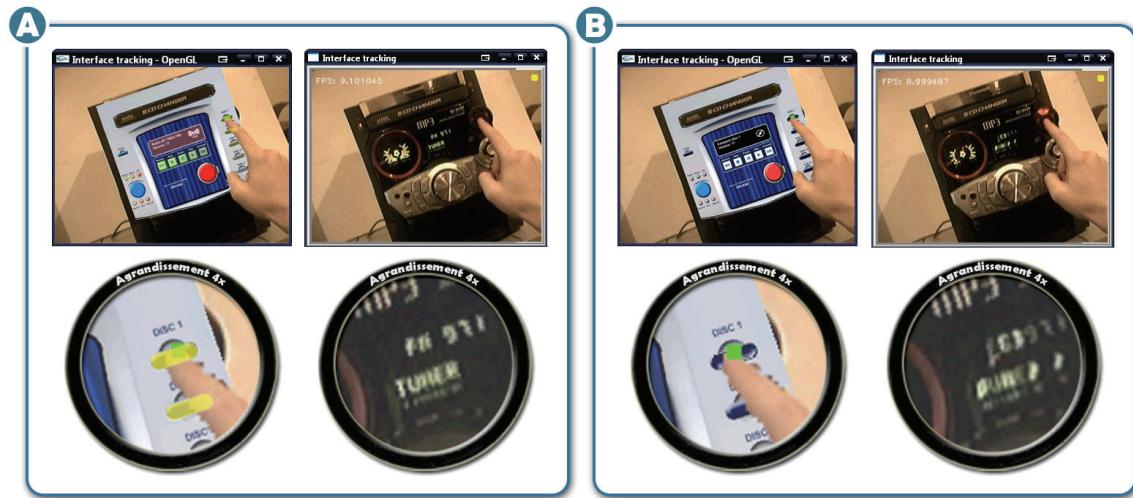


Figure 4.12 : Transmission d'instructions de contrôle à une chaîne stéréophonique Panasonic SA-AK520, par l'intermédiaire d'une interface personnalisée et d'un émetteur infrarouge USB : (A) identification de la composante à activer grâce au fichier de code de couleur (mis en transparence pour illustration) et (B) transmission de la commande

CHAPITRE 5 : MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Suite à la présentation de notre plateforme dans le chapitre précédent, nous nous attarderons ici à répondre au deuxième et, en partie, au troisième objectif spécifique de notre thèse, mentionnés à la section 3.3.2, en détaillant l'étude expérimentale qui a été élaborée pour mettre le paradigme proposé en pratique, dans des situations réelles, et recueillir les données nécessaires afin de le comparer aux interfaces matérielles actuelles, en termes de performance, d'utilisabilité et de réception des utilisateurs. Nous présenterons ainsi dans ce chapitre, et justifierons, les objectifs de cette étude expérimentale, les résultats attendus, le domaine d'application et la tâche choisie, le matériel utilisé et les modifications logicielles apportées à notre plateforme, le processus de recrutement des sujets, le déroulement d'une séance de tests et la nature des mesures recueillies.

5.1 Conception des expériences

La présente étude expérimentale s'est fixé les trois objectifs ci-dessous afin de positionner notre paradigme par rapport aux interfaces matérielles, en tenant compte de

l'implémentation proposée. Une fois ces objectifs énoncés, nous expliquerons, dans trois sous-sections indépendantes, comment les atteindre, et détaillerons les résultats que nous pourrions obtenir, ceux escomptés, ainsi que leurs implications.

1. Déterminer le "coût d'utilisation" des interfaces virtuelles ou, plus précisément, quantifier la similitude, tant en termes de performances que de perceptions, entre une interface matérielle et sa contrepartie virtuelle.
2. Déterminer, quantifier et expliquer si une interface virtuelle, adaptée aux connaissances d'un utilisateur, pourrait concurrencer une interface matérielle qui lui serait préalablement **inconnue**.
3. Déterminer, quantifier et expliquer si une interface virtuelle, adaptée aux connaissances d'un utilisateur, pourrait concurrencer une interface matérielle qui lui serait préalablement **connue**.

5.1.1 Coût d'utilisation des interfaces virtuelles

Pour déterminer le coût introduit par l'utilisation d'interfaces virtuelles dans une tâche particulière, nous comparerons, pour une même tâche, les mesures recueillies face à une interface matérielle conventionnelle (A) à celles obtenues face à une interface virtuelle (IV), calquée sur l'interface A. Cette comparaison nous permettra de quantifier le coût induit par la technologie utilisée pour supporter une interface virtuelle.

Conclusions et résultats escomptés

En ce qui a trait aux résultats en termes de performance, d'utilisabilité et de satisfaction des utilisateurs, nos expériences pourraient nous mener à l'une des trois conclusions mutuellement exclusives ci-dessous, selon laquelle :

- a. l'IV serait globalement **supérieure** à l'interface matérielle A : comme l'IV ne tente pas de surclasser l'interface A mais simplement de lui être identique, ce cas est peu probable. De plus, comme l'IV introduira, dans les interactions humain-machine, une couche virtuelle limitatrice (ex. : retour de forces absent, gestion de profondeur difficile, etc.) pour remplacer la couche matérielle, l'IV devrait handicaper l'utilisateur, ce qui se répercute sur les mesures recueillies. Toutefois, s'il advenait que nos mesures nous mènent à cette première conclusion, cette supériorité de l'IV, par rapport à l'interface originelle, pourrait être expliquée en supposant que cette dernière n'est pas fidèlement reproduite en réalité augmentée, notamment en ce qui a trait aux délais de réponse, aux perceptions de l'utilisateur, etc.
- b. l'IV serait globalement **identique** à l'interface matérielle A : à la lumière des pré-tests effectués pour valider le matériel et les algorithmes utilisés, nous prévoyons que cette possibilité sera celle observée. Ceci nous laisserait conclure que la technologie actuellement utilisée permet à une interface virtuelle de présenter globalement les mêmes caractéristiques et performances qu'une interface matérielle similaire. À terme, cela signifierait que des interfaces virtuelles,

calquées initialement sur des interfaces matérielles, pourraient être adaptées à chaque utilisateur pour faciliter les interactions humain-machine actuelles.

- c. l'IV serait globalement **inférieure** à l'interface matérielle A : comme l'IV introduit une couche limitatrice dans les interactions humain-machine, comme mentionné plus tôt, il se peut que l'IV soit inférieure à l'interface originelle. Il faudra alors déterminer comment réduire le coût d'utilisation de l'IV (c.-à-d. comment améliorer le matériel ou les algorithmes utilisés), à la lumière des mesures quantitatives (nombre et durée des erreurs commises par les algorithmes utilisées) et qualitatives (commentaires et perceptions des utilisateurs) recueillies.

5.1.2 Comparaison entre une interface virtuelle connue et une interface matérielle inconnue

Pour déterminer si une interface virtuelle adaptée aux connaissances d'un utilisateur pourrait surclasser une interface matérielle qui lui est inconnue, nous comparerons, pour une même tâche, les mesures recueillies face à une interface matérielle conventionnelle inconnue (B) à celles obtenues face à une interface virtuelle (IV), avec laquelle l'utilisateur sera familier. Ici, l'IV sera bien entendu différente de l'interface B, étant donné que la première sera connue de l'utilisateur tandis que la deuxième non.

Justification de la nécessité d'une étude croisée

Comparer les mesures obtenues tel quel pourrait toutefois entraîner des erreurs d'interprétation si nous n'effectuons pas d'étude croisée. En effet, des résultats

préliminaires pourraient nous laisser croire que le concept proposé est intrinsèquement supérieur (ou inférieur) aux interfaces matérielles, pour la tâche étudiée, alors que cette différence serait réellement attribuable au fait qu'une des deux interfaces, en tant que tel (et non le mode de présentation et d'interactions), serait nettement plus (ou moins) utilisable et performante que l'autre. C'est pourquoi nous devrons réaliser deux fois cette expérience, soit une fois en a) comparant l'IV connue à l'interface matérielle B inconnue et une autre fois en b) comparant une autre interface virtuelle, calquée sur l'interface B, à une interface matérielle reproduisant la première IV (cf. Tableau 5.9 récapitulant les expériences). Comme nous le verrons, en arrivant à isoler un cas où une interface virtuelle serait supérieure à une interface matérielle inconnue, nous pourrons conclure qu'il est possible de proposer à un utilisateur de remplacer efficacement certaines interfaces matérielles inconnues par des interfaces virtuelles connues, pour supprimer les phases d'adaptation à ces interfaces matérielles.

Conclusions et résultats escomptés

En ce qui a trait aux résultats en termes de performance, d'utilisabilité et de satisfaction des utilisateurs, nos expériences pourraient nous mener à l'une des deux conclusions mutuellement exclusives ci-dessous, selon laquelle :

- a. l'IV serait globalement **supérieure** à l'interface matérielle inconnue B : comme l'IV sera connue de l'utilisateur, et que nous nous attendons à ce que son coût d'utilisation soit relativement faible (cf. premier objectif présenté à la section 5.1.1), il est, selon nous, fortement probable d'observer ce cas au moins une fois

dans notre étude croisée. Si nos mesures le confirment, l'étude aura prouvé qu'il existe au moins une tâche, et sûrement d'autres, pouvant bénéficier du concept d'interfaces virtuelles, pour supprimer de façon bénéfique la phase d'adaptation à une interface particulière inconnue.

- b. l'IV serait globalement **identique ou inférieure** à l'interface matérielle inconnue
- B : comme nous nous attendons à ce que le coût d'utilisation de l'IV soit relativement faible (cf. premier objectif présenté à la section 5.1.1) et à ce qu'une des deux interfaces matérielles utilisées durant notre étude croisée soit supérieure à l'autre pour la tâche que nous ciblerons, il est peu probable que toutes nos mesures confirment cette possibilité. Toutefois, si tel en était le cas, les données recueillies nous permettraient de déterminer pourquoi les interfaces inconnues utilisées sont supérieures aux interfaces virtuelles, et comment améliorer ces dernières. Il nous faudra finalement rappeler que 1) cette conclusion ne cible que la tâche et les appareils choisis et que 2) les interfaces virtuelles utilisées ne sont pas adaptées aux utilisateurs mais simplement connues de ces derniers, et qu'une adaptation aux besoins spécifiques de chacun permettrait peut-être de surpasser une interface matérielle inconnue.

5.1.3 Comparaison entre une interface virtuelle connue et une interface matérielle connue

Bien que nous n'ayons pas la prétention, à ce stade de nos recherches, et surtout pour la tâche précise testée, de conclure qu'une interface virtuelle (IV) connue de l'utilisateur

pourrait surpasser une autre interface matérielle (C), elle-aussi familière, il sera intéressant de quantifier les différences entre ces deux interfaces, pour déterminer si nous pouvons, à court ou à long terme, aspirer à ce que des interfaces virtuelles puissent non seulement supprimer les phases d'adaptation à des interfaces inconnues (cf. section 5.1.2) mais puissent aussi remplacer des interfaces matérielles moins efficaces, utilisées régulièrement.

Pour ce faire, nous comparerons, pour une même tâche, les mesures recueillies face une IV à celles obtenues face à une interface matérielle C distincte, toutes deux connues de l'utilisateur. Comme précédemment (cf. section 5.1.2), nous effectuerons une étude croisée, pour les mêmes raisons.

Conclusions et résultats escomptés

En ce qui a trait aux résultats en termes de performance, d'utilisabilité et de satisfaction des utilisateurs, nos expériences pourraient nous mener à l'une des deux conclusions mutuellement exclusives ci-dessous, selon laquelle :

- a. l'IV serait globalement **supérieure ou identique** à l'interface matérielle connue C: si nos résultats confirmaient cette possibilité, notre étude supporterait fortement l'introduction du paradigme proposé, en ouvrant la porte à l'utilisation courante d'interfaces virtuelles, qui pourraient de plus être adaptées à chaque utilisateur, pour remplacer complètement certaines interfaces matérielles actuelles, moins efficaces et utilisables.

b. l'IV serait globalement **inférieure** à l'interface matérielle connue C: si nos résultats confirmaient cette possibilité, pour la tâche et les interfaces choisies, il serait intéressant de se référer aux courbes d'apprentissage des deux interfaces, pour déterminer s'il est possible d'aspirer, à terme, à une performance similaire ou supérieure de l'IV. Il nous faudra finalement rappeler que 1) cette conclusion ne cible que la tâche et les appareils choisis et que 2) les interfaces virtuelles utilisées ne sont pas adaptées aux utilisateurs mais simplement connues de ces derniers, et qu'une adaptation aux besoins spécifiques de chacun permettrait peut-être de surpasser une interface matérielle connue.

5.1.4 Justification du choix des interfaces virtuelles

Il est important de noter qu'aucune interface virtuelle spécifique aux besoins d'un utilisateur ne sera créée lors de cette étude pratique, bien que notre plateforme le supporterait. Ceci est dû principalement aux quatre raisons ci-dessous :

- premièrement, car aucun des objectifs de l'expérience ne nécessite la création d'interfaces virtuelles adaptées aux besoins d'un utilisateur. Au contraire, ils requièrent tous l'utilisation d'interfaces virtuelles calquées sur des interfaces matérielles existantes, que ce soit pour quantifier le coût d'utilisation des interfaces telles qu'implémentées ou pour effectuer nos études croisées;
- deuxièmement, car il serait difficile, alors que le concept d'interfaces virtuelles est encore à l'étude, d'optimiser une interface virtuelle, selon les circonstances d'utilisation, le matériel employé, la nature de la tâche, etc.;

- troisièmement, car il serait colossal et prématué, dans le cadre de cette étude, de développer une interface adaptée aux besoins de chacun des nombreux sujets qui participeront aux expériences;
- et finalement, car le recours à des interfaces optimales, répondant aux besoins de chaque utilisateur, biaiserait considérablement les conclusions de l'expérience, en comparant les performances obtenues face à des interfaces virtuelles optimales, par rapport à celles recueillies face à des interfaces matérielles génériques.

C'est pour cela que nos expériences n'auront recours qu'à des interfaces virtuelles avec lesquelles les utilisateurs se seront familiarisés (c.-à-d. répondant en quelque sorte à leurs attentes mais non à leurs besoins), et ceci, au risque de mettre celles-ci à un désavantage, alors qu'une de leur force réside dans leur adaptabilité.

5.2 Description des tâches

Pour positionner notre paradigme et juger de son utilisabilité, cette étude a choisi de le mettre en pratique en ciblant l'utilisation d'appareils de bureau multifonctions, jouant le rôle d'imprimante, de fax, de numériseur et de photocopieur (cf. section 5.4.1). Elle comparera les interfaces de deux appareils de cette famille, incluant leurs contreparties virtuelles, en invitant chaque participant à l'étude à réaliser la tâche ci-dessous. La

justification du choix de cette famille d'appareils et de cette tâche est aussi donnée ci-après.

5.2.1 Tâche à réaliser

La tâche que chaque participant accomplira durant l'étude, et durant laquelle nous recueillerons les mesures nécessaires (cf. section 5.5.4) pour nos comparaisons, est présentée ci-dessous au Tableau 5.1, représentant l'énoncé qui a été donné à chaque sujet.

Tableau 5.1 : Énoncé de la tâche donné à chaque participant

Obtenir deux (2) photocopies identiques du document actuellement placé dans l'appareil multifonction. Chaque photocopie doit:

- **être en couleur;**
- **représenter le document original, grossi à 200%;**
- **être effectuée au plus haut niveau de qualité d'impression;**
- **être effectuée au $\frac{3}{4}$ de l'échelle d'assombrissement disponible.**

Chaque participant effectuera cette tâche trois fois, pour recueillir les mesures nous permettant d'atteindre les trois objectifs de l'étude expérimentale, soit :

- en utilisant un appareil (A), dont le fonctionnement lui aura été préalablement expliqué et avec lequel il aura eu le temps de se familiariser;
- en utilisant un autre appareil (B), dont le fonctionnement ne lui aura pas été expliqué;

- en utilisant ce même appareil B inconnu, mais, cette fois, au travers d'une interface virtuelle calquée sur l'interface de l'appareil A connu. Cette interface remplacera bien entendu l'interface inconnue de l'appareil B.

5.2.2 Estimation des temps d'exécution de la tâche

Les temps d'exécution minimaux pour réaliser la tâche ci-dessus, à l'aide des appareils multifonctions retenus, ont été mesurés en suivant les chemins présentés à la section 5.4.3. Ils sont exposés au Tableau 5.2 et représentent, face aux interfaces matérielles et aux interfaces virtuelles, le temps requis pour compléter la tâche par un utilisateur expert. Ils ont été mesurés empiriquement et ne prennent en compte aucun délai de réflexion. Ils représentent ainsi seulement les délais requis pour activer les composantes des interfaces (incluant les déplacements) et pour traiter mécaniquement, au niveau de l'appareil, les commandes transmises. Il aurait été intéressant de pouvoir prédire les temps d'exécution **moyens**, aux côtés des temps **minimaux**, afin de mieux estimer la durée d'une séance de tests et la taille des groupes de participants nécessaires pour faire ressortir les différences pressenties. Cependant, une telle prédiction théorique n'aurait pu être défendable car il aurait été difficile, sans étude pilote, de prendre en compte et de quantifier le nombre d'erreurs commises par les utilisateurs et les temps requis pour les corriger, ainsi que les délais de réflexion face aux réponses des interfaces et ce, sans compter les temps de récapitulation des requis de la tâche. De plus, aucun modèle analytique, tel GOMS [81], n'aurait pu nous aider dans nos prédictions. En effet, ces modèles n'ont pas été établis pour tenir compte des erreurs commises et encore moins du

temps d'interprétation et d'apprentissage d'une interface inconnue. Cependant, nous supposerons, à la lumière des chemins à parcourir et des temps d'expert recueillis, que les temps moyens d'exécution se situeront dans l'intervalle [30 secondes; 120 secondes]. Même s'il s'agit d'un large intervalle et d'une estimation relativement grossière, elle nous permettra 1) d'obtenir un ordre de grandeur du temps de réalisation des tâches, dans le cadre d'une séance (cf. section 5.5.2), et 2) d'estimer le nombre de sujets à recruter pour espérer aboutir à des résultats significatifs (cf. section 5.3.4). Ces estimations seront bien entendu supplantées, une fois les expériences complétées et lors de notre analyse, par les mesures pratiques recueillies.

Tableau 5.2 : Temps d'exécution minimal pour la tâche choisie, recueillis de façon empirique face aux interfaces retenues

	Canon MP750 matérielle		Epson CX9400Fax matérielle		Canon MP750 virtuelle	Epson CX9400Fax virtuelle
Familière	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Oui
Temps min. pratique (sec.)	12.6	/	20.1	/	21.7	32.8

5.2.3 Justification du choix de la famille d'appareils

Comme notre étude aura recours à des utilisateurs non spécialisés (cf. section 5.3.2), pour établir la viabilité du paradigme proposé dans un cadre quotidien, la famille d'appareils sélectionnée se devait de leur être accessible et familière, tout en étant apte à supporter des tâches relativement complexes pour, entre autres, obtenir des temps d'exécution substantiels pour faire aisément ressortir les différences entre les interfaces

choisies. Pour disposer d'un bassin d'interfaces différentes pour notre étude, cette famille devait aussi présenter une certaine hétérogénéité aux niveaux des interfaces des appareils la composant, tant au niveau de leur aspect matériel (distribution, formes et nombres de composantes de l'interface) que de leur logique (chemin pour accomplir une tâche particulière). De plus, comme notre budget de recherche était limité, le coût d'acquisition des appareils de la famille sélectionnée devait être relativement abordable. Finalement, comme cette étude tentera de généraliser ses résultats, et non d'aboutir à une conclusion spécifique qui ne toucherait que la classe d'appareils choisie, la famille sélectionnée se devait d'être représentative des autres classes d'appareils, surtout en ce qui a trait aux modes opératoires utilisés. Pour ces raisons, la famille d'appareils de bureau multifonctions semblait être une candidate intéressante, qui nous permettra sûrement de généraliser nos résultats à de nombreuses autres classes similaires sur le plan des entrées/sorties (écrans d'affichage et boutons poussoirs), tels les micro-ondes, les téléphones, les imprimantes, les télécopieurs, les chaînes stéréophoniques, les photocopieurs, etc.

5.2.4 Justification du choix de la tâche

La tâche énoncée plus haut a été sélectionnée car il s'agit d'une tâche non triviale, typique de la famille d'appareils choisie. Elle semble de plus facilement compréhensible par les utilisateurs et ne nécessite aucune connaissance préalable. Finalement, à la lumière des temps d'exécution estimés (cf. section 5.2.2), il est fort probable que la durée de cette tâche nous permettra de faire adéquatement ressortir des différences

significatives entre les interfaces, et ce, sans être trop longue pour induire une fatigue chez les participants.

5.3 Recrutement des participants

Préalablement au lancement de la campagne de recrutement des participants, et comme toutes recherches impliquant des sujets humains, notre projet d'étude a été soumis et accepté par le comité d'éthique de la recherche de l'École Polytechnique de Montréal (cf. certificat de conformité présenté à l'annexe A).

5.3.1 Méthode de recrutement

Le recrutement des sujets a eu lieu sur le campus de l'Université de Montréal, par l'intermédiaire de listes de diffusion de courriels et de journaux étudiants, tous indiquant que nous étions à la recherche de plus d'une trentaine de participants pour une étude sur des interfaces humain-machine. Ces communiqués faisaient référence à notre site internet (Figure 5.1), mis en place spécifiquement pour l'étude, afin de permettre aux participants intéressés d'obtenir des renseignements additionnels sur nos recherches, de déterminer quelles périodes de tests n'étaient pas encore assignées et, le cas échéant, de nous contacter par courriel pour participer à l'étude, selon les disponibilités affichées. Mentionnons finalement que, afin d'encourager la participation des sujets et pour renforcer le caractère officiel des expériences, la participation à l'étude était rémunérée (cf. section. 5.3.3).

Étude sur des interfaces humain-machine Alexandre Plouznikoff

Survol de l'étude

École Polytechnique de Montréal

Table des matières

Planification des séances de l'étude

Survol de l'étude

Rémunération des participants

Participation à l'étude

Références rapides

Imprimer

Survol de l'étude

Nous sommes à la recherche d'une trentaine de candidat(e)s désirant participer à une étude visant à évaluer un nouveau paradigme d'interfaces humain-machine, basé sur des interfaces virtuelles. Cette étude se situe dans le cadre d'études doctorales en génie informatique.

Chaque participant(e) choisissant de s'inscrire à cette étude sera rémunéré(e) à la fin de la séance. Chaque séance ne dure qu'entre 30 et 60 minutes, dépendant de la rapidité de chaque candidat(e). La participation à cette étude est anonyme, ne nécessite aucune compétence particulière et ne comportera aucun risque. Cette étude a été approuvée par le Comité d'éthique de la recherche avec des sujets humains de l'École Polytechnique de Montréal.

Mise à jour: toutes les périodes disponibles ont été réservées. Nous vous remercions grandement de votre intérêt envers notre étude, malheureusement, comme tous les candidats nécessaires à l'étude ont été trouvés, la période d'inscription est maintenant terminée (en date du 23 octobre 2008, 11h07).

Rémunération des participants

Chaque candidat(e) aura droit, pour sa participation à l'étude, à une **rémunération de 20\$**, remise en argent comptant à la fin de sa séance.

Description des tâches

Cette étude cherche à évaluer l'utilisabilité d'interfaces virtuelles, présentées en réalité augmentée, pour remplacer des interfaces réelles inconnues ou difficiles à utiliser, afin de permettre à un utilisateur de débugger efficacement avec des appareils de son environnement. En tant que participant(e), vous serez invité(e) à :

- vous familiariser avec l'interface d'un appareil multi-fonctions (photocopieur/fax/scanner/imprimante) (A) pour réaliser une tâche simple à l'aide de celui-ci;
- réaliser cette même tâche mais, cette fois, à l'aide d'un appareil multi-fonctions (B) dont vous ignoreriez le fonctionnement;
- réaliser une dernière fois cette même tâche à l'aide de cet appareil multi-fonctions (B) inconnu, mais dont l'interface aura été remplacée par une interface virtuelle virtuelle;
- compléter un questionnaire sur votre expérience.

Participation à l'étude

L'étude aura lieu du **lundi 3 novembre au vendredi 7 novembre 2008** inclusivement, au local 5109 du pavillon J.A. DeSève de l'École Polytechnique de Montréal.

Cette étude s'adresse à tous les étudiant(e)s du campus universitaire, peu importe leur âge, leur domaine d'étude ou leur familiarité avec un quelconque domaine informatique. Malheureusement, pour des raisons techniques (difficultés à monter l'affichage tête haute par dessus des lunettes de vue), nous ne pourrons accepter la participation d'étudiant(e)s portant des lunettes de vue.

La participation à cette étude ne comporte aucun risque et vous pourrez décider de vous retirer en tout temps des expérimentations.

Pour vous inscrire, il vous suffit de nous mentionner par courriel (alexandre.plouznikoff@polymtl.ca) deux ou trois de vos périodes de disponibilité parmi les périodes restantes ci-dessous. Nous vous confirmerons par courriel votre inscription sur réception de votre demande.

Planification des séances de l'étude

	lun. 11/3	mar. 11/4	mer. 11/5	jeu. 11/6	ven. 11/7	sam. 11/8	dim. 11/9
10am	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période non disponible (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (LP)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	
11am	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	
12pm	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	
1pm	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	
2pm	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	
3pm	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	
4pm	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	
5pm	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	
6pm	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période non disponible (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période prise (TE)	0-10min Période non disponible (TE)	0-10min Période prise (TE)	
7pm							
8pm							
9pm							
...							

Dernière mise à jour: 9 novembre 2008, 19h28

Anonymat des participants

Toutes les données seront recueillies de façon anonyme, sur un questionnaire numéroté. Seuls des données agrégées et anonymes seront publiées. Les questionnaires, ainsi que tout le matériel qui permettra d'identifier les participants, seront détruits dès que la compilation des résultats sera effectuée.

Références rapides

- Réalité augmentée (Wikipedia)
- Affichage tête haute (Wikipedia)
- Ordinateur porté (Wikipedia)

[IMPRIMER](#) [MAIL](#) [IMPRIMER](#) [MAIL](#) [IMPRIMER](#) [MAIL](#)

Figure 5.1 : Site internet présentant l'étude aux participants intéressés

5.3.2 Caractéristiques des participants recherchés

Cette étude s'adressait à tous les étudiant(e)s du campus universitaire, sans restrictions quant à leur âge, leur domaine d'étude ou leur familiarité avec un quelconque domaine informatique. Malheureusement, pour des raisons techniques, nous avons dû écarter de notre échantillon tous les sujets portant des lunettes, considérant les difficultés à installer l'affichage tête haute utilisé par-dessus ces dernières. Notons aussi que, pour tenter de minimiser le biais qu'un déséquilibre dû au sexe des participants aurait pu engendrer sur la généralisation de nos conclusions, un nombre similaire d'hommes et de femmes a été tentativement recruté parmi toutes les demandes reçues, et ont été réparties de façon équilibrée entre nos groupes de participants. Ceci nous permettra aussi, si le besoin s'en fait sentir, de décomposer les résultats selon le sexe des participants et d'effectuer des

comparaisons statistiquement valides entre hommes et femmes. En terminant, mentionnons que, à la lumière des limites imposées sur le bassin des participants potentiels, les conclusions que nous tirerons de notre étude ne pourront malheureusement pas être honnêtement étendues à la population dans son ensemble. Elles pourront toutefois sûrement être généralisées, de manière exploratoire, à l'ensemble des étudiants universitaires, représentatifs des caractéristiques des répondants.

5.3.3 Renseignements divulgués aux participants

Différents renseignements furent divulgués aux participants durant la phase de recrutement, par l'intermédiaire du site mis à leur disposition. Ils sont regroupés ci-dessous en sept catégories et touchaient :

- à la nature des tâches demandées et au contexte de l'étude, s'inscrivant dans le cadre d'une thèse doctorale visant à évaluer un nouveau paradigme d'interactions humain-machine, basé sur des interfaces présentées en réalité augmentée, pour dialoguer, durant ces expériences, avec des appareils multifonctions connus et inconnus;
- à la durée d'une séance, estimée à entre 30 et 60 minutes, selon la rapidité de chaque candidat à accomplir les tâches requises et compléter le questionnaire demandé;
- aux critères de sélection des participants, tels qu'énoncés à la section 5.3.2;

- à la gestion de l'anonymat des participants, comme exposé dans le formulaire de déclaration transmis au comité d'éthique sur la recherche avec des sujets humains, selon laquelle les données recueillies le seraient de façon anonyme, sur des questionnaires, fichiers et feuilles de notes numérotés, qui seraient détruits suite à la compilation des résultats;
- à l'absence de risques reliés à la participation à l'étude et au droit accordé à chaque participant de se retirer en tout temps des expériences;
- à la rémunération des participants, établie à 20\$ et remise après chaque séance;
- à la localisation de l'étude, qui se déroulerait du 3 au 7 novembre 2008, dans une des salles d'utilisabilité de la maison des technologies de formation et d'apprentissage (MATI), au local 5109 du pavillon J.A. Bombardier de l'École Polytechnique de Montréal.

5.3.4 Justification de la taille des groupes

Nous présentons dans cette section les raisons pour lesquelles nous nous sommes arrêtés sur le recrutement d'une trentaine de participants. La section statistique ci-dessous présente ainsi les arguments mathématiques supportant un tel échantillon, tandis que la section ci-après s'attarde sur la logistique de recourir à ce nombre de sujets, en tenant compte de la durée des expériences, du budget alloué, de la « mort » possible des participants, etc.

Justifications statistiques

Nous présentons ci-dessous l'impact de différentes tailles de groupes sur la puissance des tests statistiques pressentis, que nous utiliserons au chapitre 6, pour faire ressortir les différences, tant objectives (temps d'exécution des tâches et nombre d'erreurs) que subjectives (réponses aux énoncés de Likert [82] du questionnaire présenté à l'annexe B), entre les interfaces testées. Malheureusement, comme notre étude constitue en réalité la première étude pilote dans ce domaine, prenant en compte les interfaces choisies, nous ne disposons d'aucune donnée descriptive préalable pour conclure, à priori, quant à la normalité des mesures recueillies, à leurs moyennes ou leurs écarts types. Bien que nous pourrons, post expériences, extraire ces informations et juger de la normalité des populations, nous préférerons rester conservateur à cette étape en préconisant l'utilisation non pas de t-tests de Student, pour conclure à des différences entre les interfaces testées, mais bien de tests non-paramétriques, tels ceux des rangs signés de Wilcoxon.

En ce qui a trait aux temps d'exécution, nous nous intéresserons à détecter des écarts de 20 secondes entre leurs moyennes. À la vue des temps estimés, se situant entre 30 et 120 secondes (cf. section 5.2.2), cet écart nous semble suffisant pour conclure que le recours à telle interface ou tel paradigme présente un avantage non négligeable (représentant, au minimum, un gain de 15%) par rapport à un autre. Nous avons donc dressé le Tableau 5.3 ci-dessous, présentant les puissances de tels tests de Wilcoxon, pour différentes tailles de groupes, pour détecter de manière significative cet effet de 20 secondes entre les moyennes des temps d'exécution. Comme mentionné plus haut, étant donné que nous

ne disposons pas d'informations préalables sur les variances de nos populations, ce tableau décline la puissance des tests proposés sur différents écarts types présagés.

Tableau 5.3 : Étude de la puissance d'un test des rangs signés de Wilcoxon en fonction du nombre de sujets par groupe et des écarts types (effet de 20 secondes, α fixé à 0.05)

Écarts types dans chaque population (sec.)	Nombre de sujets par groupe				
	5	10	15	20	25
10 / 10	0.657	0.978	0.999	0.999	1.000
15 / 15	0.383	0.763	0.926	0.980	0.993
20 / 20	0.240	0.519	0.721	0.852	0.913

Nous remarquons, grâce à ce tableau, que des groupes de 15 utilisateurs suffiront, dans 72.1% des cas, à détecter, de manière significative, un écart de 20 secondes entre les temps d'exécutions moyens (en supposant un écart type maximal de 20 secondes dans chacune des populations).

Quant aux mesures subjectives, sous forme d'énoncés de Likert, nous les considérerons comme des mesures ordinaires, comme nous le verrons au chapitre 6. Nous n'aurons donc pas d'autres choix que de nous tourner aussi vers des tests de Wilcoxon pour les comparer. Sur une échelle de cinq unités, nous nous intéresserons à faire ressortir des différences d'au moins une unité dans nos comparaisons, différence que nous considérerons assez importante pour justifier le recours à un paradigme donné. Le graphique ci-dessous (Figure 5.2) montre ainsi les variations de la puissance d'un tel test de Wilcoxon, pour détecter un effet de 1 unité, en considérant un écart type identique.

Le recours à 15 utilisateurs par groupe nous permettra ici de détecter les différences souhaitées, de manière significative, dans plus de 72% des cas, ce qui, pour une étude exploratoire, constitue une puissance satisfaisante.

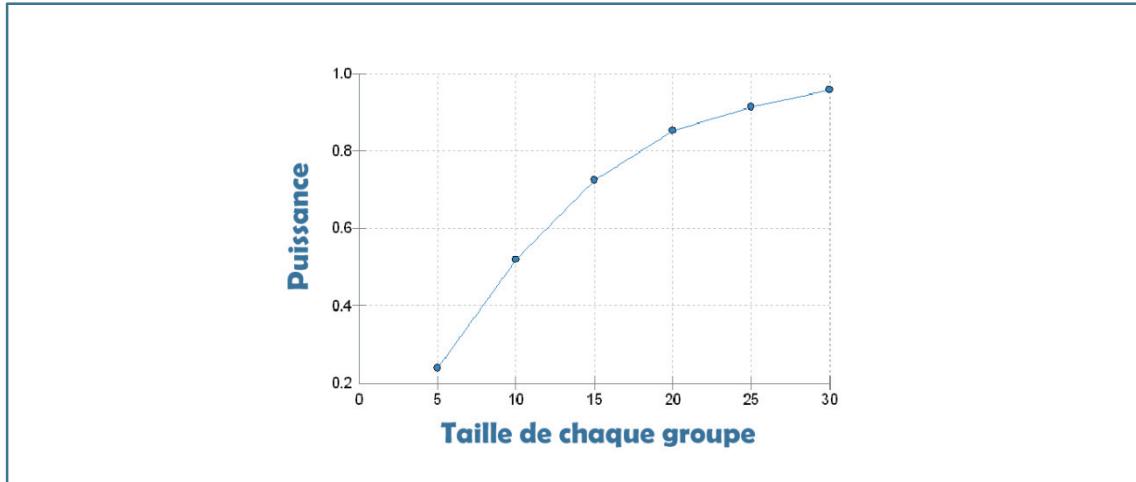


Figure 5.2 : Étude de la puissance d'un test des rangs signés de Wilcoxon en fonction du nombre de sujets par groupe, pour détecter un effet de 1 unité (écart type de 1 unité et α fixé à 0.05)

Justifications logistiques

Bien qu'un nombre plus élevé de participants nous permettrait d'augmenter la puissance des tests, et donc, de détecter, de manière encore plus significative, des différences plus fines, il ne faut pas oublier que cette étude exploratoire est effectuée dans un cadre budgétaire et temporel strict. C'est pour cela que nous devons contrôler la taille de notre échantillon. Recourir à un peu plus d'une trentaine de participants nous permettra toutefois de les répartir en deux groupes balancés de 15 sujets, suffisant dans la majorité des cas pour faire ressortir les différences nous intéressant, tout en bénéficiant d'une

marge de manœuvre satisfaisante qui 1) nous permettra de compenser tout désistement et 2) d'utiliser les participants surnuméraires pour recueillir différentes mesures répétitives, qui nous permettront d'estimer les courbes d'apprentissage des interfaces utilisées, afin de répondre à notre troisième objectif (cf. section 5.1.3) et de pousser plus loin notre étude.

5.4 Matériel utilisé

Cette section décrit, au sens large, le matériel utilisé durant les expériences. Elle touche ainsi à la fois à la présentation et à la justification du choix des appareils multifonctions retenus, appartenant à la famille proposée à la section 5.2.3, qu'aux modifications matérielles et logicielles apportées à notre infrastructure pour supporter la virtualisation de leur interface.

5.4.1 Présentation des appareils multifonctions choisis

Un appareil multifonction Canon Pixma MP750 et un Epson Stylus CX9400Fax ont été retenus pour cette étude. Nous présentons ci-dessous ces appareils (Figure 5.3), ainsi qu'un schéma annoté décrivant leur interface respective (Figure 5.4 et Figure 5.5).



Figure 5.3 : Appareils retenus (Canon MP750 à gauche, Epson CX9400Fax à droite)

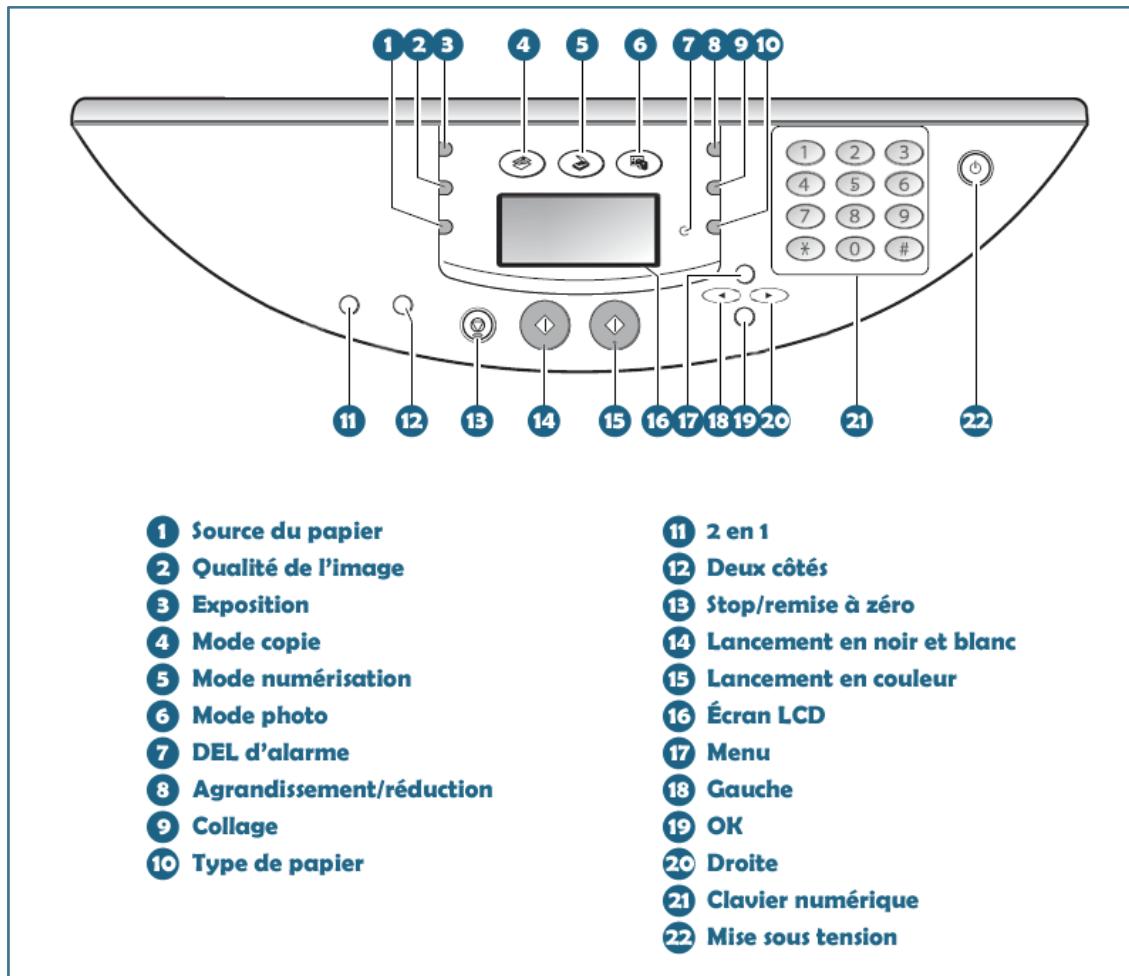


Figure 5.4 : Schéma annoté de l'interface du Canon MP750

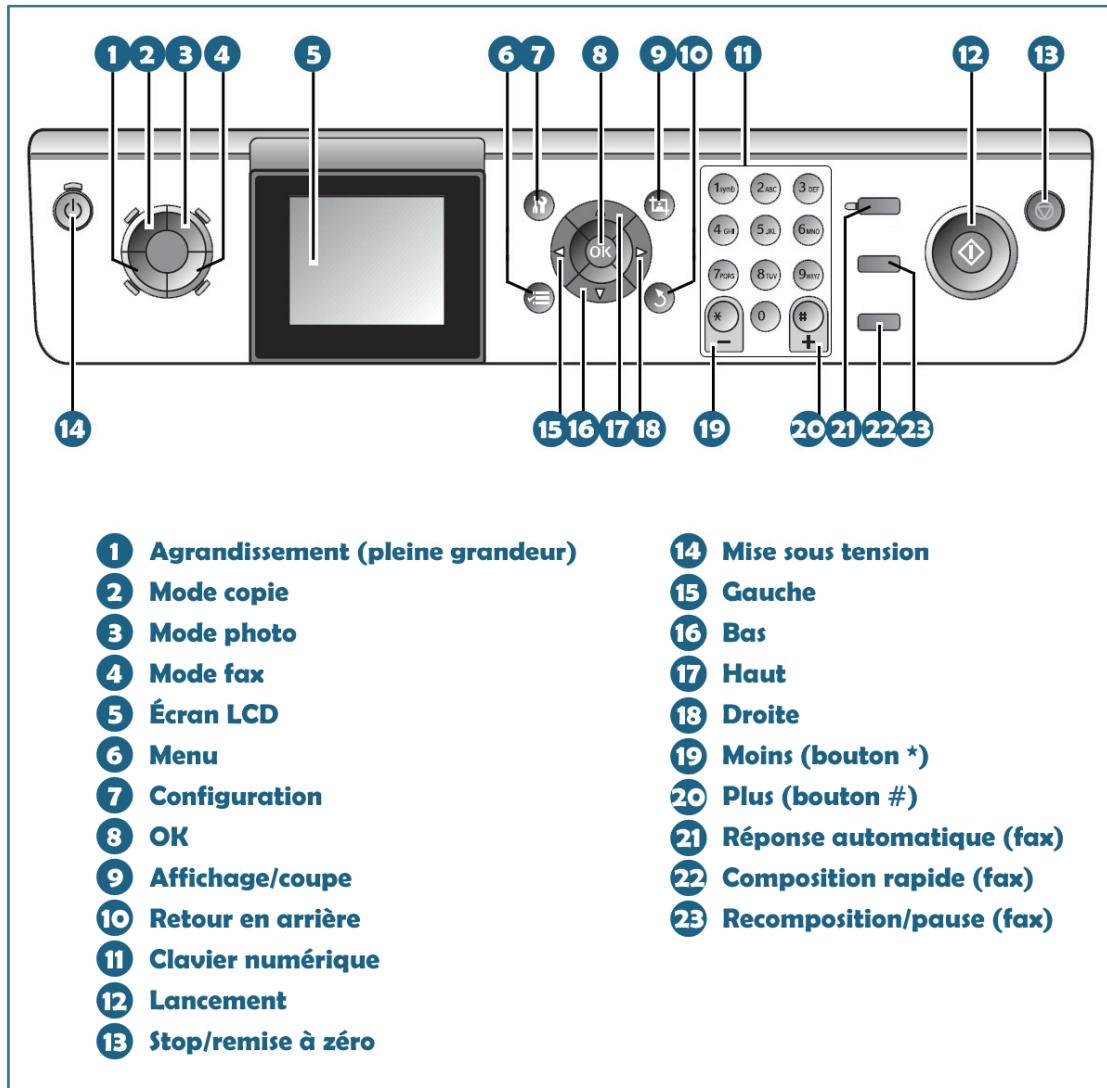


Figure 5.5 : Schéma annoté de l'interface du Epson CX9400Fax

5.4.2 Justification du choix des appareils multifonctions

Les deux appareils multifonctions ci-dessus ont été choisis car :

- ils sont aptes à supporter la tâche retenue (cf. Tableau 5.1);

- ils présentent des interfaces différentes, tant au niveau physique (forme et placement des boutons) que logique (chemin de la tâche, localisation des différentes fonctionnalités utilisées au premier ou au deuxième niveau, etc.);
- ils présentent les mêmes caractéristiques mécaniques (délai de copie et d'impression par page situé à 2 et 2.4 secondes), ce qui, en cas d'erreurs, n'introduira pas de biais significatif dans les temps mesurés pour compléter la tâche;
- ils présentent tous deux des modalités d'interactions de base, sous forme de boutons, que notre moteur peut facilement virtualiser;
- ils présentent des interfaces purement électriques (comparé, par exemple, à une chaîne stéréophonique dont les boutons pour éjecter une cassette sont mécaniques), rendant le couplage d'une interface virtuelle avec ces appareils plus aisés;
- ils présentent des interfaces de taille, faciles 1) à localiser et à remplacer (présence de nombreuses caractéristiques utilisables par nos algorithmes de détection) et 2) à étudier durant les tests utilisateurs;
- ils présentent des interfaces non pas disséminées autour de l'appareil mais bien localisées, aisées à isoler et à modifier.

5.4.3 Description des chemins pour accomplir la tâche retenue

Les chemins à suivre pour accomplir la tâche retenue, à l'aide des deux interfaces sélectionnées, sont illustrés ci-dessous (Figure 5.6 et Figure 5.7). Ces chemins

représentent les chemins optimaux pour les scénarios où aucune erreur ne serait commise par l'utilisateur. Par défaut, chaque appareil multifonction sera déjà sous tension, en mode photo. Le document à reproduire sera quant à lui déjà placé sur la glace de numérisation. Notons finalement que ces chemins devront être suivis lors de la réalisation de la tâche, que ce soit par l'intermédiaire de l'interface matérielle ou de sa contrepartie virtuelle.

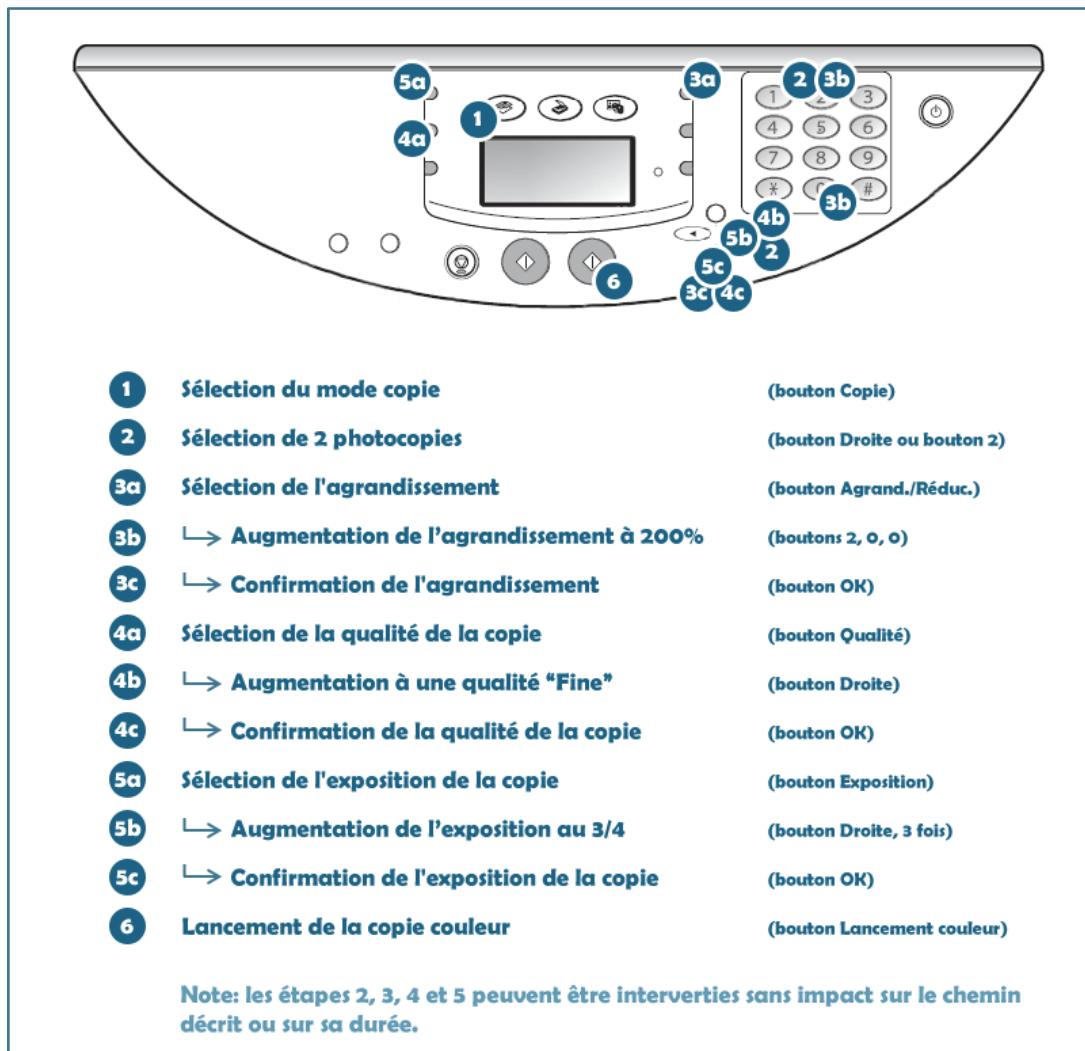


Figure 5.6 : Chemin pour réaliser la tâche demandée (Canon Pixma MP750)



Figure 5.7 : Chemin pour réaliser la tâche demandée (Epson Stylus CX9400Fax)

5.4.4 Modifications matérielles apportées à l'infrastructure

Comme aucun des deux appareils multifonctions retenus ne présentaient de méthodes de communication infrarouge, similaires à celle testée à la section 4.4.1, un ordinateur de contrôle leur fut raccordé, par connexion USB, pour jouer le rôle d'un adaptateur externe, pour l'instant peu raffiné et intégré. Cet ordinateur, auquel se connecta notre plateforme par communication sans-fil (802.11g) ad-hoc, suite à l'ajout d'une telle carte, fut utilisé comme conduit à ces deux appareils multifonctions et fut chargé :

- d'en signaler leur présence à notre plateforme;
- de transmettre à cette dernière leurs fonctionnalités (cf. section 5.4.5);
- de traduire les commandes de l'utilisateur, initialement reçues sur le réseau sans fil, et de les transmettre, par port USB, à chaque appareil connecté (cf. section 5.4.5);
- et d'obtenir l'état actuel de ces deux appareils.

En ce qui a trait à notre plateforme, la même que celle décrite lors de notre implémentation à la section 4.1 fut utilisée pour supporter les deux interfaces virtuelles mises au point (cf. section 5.4.6). Mentionnons toutefois qu'un écran de contrôle fut connecté en parallèle à sa sortie VGA, afin de dupliquer son affichage, initialement uniquement présenté à l'utilisateur dans son dispositif tête haute, pour nous permettre de juger de son progrès lors de la réalisation de la tâche face à une interface virtuelle.

5.4.5 Modifications logicielles apportées à l'infrastructure

Plusieurs ajouts logiciels ont été apportés à notre infrastructure pour relayer les requêtes de l'utilisateur aux deux appareils multifonctions retenus mais aussi pour collecter les données nécessaires à l'évaluation des interfaces proposées et des algorithmes utilisés (cf. section 5.5.4).

Conception logicielle des adaptateurs

Suite à l'introduction, du côté des appareils multifonctions, d'adaptateurs capables de recevoir les commandes de l'utilisateur mais aussi de répondre à ses requêtes, le premier ajout logiciel apporté à notre infrastructure fut la conception des deux modules requis, du côté des ordinateurs de contrôle, pour 1) assurer une communication bidirectionnelle avec notre plateforme et pour 2) contrôler les machines représentées. Comme les autres modules présentés au chapitre 4, ces deux modules, dont les fonctions sont décrites ci-dessous et le rôle est résumé à la Figure 5.9, furent programmés en langage C/C++.

Module de communication : sur le plan des échanges d'informations, un module de communication fut introduit à la frontière des adaptateurs. Ce module acquit différentes fonctionnalités réseaux en se basant sur les librairies Winsock de Microsoft Visual Studio (connexion sur sockets, assemblage, transmission et réception de messages sur réseau TCP/IP). Il fut, entre autres, chargé d'accepter toute demande de connexion de la part de notre plateforme et de répondre à ses requêtes, notamment lors de la phase d'initialisation (identification de la classe d'appartenance de l'appareil représenté, de ses

capacités et de la description géométrique de son interface matérielle). Pour supporter ce rôle, une description des fonctionnalités de chaque appareil fut mise au point, sous forme d'une énumération de variables (cf. Tableau 5.4), pouvant être restreinte à différents types et à différents intervalles ou ensembles, tout en prenant soin de ne pas suggérer ou imposer, dans ce format, une quelconque présentation de cette information (ex. : utilisation d'une description numéraire de la qualité d'impression au lieu d'une description textuelle, qui imposerait un certain formatage au niveau de l'interface virtuelle). Cette liste fut mémorisée par chaque adaptateur et transmise à la plateforme lors de l'établissement d'une connexion, pour que notre moteur puisse prendre conscience des limitations d'un appareil lors de l'initialisation d'une interface. Parallèlement à la transmission de cette liste, le module de communication fut aussi chargé de transférer, du côté client, une description géométrique de l'interface matérielle de l'appareil représenté, sous forme d'une énumération de points clés (cf. section 4.2.1), afin que le module SIFT de détection, situé du côté de la plateforme, puisse localiser cette interface, pour la remplacer par une autre, mieux adaptée à l'utilisateur. Une fois la connexion établie et cette phase d'initialisation complétée, ce même module fut chargé d'acheminer les instructions de l'utilisateur au module de contrôle, décrit ci-dessous, et de relayer à la plateforme toute réponse de la part de ce dernier (ex. : passage de l'appareil d'un état occupé à un état prêt, après avoir effectué une copie).

Tableau 5.4 : Extrait du fichier de description des capacités du Canon Pixma MP750

Variable:	STATES	{ SCAN, COPY, PHOTO }
Variable:	ZOOM	[25; 400]
Variable:	IMAGEQUALITY	[1; 3]
Variable:	EXPOSURE	[1; 9]
Variable:	COLLATE	TRUE
Variable:	2ON1	TRUE
Variable:	NBOFCOPIES	[0; 99]

Module de contrôle : ce module, hébergé du côté de nos adaptateurs, fut couplé à chacun des appareils multifonctions en recourant à leurs pilotes propriétaires, à l'interface de programmation TWAIN [83] et au pilote shimgvw.dll, responsable de l'affichage des images sous Microsoft Windows. Suite au recensement des différentes capacités supportées par chaque appareil, nous fûmes en mesure de bâtir une table de correspondances traduisant les requêtes de l'utilisateur, reçues sur le réseau sans-fil, en commandes TWAIN. Cette table, initialement localisée du côté de l'utilisateur telle que présentée à la section 4.4.1, fut transférée au module de contrôle, afin d'alléger la plateforme. Une telle migration permit à la fois de standardiser les requêtes transmises par le module de communication situé du côté de l'utilisateur, en l'empêchant de s'abaisser au niveau des appareils contrôlés, et de confier à chaque appareil la mémorisation de sa propre table, afin d'être en mesure, ultérieurement, de modifier ses capacités et ses modes de communications internes sans impact extérieur. En guise de résumé, la Figure 5.8 illustre le flot d'informations à l'intérieur de ce module et montre la traduction des requêtes de l'utilisateur et leur relais, par port USB, à l'appareil connecté, afin de mettre à jour ses paramètres (ex. : assombrissement et qualité de la

numérisation), pour ultimement lancer la numérisation et l'impression du document placé sur la glace, lors de la réception d'une commande de copie.

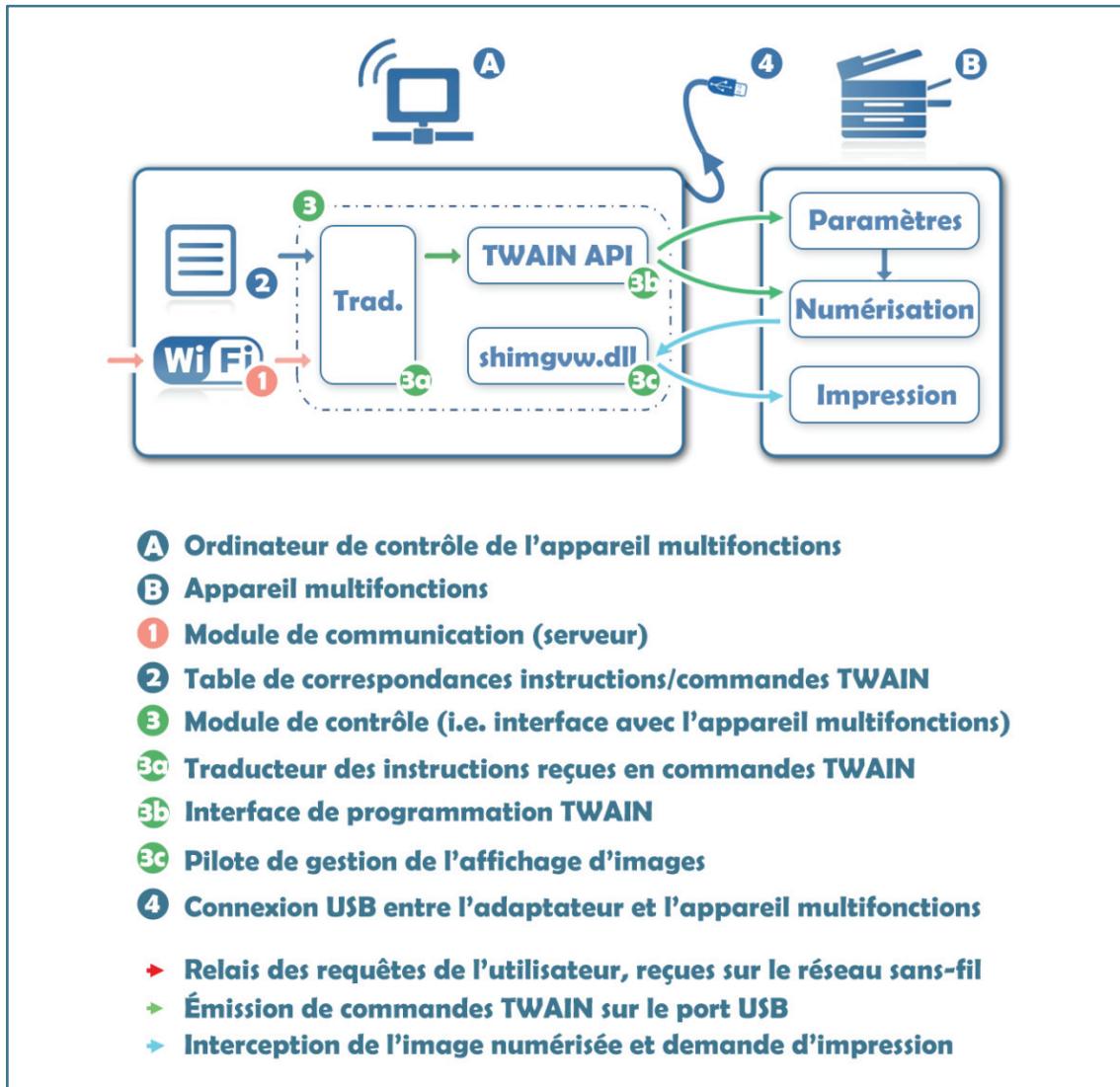


Figure 5.8 : Illustration du flux d'informations à l'intérieur du module de contrôle

Modifications apportées au module de communication de la plateforme

Le module de communication client, situé du côté de la plateforme, fut bâti par-dessus l'ancien module de communication présenté à la section 4.4.1. Comme sa contrepartie située du côté des adaptateurs, il hérita des mêmes fonctionnalités réseaux que celles décrites plus haut et fut chargé :

1. de l'initiation des communications, sur un port dédié du réseau sans-fil ad-hoc établi entre la plateforme et l'adaptateur;
2. de l'obtention de la classe d'appartenance de l'appareil représenté, de ses capacités (ex. : agrandissement supporté, capacité à imprimer en couleurs, etc.) et de la description géométrique de l'interface matérielle à remplacer, reçue sous forme de points clés;
3. du relais, à l'interne, des informations obtenues afin d'initialiser le module SIFT de détection (cf. section 4.2.1), le module de présentation des interfaces personnalisées (cf. section 4.3.2) et la machine à états (cf. section 4.3.3), en tenant compte des limitations de l'appareil et des préférences de l'utilisateur;
4. de l'initialisation de l'état de base de l'appareil, communiquée sur le réseau sans-fil, en fonction des préférences de l'utilisateur face à cette classe de machines;
5. et finalement, de la transmission des instructions de l'utilisateur, sous forme de demandes continues de mises à jour des variables obtenues au point 2 et mémorisées par la machine à états du côté de la plateforme.

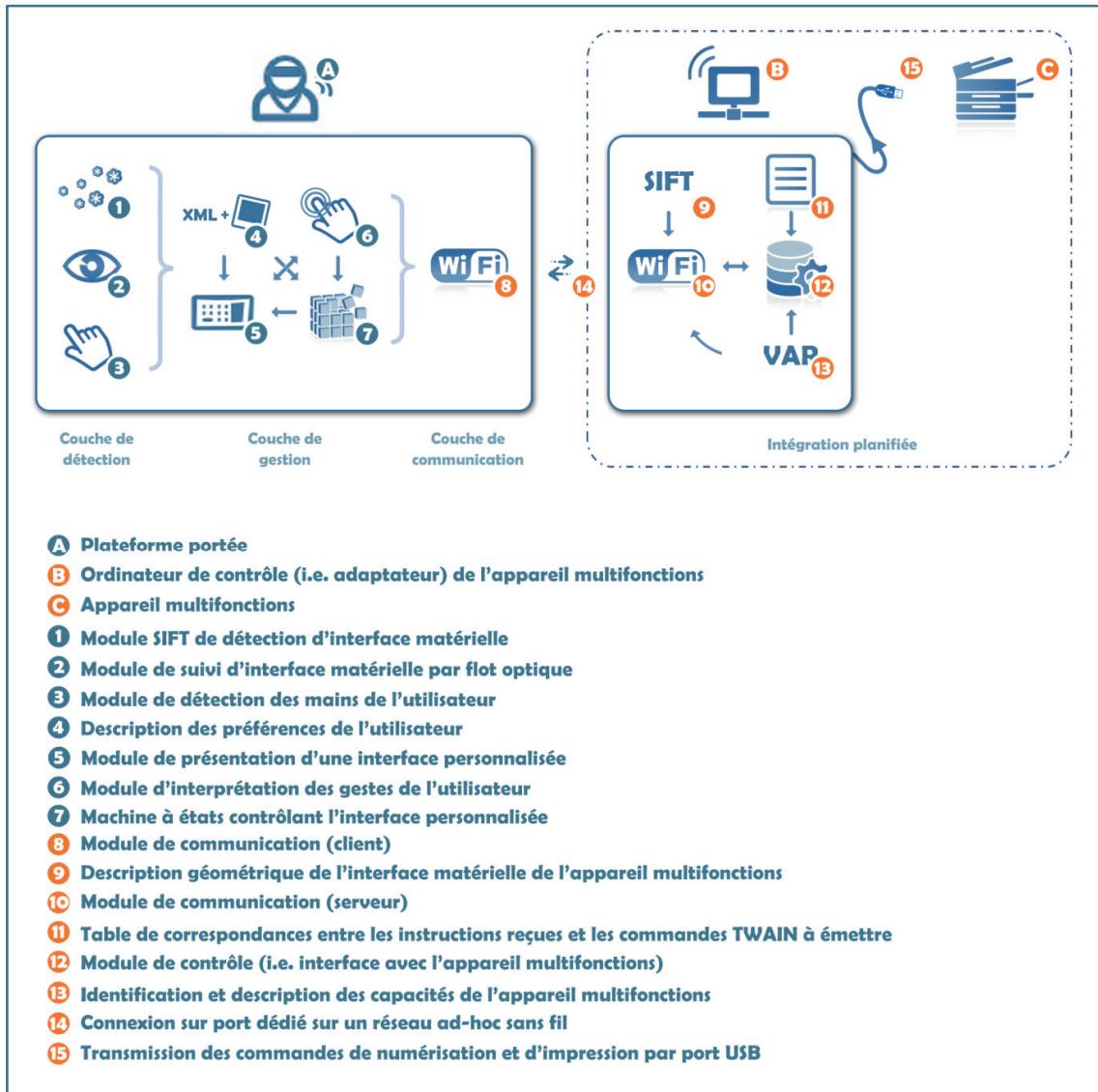


Figure 5.9 : Schématisation des modules ajoutés ou modifiés, ainsi que de leurs rôles et interactions, pour supporter les interfaces virtuelles testées

Recueil de traces durant les tests utilisateurs

Mentionnons finalement, sur le plan des ajouts logiciels, qu'une classe d'enregistrement fut intégrée à notre machine à états, afin de conserver sur fichiers une trace des séquences d'interactions entre les utilisateurs et les interfaces testées. Bien que

l'affichage de notre plateforme fut dupliqué sur un écran de contrôle sur les lieux, comme expliqué plus tôt, la sauvegarde des boutons utilisés et des marques temporelles nous semblait essentielle à une interprétation exhaustive des interfaces virtuelles proposées et à la comparaison post-expérience des résultats, notamment en ce qui a trait aux nombres d'erreurs commises, aux temps pour récupérer de ces erreurs et à l'étude des chemins pris. Notons aussi qu'une classe d'enregistrement similaire fut utilisée durant les expériences au niveau de la couche de détection, pour collecter plusieurs mesures techniques touchant à notre implémentation, afin d'évaluer la robustesse et les performances de nos algorithmes en situation réelle. Parmi celles-ci, mentionnons le recensement des pertes des interfaces identifiées par nos modules de détection et de suivi ainsi que le nombre de trames affichées par seconde (*fps*), témoin de la fluidité de notre affichage.

5.4.6 Description des interfaces virtuelles développées

Pour atteindre les trois objectifs de notre étude expérimentale, nous avons procédé à la virtualisation des interfaces des deux appareils multifonctions retenus, en prenant soin de calquer les interfaces virtuelles développées sur leurs contreparties matérielles, tant graphiquement que logiquement, comme l'exigeait notre méthodologie à la section 5.1.4. Nous identifions et illustrons ci-dessous les trois étapes par lesquelles nous sommes passés.

Identification des points clés des interfaces matérielles

Nous avons d'abord procédé à l'extraction des caractéristiques SIFT de chacune des interfaces matérielles, afin de pouvoir ultérieurement les localiser et calculer leur orientation, pour ultimement être en mesure de les remplacer par une interface familière, intégrée à l'environnement. Les figures ci-dessous (Figure 5.10 et Figure 5.11) présentent les photos sur lesquelles nous nous sommes basés pour extraire ces caractéristiques. Elles furent prises avec la même caméra que celle utilisée sur notre plateforme, afin de minimiser les différences qui auraient pu être induites par un changement de caméra (ex. : distorsions géométriques dues à la lentille). Notons que, sur ces deux images de résolution 640x182 et 640x132, 329 points clés furent retenus.

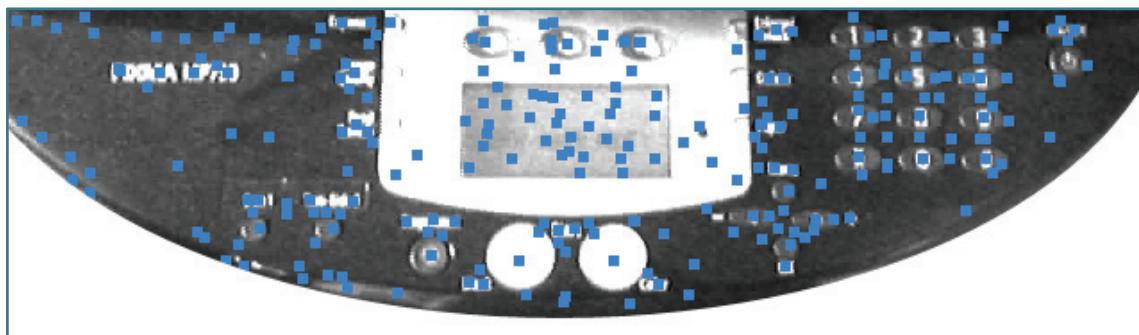


Figure 5.10 : Photo de l'interface matérielle du Canon Pixma MP750 à partir de laquelle les points clés de référence (en bleu) furent calculés pour la décrire géométriquement.

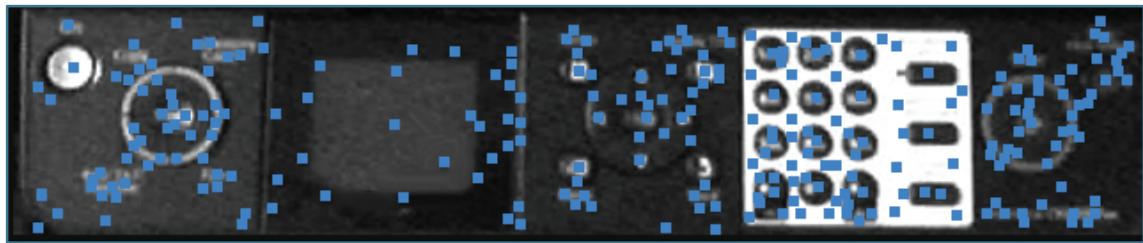


Figure 5.11 : Photo de l'interface matérielle du Epson Stylus CX9400Fax à partir de laquelle les points clés de référence (en bleu) furent calculés pour la décrire géométriquement.

Le Tableau 5.5 présente d'ailleurs un extrait des points clés de l'interface matérielle du Canon MP750. Comme expliqué à la section 5.4.5, ceux-ci furent mémorisés du côté de l'adaptateur et furent transmis à toute plateforme à proximité, en guise de description géométrique de l'interface matérielle représentée. Les figures 5.12 et 5.13 illustrent quant à elles la localisation et le calcul de l'orientation des deux interfaces retenues, sous différentes conditions, en se basant sur les mises en correspondance des points clés identifiés.

Tableau 5.5 : Extrait du fichier de description des points clés du Canon Pixma MP750

X	Y	Sigma	Theta	Descripteurs											
43.35	4.42	2.02	1.954	10	4	0	0	0	4	15	8	162	[...]		
16.11	6.05	1.89	1.768	79	22	0	0	0	0	0	3	156	[...]		
265.74	5.9	2.18	4.59	25	83	131	55	1	8	16	1	131	[...]		
589.11	6.02	2.03	1.66	1	1	0	0	0	0	0	0	138	[...]		
202.72	6.59	1.93	1.739	0	0	66	19	0	0	0	0	0	[...]		
202.72	6.59	1.93	4.457	14	0	0	9	10	0	0	3	125	[...]		



Figure 5.12 : Détection des interfaces matérielles des appareils multifonctions retenus; les points roses représentent les points clés pour lesquels une correspondance avec les caractéristiques de référence a été établie.

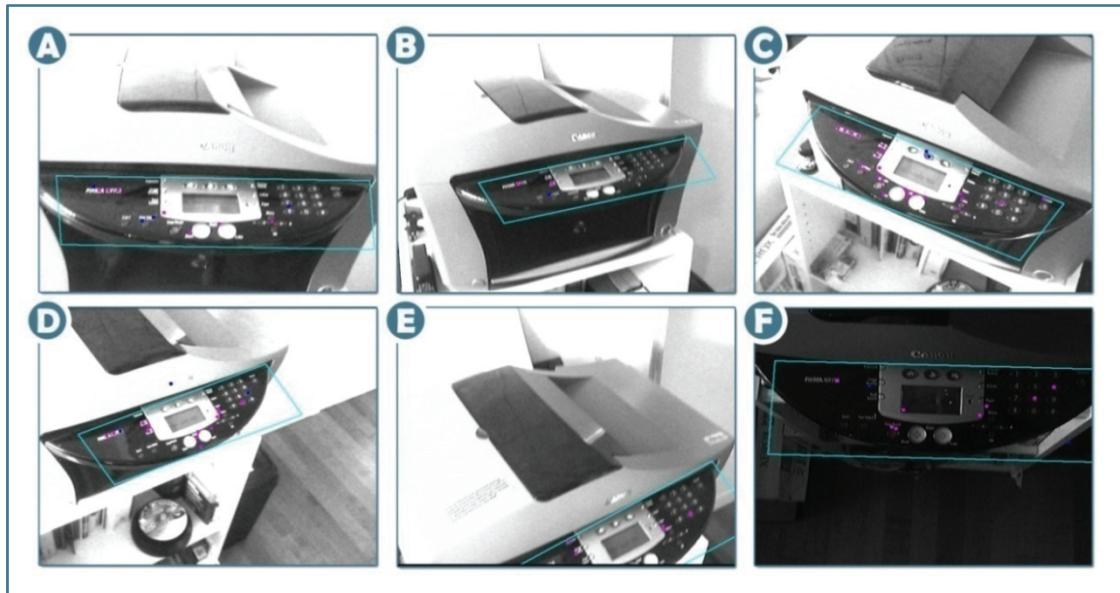


Figure 5.13 : Illustration de la localisation et du calcul de l'orientation de l'interface matérielle du Canon MP750 sous différents angles de vue (A, B, C & D), en présence d'obstruction partielle (E) et en faible éclairage (F).

Conception graphique des interfaces virtuelles et identification des composantes

Sachant maintenant localiser les interfaces matérielles d'intérêt, il nous fallut fournir à notre plateforme une description graphique des interfaces familières à utiliser pour les remplacer. Nous répliquâmes donc, dans le cadre de cette étude expérimentale et pour les raisons expliquées à la section 5.1.4, les interfaces des deux appareils retenus, incluant leurs écrans LCD, que nous présentons ci-dessous, à la Figure 5.14 et à la Figure 5.15, face à leur contrepartie matérielle. En combinant ces interfaces aux techniques de repérage énoncées aux sections 4.2.1 et 4.2.2, nous fûmes en mesure, à ce stade de la conception, de substituer entre elles les interfaces des deux appareils multifonctions, comme illustré à la Figure 5.16.



Figure 5.14 : Description graphique de l'interface virtuelle (A) calquée sur l'interface matérielle du Canon Pixma MP750 (B).



Figure 5.15 : Description graphique de l’interface virtuelle (A) calquée sur l’interface matérielle du Epson Stylus CX9400Fax (B).



Figure 5.16 : Imposition, face à un appareil Canon MP750 inconnu de l’utilisateur, d’une interface virtuelle familière calquée sur celle du Epson CX9400Fax; les images originelles situées dans les coins supérieurs droits furent rajoutées post-capture, à titre informatif.

Quant aux composantes de chacune de ces deux interfaces virtuelles, la même technique de code de couleur que celle présentée à la section 4.3.1 fut utilisée pour les isoler, afin d'être en mesure de les identifier lors des interactions et de leur attribuer un comportement précis. Cette correspondance fut mémorisée dans un fichier XML indépendant, comme celui présenté au Tableau 5.6.

Tableau 5.6 : Extrait du fichier XML décrivant les composantes du Canon MP750

```
<BUTTON>Copy<COLORCODE>0 0 23</COLORCODE></BUTTON>
<LCD>Screen<COLORCODE>0 0 24</COLORCODE></LCD>
<BUTTON>OK<COLORCODE>0 0 25</COLORCODE></BUTTON>
```

Recensement des fonctionnalités des appareils et reproduction de leur logique

Disposant maintenant d'une description graphique des deux interfaces virtuelles, il nous fallut, pour achever leur conception, leur infuser des comportements similaires à ceux recensés auprès des appareils multifonctions retenus. La mise en place de cette logique interne, mémorisée du côté de la plateforme (cf. annexe C présentant des extraits du fichier XML d'initialisation de la machine à états complète de l'interface calquée sur un appareil Epson CX9400Fax), permit à chacune de nos interfaces de répondre, de façon identique à l'appareil simulé, à chacune des commandes de l'utilisateur, qu'il s'agisse ou non d'instructions appartenant au chemin optimal de la tâche demandée. La Figure 5.17 présente ainsi différentes réponses de l'interface virtuelle calquée sur celle du Canon MP750 et imposée, par un utilisateur familier avec cette machine, à un appareil Epson CX9400Fax.

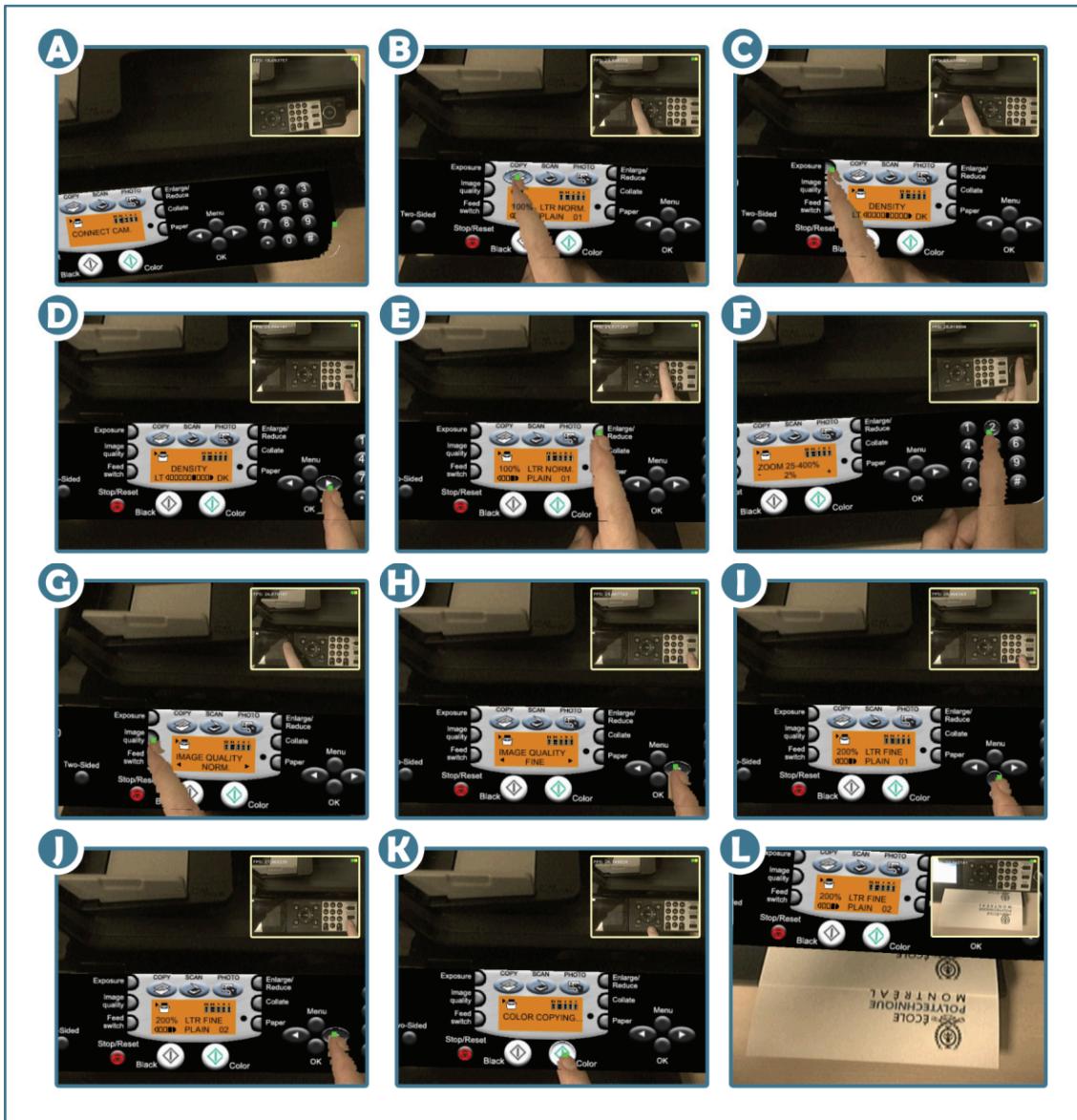


Figure 5.17 : Capture, lors de la réalisation de la tâche demandée face à un appareil Epson CX9400Fax, des réponses de l'interface virtuelle utilisée, calquée sur celle du Canon MP750; les images originelles situées dans les coins supérieurs droits furent rajoutées post-capture.

5.5 Déroulement d'une séance

La dernière section de ce chapitre se concentre sur la logistique des séances de tests. Elle décrit ainsi l'organisation de la salle d'utilisabilité et le positionnement du matériel décrit plus tôt. Elle propose aussi une décomposition horaire des séances et s'attarde sur l'uniformisation du processus de tests. Elle conclut finalement en présentant les rôles des intervenants et les mesures recueillies.

5.5.1 Organisation de la salle de tests

La Figure 5.18 ci-dessous présente, entre autres, les différentes stations qui seront utilisées dans la salle de tests soit :

- un bureau de présentation et de rédaction, où nous expliquerons au participant le contexte de l'étude et où il complétera les formulaires requis au début et à la fin des tests;
- deux bureaux de tests, où nous retrouverons les deux appareils multifonctions retenus, accompagnés de notre plateforme, représentée sur le diagramme par notre affichage tête haute, permettant d'interagir avec les deux interfaces virtuelles développées. Pour des raisons évidentes, l'interface inconnue de l'utilisateur sera cachée en tout temps, sauf lors des phases 11 et 12b ci-dessous;
- un bureau de contrôle, permettant de mettre en fonction les interfaces virtuelles, de les configurer au besoin (ex. : ajustement des paramètres de segmentation des mains de chaque utilisateur) et de superviser la progression de l'utilisateur;

- un bureau d'observation, où un assistant notera l'évolution des tests et les remarques des utilisateurs.

Notons aussi, sur ce schéma, l'utilisation de caméras proche des deux appareils multifonctions, qui nous permettront de filmer les interactions de l'utilisateur avec les deux interfaces matérielles, pour analyse post-expériences, ainsi que les deux tableaux récapitulatifs (cf. Figure 5.19), mis en place pour que chaque participant puisse rapidement se remémorer la tâche à accomplir, en cas d'oubli.

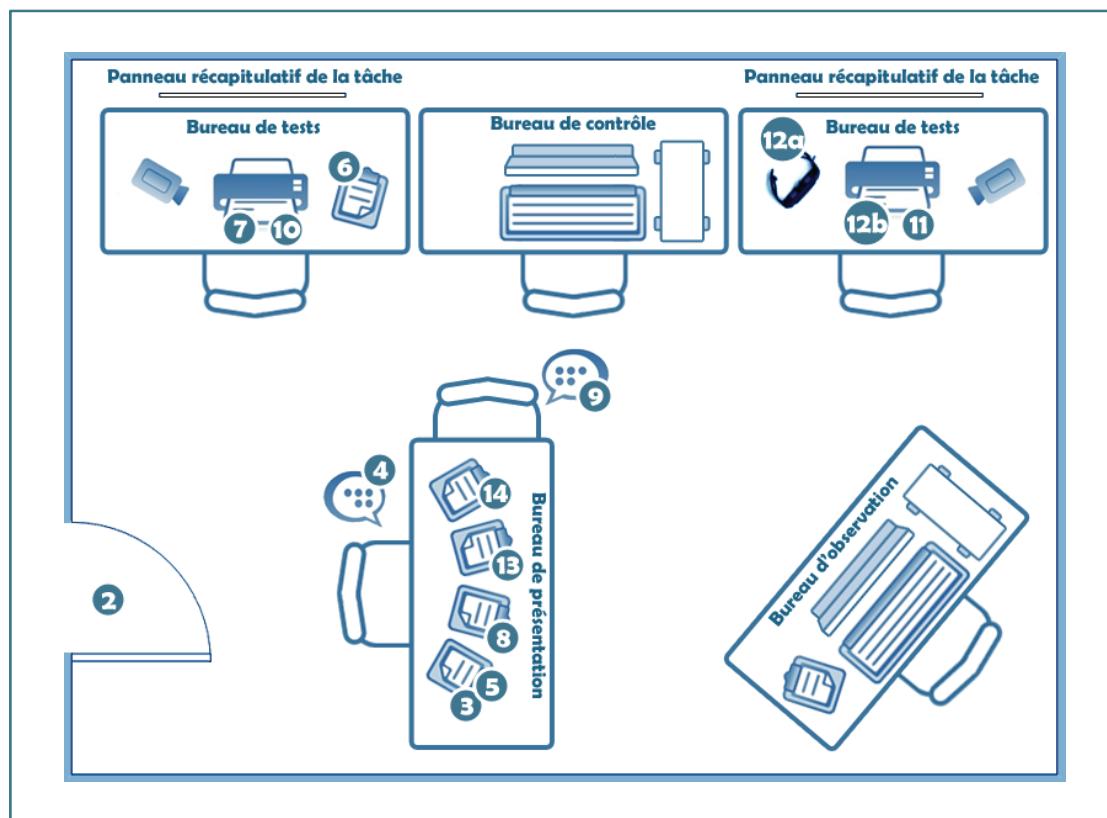


Figure 5.18 : Organisation de la salle d'utilisabilité

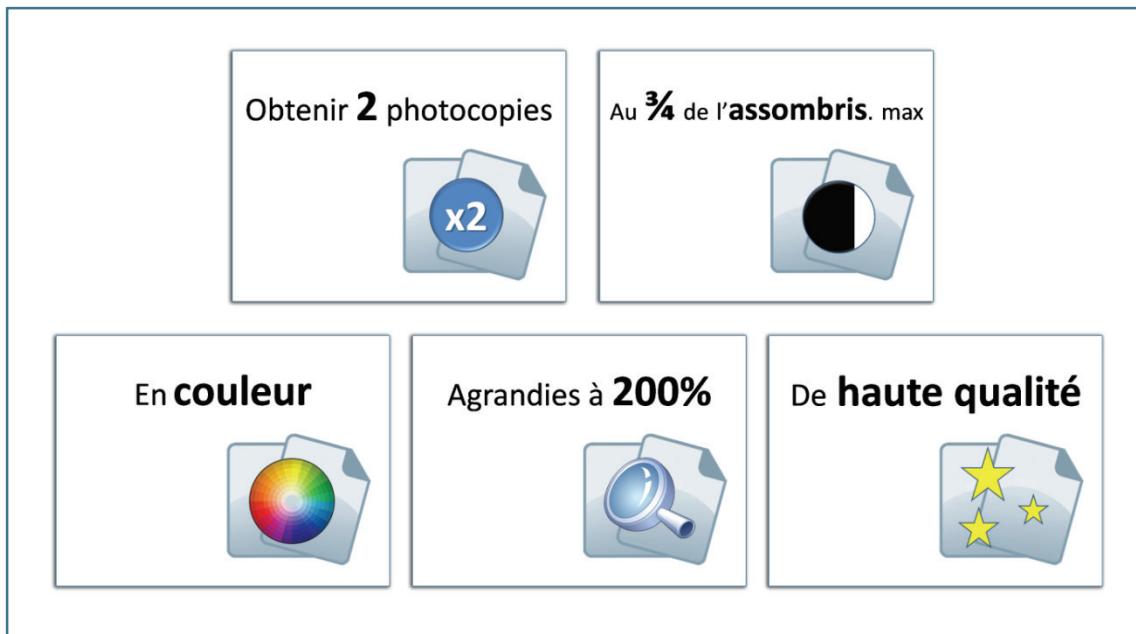


Figure 5.19 : Cartons disposés sur les tableaux récapitulatifs

5.5.2 Séance typique

La décomposition horaire d'une séance typique est spécifiée ci-dessous (cf. Tableau 5.7).

Les étapes dans ce tableau font référence aux localisations sur la Figure 5.18.

Tableau 5.7 : Décomposition horaire d'une séance de tests typique

Étape	Description de l'étape	Durée estimée
1.	Détermination aléatoire de l'interface à apprendre (interface connue) et de l'ordre des tests (phases 10, 11 et 12). Le bassin des participants sera ainsi scindé en deux groupes, l'un pour lequel l'interface du Canon Pixma MP750 sera connue, l'autre pour lequel l'interface du Epson Stylus CX9400Fax sera connue, comme expliqué dans la conception des expériences et récapitulé aux tableaux 5.9 et 5.10.	
2.	Arrivée du participant.	

Tableau 5.7 : Décomposition horaire d'une séance de tests typique (suite)

3.	Présentation du cadre de l'étude au participant ainsi que des formulaires de consentement et de divulgation des risques.	3 minutes
4.	Réponse aux questions du participant sur le but de l'étude et/ou les formulaires à remplir.	2 minutes
5.	Signature des formulaires de consentement et de divulgation des risques reliés à l'étude.	2 minutes
6.	Apprentissage de l'interface connue grâce à un guide détaillant les fonctionnalités de l'appareil (cf. Figure 5.20 et Figure 5.21).	10 minutes
7.	Soumission d'un quiz pratique pour tester la compréhension du participant de l'interface connue (cf. Tableau 5.8).	4 minutes
8.	Présentation du processus de test, des mesures recueillies, de la tâche à réaliser et dévoilement des cartons récapitulatifs.	3 minutes
9.	Réponse aux questions du participant sur la tâche à réaliser.	2 minutes
10.	Réalisation de la tâche face à l'interface connue.	2 minutes
11.	Réalisation de la tâche face à l'interface inconnue.	2 minutes
12a.	Familiarisation avec une interface de base en réalité augmentée et configuration des paramètres utilisés.	4 minutes
12b.	Réalisation de la tâche avec l'interface virtuelle, calquée sur l'interface connue, remplaçant l'interface inconnue.	2 minutes
13.	Remise du questionnaire au participant et rédaction.	15 minutes
14.	Signature de la feuille de paiement et rémunération.	1 minute
TOTAL		52 minutes

Notons que, afin d'homogénéiser les tests et introduire le moins de biais possible entre les séances, les instructions données à chaque participant seront scriptées ou remises sous format texte (ex. : tâche à accomplir, guides de familiarisation, questionnaire, etc.).

Tableau 5.8 : Quiz soumis au participant pour tester sa compréhension de l'interface connue

1. Déterminer le mode actuel de l'appareil multifonction.
2. Configurer l'appareil en mode photocopie, à la plus basse qualité d'impression.
3. Déterminer comment obtenir trois photocopies noir et blanc, à l'éclaircissement le plus élevé.
4. Déterminer comment obtenir une photocopie couleur, agrandie à 400%.

Tableau 5.9 : Participation aux tests selon le groupe d'appartenance d'un participant.

Légende - AF: avec familiarisation préalable, SF: sans familiarisation préalable.

	Groupe 1 (15 sujets)	Groupe 2 (15 sujets)
Test de l'interface du Canon Pixma MP750		AF SF
Test de l'interface du Epson Stylus CX9400Fax	SF	AF
Test de l'interface virtuelle calquée sur celle du Canon, pour commander l'appareil Epson	AF	
Test de l'interface virtuelle, calquée sur celle du Epson, pour commander l'appareil Canon		AF

- ← → Comparaisons nécessaires pour atteindre l'objectif 1 de l'étude expérimentale
 ← → Comparaisons nécessaires pour atteindre l'objectif 2 de l'étude expérimentale
 ← → Comparaisons nécessaires pour atteindre l'objectif 3 de l'étude expérimentale

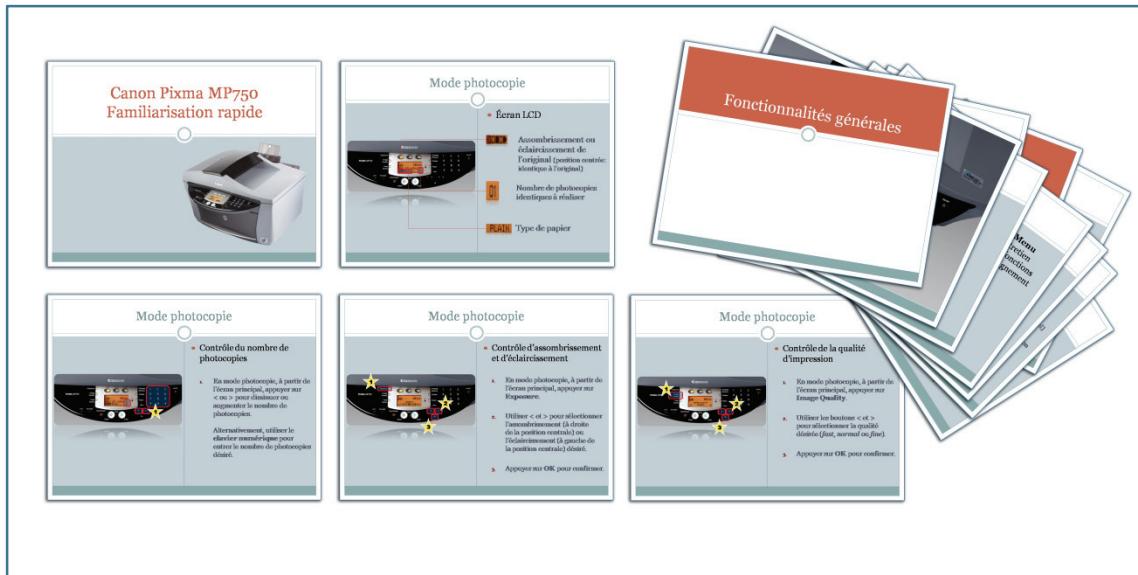


Figure 5.20 : Extrait des 24 pages du guide de familiarisation du Canon Pixma MP750



Figure 5.21 : Extrait des 23 pages du guide de familiarisation du Epson CX9400Fax

Tableau 5.10 : Compte des ordres des expériences

	Interface connue testée en			Interface inconnue testée en			Interface virtuelle testée en		
	1 ^{er}	2 ^{ième}	3 ^{ième}	1 ^{er}	2 ^{ième}	3 ^{ième}	1 ^{er}	2 ^{ième}	3 ^{ième}
Groupe 1	6	5	4	4	5	6	5	5	5
Groupe 2	5	4	6	5	6	4	5	5	5
Total	11	9	10	9	10	10	10	10	10

5.5.3 Processus de tests et rôle des responsables

Comme indiqué plus tôt, le processus de tests a été uniformisé en ayant recours le plus possible à des instructions scriptées ou remises directement sous format texte. Suite aux énoncés, chaque participant pourra clarifier les points nébuleux durant les périodes pré-déterminées de questions; il leur sera toutefois mentionné qu'aucune réponse ou aide ne sera fournie durant la réalisation des tâches.

Outre accueillir chaque participant, le rôle du responsable des tests sera:

- de guider le participant d'une station de tests à l'autre;
- de lui présenter les textes fournis, notamment pour simuler l'apprentissage de l'interface connue;
- de répondre aux questions du participant, durant les périodes de questions et de familiarisation avec le matériel;
- de chronométrer les participants;
- d'approuver ou de désapprouver l'atteinte des résultats demandés lors des tâches;
- de recueillir les formulaires et questionnaires complétés;

- de rémunérer le participant à la fin de la séance.

Le rôle de l'assistant lors des tests sera:

- de replacer le matériel pour la prochaine séance de tests;
- de contrôler les caméras filmant les interactions entre le participant et les interfaces;
- de recueillir les impressions des participants, énoncées à voix haute lors des tests.

5.5.4 Mesures recueillies

Différentes mesures, tant quantitatives que qualitatives, seront recueillies tout au cours des séances de tests, soit:

- un résumé des connaissances préalables des participants sur les appareils multifonctions choisis, leur profil, ainsi que leur domaine d'études et leur familiarité avec les domaines de l'informatique, sous forme de questionnaire (cf. annexe B);
- le temps total pris pour compléter la tâche, pour comparer les interfaces connues entre elles, déterminer laquelle est la plus facile à apprendre lorsqu'inconnue et positionner l'interface virtuelle par rapport aux interfaces matérielles, pour la tâche retenue;
- le nombre d'erreurs commises par les utilisateurs lors de la réalisation de chaque tâche, pour 1) déterminer si une interface matérielle est plus facile à utiliser

qu'une autre, si elle est connue ou inconnue de l'utilisateur, et 2) évaluer la technologie utilisée pour répliquer une interface matérielle de manière virtuelle;

- le nombre d'erreurs commises par les algorithmes lors de la détection des interfaces recherchées, pour quantifier leur robustesse;
- les chemins empruntés pour accomplir la tâche, recueillis sous forme vidéo pour les interfaces matérielles et sous forme de fichiers de traces pour les interfaces virtuelles;
- les commentaires émis à voix haute par les utilisateurs, consignés soit sur papier (en dehors des tests) ou sur fichiers sonores (durant les tests);
- les remarques des utilisateurs et leurs impressions sur les interfaces utilisées, leur charge mentale perçue durant les tests et leur perception du concept d'interfaces virtuelles, consignées dans les questionnaires (cf. annexe B), tant sous forme numérique (échelles de Likert) que textuelle (réponses à développement).

CHAPITRE 6 : RÉSULTATS DE L'ÉTUDE

EXPÉRIMENTALE ET DISCUSSION

Ce sixième chapitre présente les données collectées durant notre étude expérimentale, que nous analyserons afin de positionner notre paradigme par rapport aux paradigmes d'interactions humain-machine actuels. Nous nous attarderons sur l'étude de la satisfaction des utilisateurs, sur leur perception du concept proposé, sur le temps et les chemins pris pour compléter la tâche demandée, sur les erreurs commises et ce, tant face aux interfaces virtuelles que face à leur contrepartie matérielle. En résumé, nous atteindrons ici le dernier objectif spécifique de la thèse (cf. section 3.3.2), en précisant les avantages et les limites des interfaces virtuelles, telles qu'implémentées.

6.1 Notes préliminaires

Nous exposons dans cette section différentes précisions quant à la présentation des résultats obtenus et à leurs analyses statistiques.

6.1.1 Échelles de Likert

Les réponses aux énoncés de Likert proposés dans le questionnaire (cf. annexe B) seront étudiées comme des mesures ordinaires, que nous résumerons, dans la plupart des cas, sous forme d'histogrammes et que nous comparerons, entre les groupes de participants, grâce aux techniques non paramétriques anticipées lors de l'élaboration des expériences (cf. section 5.3.4). Nous prendrons toutefois la liberté de rapporter, en plus de la médiane $Méd$ des réponses à chaque énoncé, leur moyenne μ et leur écart-type σ , et ce, même si ces réponses ne constituent pas des variables intervalles continues. Nous estimerons qu'elles s'en rapprochent dans notre analyse, en supposant que les cinq niveaux de l'échelle utilisée furent perçus par les participants comme équidistants. En tolérant cette approximation, nous pourrons résumer la distribution des réponses des sujets et cristalliser, grâce à leur moyenne, l'opinion de chacun des groupes de participants. L'écart-type sera quant à lui utilisé pour juger de la consistance des réponses à un énoncé. Nous considérerons ainsi, sur l'échelle à cinq catégories utilisée, la présence d'une consistance dans les réponses pour un σ inférieur ou égal à 1, d'une inconsistance pour un σ supérieur à 1 et d'une polarisation pour un σ tendant vers 2.

6.1.2 Significativité statistique

Le seuil de significativité statistique α que nous utiliserons dans l'analyse de nos résultats sera fixé au seuil usuel de 5%. Nous considérerons ainsi tout niveau de probabilité p inférieur à ce seuil, nous permettant de rejeter une hypothèse nulle, comme statistiquement significatif. Tout niveau p inférieur à 0.01 sera considéré comme très

significatif et tout niveau p inférieur à 0.001 sera considéré comme hautement significatif. Pour les repérer aisément, tous les résultats significatifs seront mis en relief dans les tableaux présentés.

6.1.3 Erreurs commises lors de la réalisation de la tâche

Définition d'une erreur

Nous avons défini comme une erreur l'activation, sur les interfaces testées, d'une composante 1) ne faisant pas partie des composantes permettant de progresser dans l'exécution de la tâche au moment de son activation ou 2) ne permettant pas de récupérer de l'erreur courante. Nous avons ainsi comptabilisé comme une erreur le fait :

- de sélectionner une option ou de s'engouffrer dans un sous-menu ne faisant pas partie des sous-menus utiles à la tâche;
- de lancer le processus de photocopie sans l'avoir configuré comme demandé;
- de sortir d'un menu utile sans avoir fixé les paramètres requis, que ce soit par oubli de les confirmer ou parce qu'ils ne furent pas perçus parmi les choix proposés.

Mentionnons finalement que nous n'avons en aucun cas regroupé deux erreurs identiques en une seule (ex. : resélection d'un sous-menu jugé inutile, pour se réassurer de son inutilité dans l'accomplissement de la tâche).

Tolérance des erreurs

Nous n'avons toutefois pas comptabilisé comme une erreur le fait de parcourir un menu de même niveau à la recherche de l'option désirée ni le fait de dépasser une option ou un critère (ex. : augmentation d'un niveau de trop lors de la configuration de l'assombrissement), en autant que ce dernier n'ait pas été validé. Nous avons aussi toléré la récapitulation des requis de la tâche, en autant que cette récapitulation n'impliquait que les options et menus permettant de vérifier l'atteinte de ces requis; tout faux pas commis durant une telle récapitulation fut comptabilisé comme une erreur. Précisions finalement que nous ne nous intéressions pas, au niveau des erreurs, au recours aux chemins optimaux identifiés à la Figure 5.6 et à la Figure 5.7; tout chemin sans erreur permettant d'accomplir la tâche demandée fut toléré.

6.1.4 Désignation des groupes

Les deux groupes auxquels nous faisons référence dans les prochaines sections désignent ceux présentés au Tableau 5.9. Le premier groupe fait ainsi référence aux utilisateurs :

- s'étant familiarisés avec l'interface du Canon Pixma MP750;
- ayant accompli la tâche demandée face à l'interface du Canon Pixma MP750 sous forme matérielle et virtuelle;
- et ayant tenté de réaliser cette même tâche face à l'appareil Epson Stylus CX9400Fax sans familiarisation préalable.

Quant au second groupe, il fait référence aux utilisateurs :

- s'étant familiarisés avec l'interface du Epson Stylus CX9400Fax;
- ayant accompli la tâche demandée face à l'interface du Epson Stylus CX9400Fax sous forme matérielle et virtuelle;
- et ayant tenté de réaliser cette même tâche face à l'appareil Canon Pixma MP750 sans familiarisation préalable.

6.1.5 Rejet des participants familiers avec les interfaces inconnues

Pour ne pas biaiser les résultats de l'expérience, exigeant qu'aucune pré-connaissance significative des interfaces inconnues ne soit tolérée, nous avons rejeté de nos deux groupes tous les participants ayant indiqué être « d'accord » (4) ou « fortement d'accord » (5) avec l'énoncé de la question [Q20] du questionnaire : « *Cette interface ressemble à une interface que j'utilise régulièrement* ». Nous avons ainsi rejeté quatre candidats au total, soit un du premier groupe et trois du second groupe. Les résultats présentés ci-dessous se basent donc, sauf indication contraire, sur ces groupes élagués.

6.1.6 Courbes d'apprentissage

Les courbes d'apprentissage présentées aux sections 6.4.4 et 6.5.4 ont été obtenues par régression, en se basant sur la loi de la pratique (*Power law of practice*), investiguée entre autres par Snoddy (1926), et exprimée par :

$$T_n = T_1 n^{-\alpha}$$

où T_n représente le temps d'exécution de la tâche à l'itération n et où α représente son coefficient d'apprentissage. Pour approximer ces courbes, nous nous sommes basés sur les temps recueillis auprès des sept derniers participants surnuméraires (sujets 31 à 37), qui durent se familiariser avec les deux appareils retenus, pour accomplir cinq répétitions de la tâche demandée face à chacune des quatre interfaces proposées (cf. Tableau 6.1). Les temps des 30 premiers participants, face aux interfaces connues, tant matérielles que virtuelles, furent utilisés pour mieux approximer l'origine des courbes.

Tableau 6.1 : Ordre des expériences effectuées par les participants surnuméraires

	Interface testée en			
	1er	2ème	3ème	4ème
Sujet 31	Epson virtuelle	Canon virtuelle	Epson matérielle	Canon matérielle
Sujet 32	Epson virtuelle	Canon matérielle	Epson matérielle	Canon virtuelle
Sujet 33	Epson matérielle	Canon virtuelle	Epson virtuelle	Canon matérielle
Sujet 34	Epson matérielle	Canon matérielle	Epson virtuelle	Canon virtuelle
Sujet 35	Canon matérielle	Epson virtuelle	Canon virtuelle	Epson matérielle
Sujet 36	Canon matérielle	Epson matérielle	Canon virtuelle	Epson virtuelle
Sujet 37	Canon virtuelle	Epson virtuelle	Canon matérielle	Epson matérielle

6.2 Profil des participants

Nous présentons, à la Figure 6.1 et à la Figure 6.2 ci-dessous, le profil des participants faisant partie du premier et du deuxième groupe. Ces profils furent collectés grâce aux questions [Q1] à [Q8] du questionnaire joint à l'annexe B.

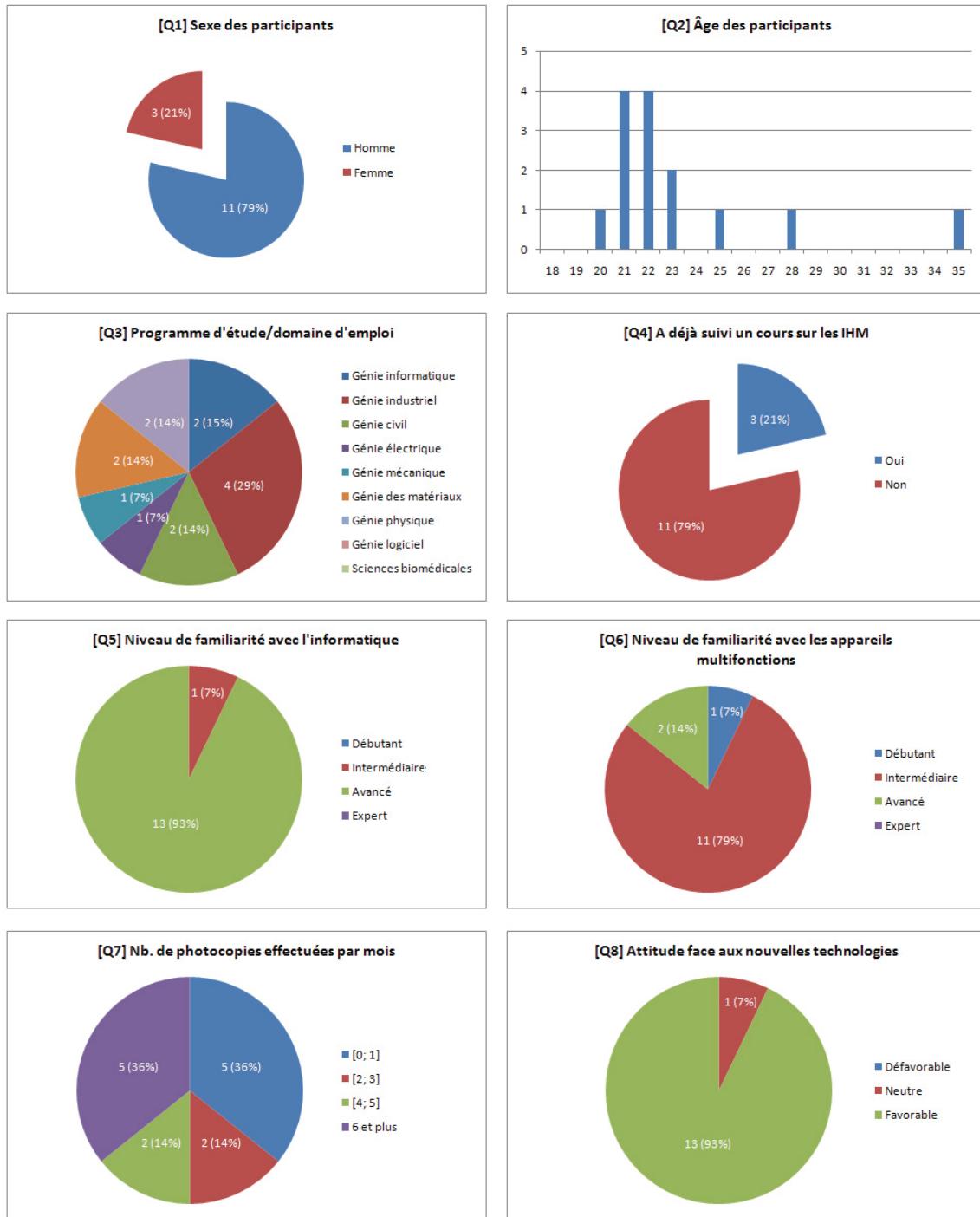


Figure 6.1 : Profil des participants appartenant au premier groupe

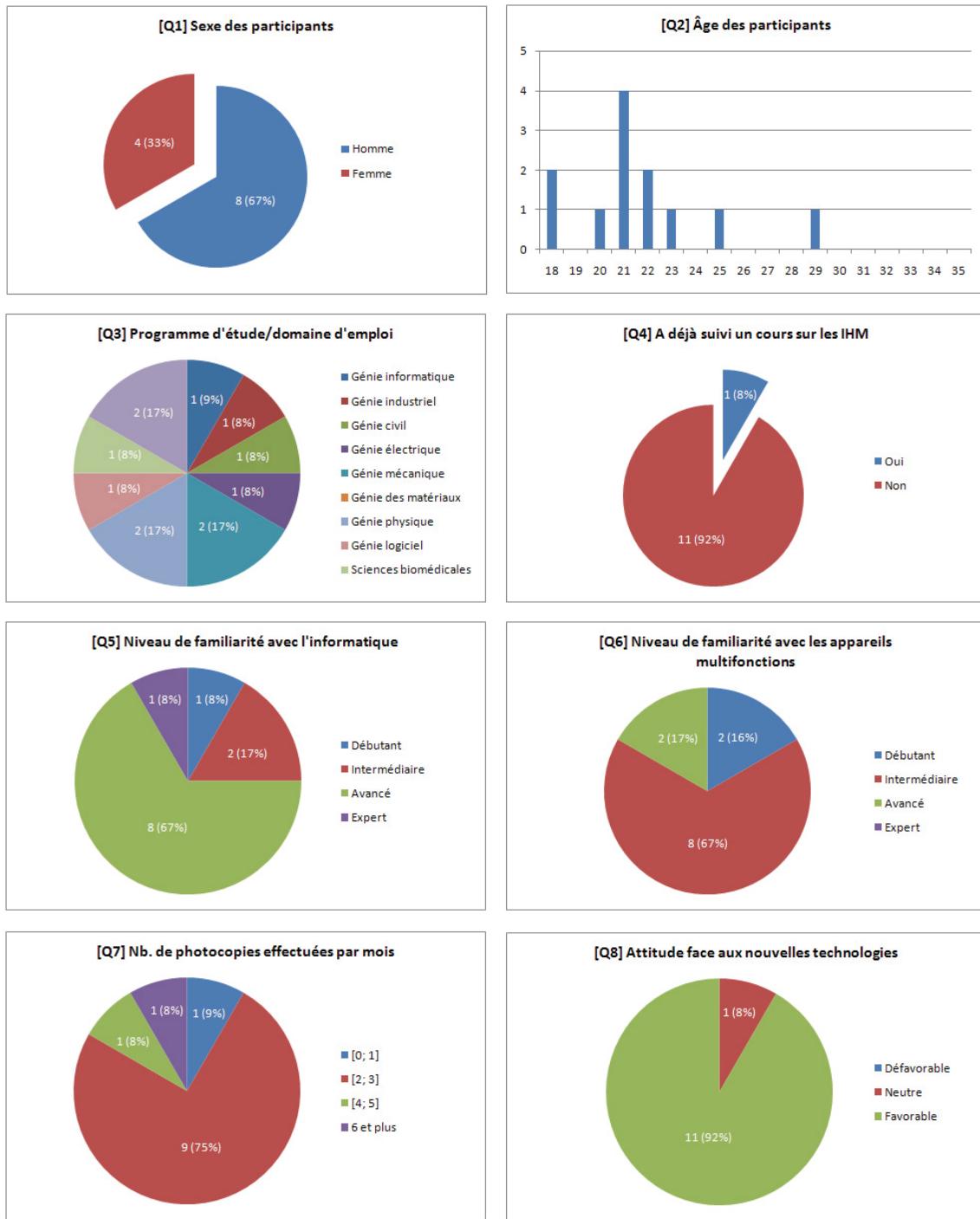


Figure 6.2 : Profil des participants appartenant au second groupe

6.3 Comparaison des deux groupes de participants

Nous comparons, au Tableau 6.2, la significativité statistique des différences entre les profils des deux groupes créés, afin de nous assurer qu'aucun biais significatif n'ait été introduit lors de la répartition aléatoire des sujets. Nous nous intéressons principalement aux réponses aux questions [Q4] à [Q8], qui pourraient nous indiquer si un groupe était prédisposé à réaliser la tâche demandée avec plus de facilité. Pour ce faire, nous avons eu recours à des tests non paramétriques de Mann-Whitney, étant donné que les variables comparées sont ordinaires. Ces tests sont utilisés pour tenter à chaque fois de rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle les réponses données par les deux groupes proviennent d'une même population.

Tableau 6.2 : Études de la significativité statistique des différences entre les aptitudes

des deux groupes créés

	Mann-Whitney		
	U	Z	p
[Q4-Q4] Différence entre l'assistance à un cours humain-machine.	73.000	-0.905	0.366
[Q5-Q5] Différence entre les niveaux de familiarité avec l'informatique.	75.000	-0.674	0.501
[Q6-Q6] Différence entre les niveaux de familiarité avec les appareils multifonctions.	79.000	-0.331	0.741
[Q7-Q7] Différence entre les nombres de photocopies effectuées par mois.	76.000	-0.434	0.664
[Q8-Q8] Différence entre les attitudes face aux nouvelles technologies.	83.000	-0.111	0.911

Comme aucun des tests de Mann-Whitney ne nous permet, avec certitude, de rejeter l'hypothèse nulle ($p >> 0.05$), nous sommes forcés de conclure que les deux groupes créés sont issus de la même population et qu'aucun ne présente d'aptitudes significativement plus fortes pour réaliser la tâche demandée. Nous pourrons donc conclure, à partir de ce point, que toutes les différences observées lors de l'exécution de la tâche seront issues des interfaces utilisées.

6.4 Résultats obtenus face à l'interface du Canon Pixma MP750

Cette section présente les données collectées face à l'interface du Canon Pixma MP750, lorsque connue, inconnue et répliquée virtuellement. Nous présentons aussi, dans une quatrième sous-section, les courbes d'apprentissage face à cette interface.

6.4.1 Résultats obtenus face à l'interface connue

Mesures objectives

Nous présentons, au Tableau 6.3, les statistiques descriptives du temps d'exécution de la tâche et du nombre d'erreurs commises, telles que comptabilisées à la section 6.1.3.

Tableau 6.3 : Temps d'exécution et nb. d'erreurs commises (interface Canon connue)

	Minimum	Maximum	μ	σ
[TCC] Temps d'exécution (sec.)	27	83	47.57	16.13
[ECC] Nb. d'erreurs commises	0	3	0.941	0.50

Mesures subjectives

Le Tableau 6.4 présente la distribution des réponses aux énoncés de Likert [Q9] à [Q19].

À titre informatif, la médiane des réponses à chaque énoncé est aussi présentée, ainsi que la moyenne et l'écart type. Le Tableau 6.5 résume quant à lui la charge mentale [Q45a], physique [Q46a] et l'effort moyen déployé [Q47a], tels que perçus par l'utilisateur lors des interactions avec l'interface connue du Canon MP750.

Tableau 6.4 : Réponses aux énoncés de Likert [Q9] à [Q19] (interface Canon connue)

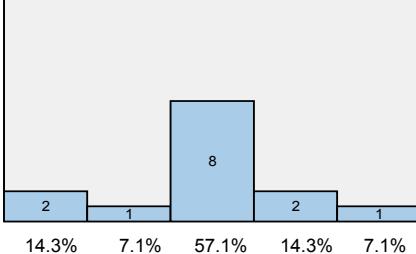
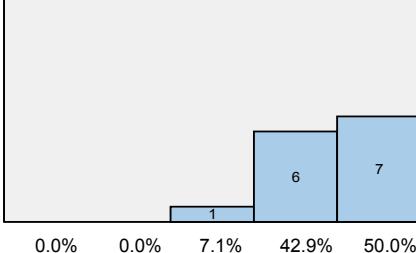
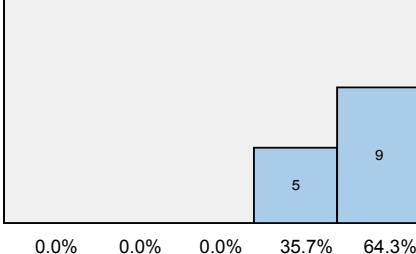
	Distribution des réponses (de 1: fortement en désaccord à 5: fortement d'accord)					Méd.	μ	σ	
	1	2	3	4	5				
[Q9] Cette interface ressemble à une interface que j'utilise régulièrement.		2	1	8	2	1	3.00	2.93	1.072
[Q10] Il a été facile de réaliser la tâche.		1	6	7		4.50	4.43	0.646	
[Q11] Le fonctionnement de l'interface a été facile à apprendre / comprendre.		5	9			5.00	4.64	0.497	

Tableau 6.4 : Réponses aux énoncés de Likert [Q9] à [Q19]

(interface Canon connue, suite)

[Q12] L'interface est efficace (i.e. permet de réaliser adéquatement la tâche).	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point Likert</th> <th>Nombre de répondants</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>4</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>10</td> <td>71.4%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Point Likert	Nombre de répondants	Pourcentage	1	4	0.0%	2	10	71.4%	3	0	0.0%	4	0	0.0%	5	0	0.0%	5.00	4.71	0.469
Point Likert	Nombre de répondants	Pourcentage																				
1	4	0.0%																				
2	10	71.4%																				
3	0	0.0%																				
4	0	0.0%																				
5	0	0.0%																				
[Q13] L'interface est efficiente (i.e. permet de réaliser la tâche avec un minimum d'effort).	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point Likert</th> <th>Nombre de répondants</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>7.1%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>2</td> <td>14.3%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>11</td> <td>78.6%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Point Likert	Nombre de répondants	Pourcentage	1	1	7.1%	2	2	14.3%	3	11	78.6%	4	0	0.0%	5	0	0.0%	4.00	4.07	0.475
Point Likert	Nombre de répondants	Pourcentage																				
1	1	7.1%																				
2	2	14.3%																				
3	11	78.6%																				
4	0	0.0%																				
5	0	0.0%																				
[Q14] L'interface est plaisante à utiliser.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point Likert</th> <th>Nombre de répondants</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>14.3%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>8</td> <td>57.1%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>4</td> <td>28.6%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Point Likert	Nombre de répondants	Pourcentage	1	2	14.3%	2	8	57.1%	3	4	28.6%	4	0	0.0%	5	0	0.0%	4.00	4.14	0.663
Point Likert	Nombre de répondants	Pourcentage																				
1	2	14.3%																				
2	8	57.1%																				
3	4	28.6%																				
4	0	0.0%																				
5	0	0.0%																				
[Q15] L'interface répond à mes attentes.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point Likert</th> <th>Nombre de répondants</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>11</td> <td>78.6%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>3</td> <td>21.4%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Point Likert	Nombre de répondants	Pourcentage	1	11	78.6%	2	3	21.4%	3	0	0.0%	4	0	0.0%	5	0	0.0%	4.00	4.21	0.426
Point Likert	Nombre de répondants	Pourcentage																				
1	11	78.6%																				
2	3	21.4%																				
3	0	0.0%																				
4	0	0.0%																				
5	0	0.0%																				
[Q16] L'effort requis pour interagir avec l'interface est important.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point Likert</th> <th>Nombre de répondants</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>7.1%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>3</td> <td>21.4%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>7</td> <td>50.0%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>3</td> <td>21.4%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>3</td> <td>21.4%</td> </tr> </tbody> </table>	Point Likert	Nombre de répondants	Pourcentage	1	1	7.1%	2	3	21.4%	3	7	50.0%	4	3	21.4%	5	3	21.4%	2.00	2.14	0.864
Point Likert	Nombre de répondants	Pourcentage																				
1	1	7.1%																				
2	3	21.4%																				
3	7	50.0%																				
4	3	21.4%																				
5	3	21.4%																				

Tableau 6.4 : Réponses aux énoncés de Likert [Q9] à [Q19]

(interface Canon connue, suite)

[Q17] Je suis insatisfait de ma performance.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>4</td> <td>28.6%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>10</td> <td>71.4%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage	1	4	28.6%	2	10	71.4%	3	0	0.0%	4	0	0.0%	5	0	0.0%	2.00	1.71	0.469
Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage																				
1	4	28.6%																				
2	10	71.4%																				
3	0	0.0%																				
4	0	0.0%																				
5	0	0.0%																				
[Q18] Avec de l'entraînement face à cette interface, je pourrais réaliser la tâche plus rapidement.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>2</td> <td>14.3%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0</td> <td>14.3%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>7</td> <td>50.0%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>3</td> <td>21.4%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage	1	2	0.0%	2	2	14.3%	3	0	14.3%	4	7	50.0%	5	3	21.4%	4.00	3.79	0.975
Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage																				
1	2	0.0%																				
2	2	14.3%																				
3	0	14.3%																				
4	7	50.0%																				
5	3	21.4%																				
[Q19] Avec de l'entraînement face à cette interface, je pourrais réaliser la tâche avec moins d'effort.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>1</td> <td>7.1%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0</td> <td>7.1%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>9</td> <td>64.3%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>3</td> <td>21.4%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage	1	1	0.0%	2	1	7.1%	3	0	7.1%	4	9	64.3%	5	3	21.4%	4.00	4.00	0.784
Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage																				
1	1	0.0%																				
2	1	7.1%																				
3	0	7.1%																				
4	9	64.3%																				
5	3	21.4%																				

Tableau 6.5 : Charges perçues et effort moyen déployé (interface Canon connue)

	Minimum	Maximum	μ	σ
[Q45a] Charge mentale (en pourcentage)	24.19	77.42	49.95	16.45
[Q46a] Charge physique (en pourcentage)	14.52	59.68	25.63	11.50
[Q47a] Effort moyen (en pourcentage)	6.45	90.32	34.33	25.40

6.4.2 Résultats obtenus face à l'interface inconnue

Mesures objectives

Nous présentons, au Tableau 6.6, les statistiques descriptives du temps d'exécution de la tâche et du nombre d'erreurs commises, telles que comptabilisées à la section 6.1.3.

Tableau 6.6 : Temps d'exécution et nb. d'erreurs commises (interface Canon inconnue)

	Minimum	Maximum	μ	σ
[TCI] Temps d'exécution (sec.)	47	124	86.75	23.99
[ECI] Nb. d'erreurs commises	1	6	3.25	1.36

Mesures subjectives

Le Tableau 6.7 présente la distribution des réponses aux énoncés de Likert [Q20] à [Q30]. À titre informatif, la médiane des réponses à chaque énoncé est aussi présentée, ainsi que la moyenne et l'écart type. Le Tableau 6.8 résume quant à lui la charge mentale [Q45b], physique [Q46b] et l'effort moyen déployé [Q47b], tels que perçus par l'utilisateur lors des interactions avec l'interface inconnue du Canon MP750.

Tableau 6.7 : Réponses aux énoncés de Likert [Q20] à [Q30] (interface Canon inconnue)

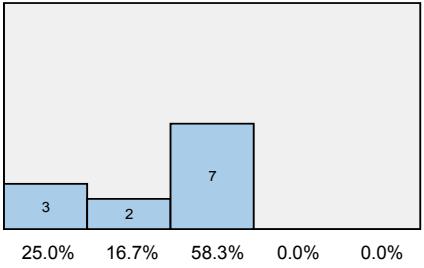
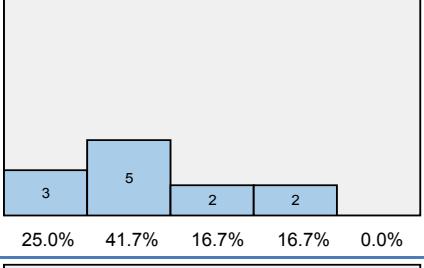
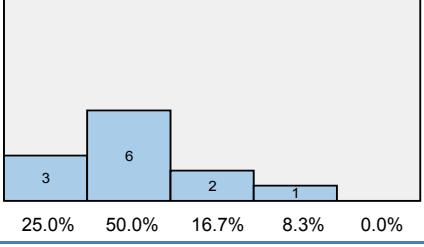
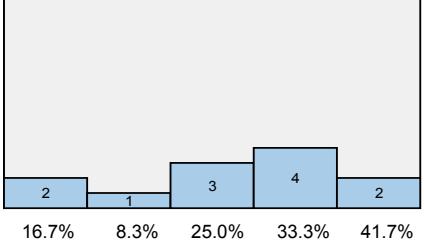
	Distribution des réponses (de 1: fortement en désaccord à 5: fortement d'accord)	1	2	3	4	5	Méd.	μ	σ
[Q20] Cette interface ressemble à une interface que j'utilise régulièrement.		3	2	7	0.0%	0.0%	3.00	2.33	0.89
[Q21] Il a été facile de réaliser la tâche.		3	5	2	2	0.0%	2.00	2.25	1.06
[Q22] Le fonctionnement de l'interface a été facile à apprendre / comprendre.		3	6	2	1	0.0%	2.00	2.08	0.90
[Q23] L'interface est efficace (i.e. permet de réaliser adéquatement la tâche).		2	1	3	4	2	3.50	3.25	1.36

Tableau 6.7 : Réponses aux énoncés de Likert [Q20] à [Q30]

(interface Canon inconnue, suite)

[Q24] L'interface est efficiente (i.e. permet de réaliser la tâche avec un minimum d'effort).	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0.0%</td></tr> <tr><td>2</td><td>16.7%</td></tr> <tr><td>3</td><td>25.0%</td></tr> <tr><td>4</td><td>50.0%</td></tr> <tr><td>5</td><td>8.3%</td></tr> <tr><td>6</td><td>0.0%</td></tr> </tbody> </table>	Échelle	Pourcentage	1	0.0%	2	16.7%	3	25.0%	4	50.0%	5	8.3%	6	0.0%	3.00	2.50	0.91
Échelle	Pourcentage																	
1	0.0%																	
2	16.7%																	
3	25.0%																	
4	50.0%																	
5	8.3%																	
6	0.0%																	
[Q25] L'interface est plaisante à utiliser.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0.0%</td></tr> <tr><td>2</td><td>16.7%</td></tr> <tr><td>3</td><td>33.3%</td></tr> <tr><td>4</td><td>41.7%</td></tr> <tr><td>5</td><td>8.3%</td></tr> </tbody> </table>	Échelle	Pourcentage	1	0.0%	2	16.7%	3	33.3%	4	41.7%	5	8.3%	2.00	2.33	0.89		
Échelle	Pourcentage																	
1	0.0%																	
2	16.7%																	
3	33.3%																	
4	41.7%																	
5	8.3%																	
[Q26] L'interface répond à mes attentes.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0.0%</td></tr> <tr><td>2</td><td>16.7%</td></tr> <tr><td>3</td><td>25.0%</td></tr> <tr><td>4</td><td>16.7%</td></tr> <tr><td>5</td><td>41.7%</td></tr> </tbody> </table>	Échelle	Pourcentage	1	0.0%	2	16.7%	3	25.0%	4	16.7%	5	41.7%	2.00	2.42	1.00		
Échelle	Pourcentage																	
1	0.0%																	
2	16.7%																	
3	25.0%																	
4	16.7%																	
5	41.7%																	
[Q27] L'effort requis pour interagir avec l'interface est important.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>8.3%</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.0%</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.0%</td></tr> <tr><td>4</td><td>33.3%</td></tr> <tr><td>5</td><td>58.3%</td></tr> </tbody> </table>	Échelle	Pourcentage	1	8.3%	2	0.0%	3	0.0%	4	33.3%	5	58.3%	4.00	4.08	1.08		
Échelle	Pourcentage																	
1	8.3%																	
2	0.0%																	
3	0.0%																	
4	33.3%																	
5	58.3%																	
[Q28] Je suis insatisfait de ma performance.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0.0%</td></tr> <tr><td>2</td><td>8.3%</td></tr> <tr><td>3</td><td>16.7%</td></tr> <tr><td>4</td><td>50.0%</td></tr> <tr><td>5</td><td>25.0%</td></tr> </tbody> </table>	Échelle	Pourcentage	1	0.0%	2	8.3%	3	16.7%	4	50.0%	5	25.0%	4.00	3.92	0.90		
Échelle	Pourcentage																	
1	0.0%																	
2	8.3%																	
3	16.7%																	
4	50.0%																	
5	25.0%																	

Tableau 6.7 : Réponses aux énoncés de Likert [Q20] à [Q30]

(interface Canon inconnue, suite)

[Q29] Avec de l'entraînement face à cette interface, je pourrais réaliser la tâche plus rapidement.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Nombre de personnes</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>8.3%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>3</td> <td>25.0%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>8</td> <td>66.7%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Nombre de personnes	Pourcentage	1	1	8.3%	3	3	25.0%	5	8	66.7%	5.00	4.42	1.17
Échelle	Nombre de personnes	Pourcentage														
1	1	8.3%														
3	3	25.0%														
5	8	66.7%														
[Q30] Avec de l'entraînement face à cette interface, je pourrais réaliser la tâche avec moins d'effort.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Nombre de personnes</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>8.3%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>3</td> <td>25.0%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>8</td> <td>66.7%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Nombre de personnes	Pourcentage	1	1	8.3%	3	3	25.0%	5	8	66.7%	5.00	4.42	1.17
Échelle	Nombre de personnes	Pourcentage														
1	1	8.3%														
3	3	25.0%														
5	8	66.7%														

Tableau 6.8 : Charges perçues et effort moyen déployé (interface Canon inconnue)

	Minimum	Maximum	μ	σ
[Q45b] Charge mentale (en pourcentage)	61.29	100.00	84.27	11.97
[Q46b] Charge physique (en pourcentage)	1.61	100.00	49.60	32.13
[Q47b] Effort moyen (en pourcentage)	38.71	95.48	69.30	18.73

6.4.3 Résultats obtenus face à l'interface virtuelle

Mesures objectives

Nous présentons, au Tableau 6.9, les statistiques descriptives du temps d'exécution de la tâche et du nombre d'erreurs commises, telles que comptabilisées à la section 6.1.3.

Tableau 6.9 : Temps d'exécution et nb. d'erreurs commises (interface Canon virtuelle)

	Minimum	Maximum	μ	σ
[TCV] Temps d'exécution (sec.)	52	121	72.64	23.99
[ECV] Nb. d'erreurs commises	0	4	0.71	1.139

Mesures subjectives

Le Tableau 6.10 présente la distribution des réponses aux énoncés de Likert [Q31] à [Q41]. À titre informatif, la médiane des réponses à chaque énoncé est aussi présentée, ainsi que la moyenne et l'écart type. Le Tableau 6.11 résume quant à lui la charge mentale [Q45c], physique [Q46c] et l'effort moyen déployé [Q47c], tels que perçus par l'utilisateur lors des interactions avec l'interface virtuelle du Canon MP750.

Tableau 6.10 : Réponses aux énoncés de Likert [Q31] à [Q41]

(interface Canon virtuelle)

	Distribution des réponses (de 1: fortement en désaccord à 5: fortement d'accord)					Méd.	μ	σ
	1	2	3	4	5			
[Q31] Cette interface ressemble à une interface que j'utilise régulièrement.	6	1	1	5	1	2.50	2.57	1.56

42.9% 7.1% 7.1% 35.7% 7.1%

Tableau 6.10 : Réponses aux énoncés de Likert [Q31] à [Q41]

(interface Canon virtuelle, suite)

[Q32] Il a été facile de réaliser la tâche.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>3</td> <td>21.4%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>2</td> <td>14.3%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>6</td> <td>42.9%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>3</td> <td>21.4%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage	1	3	21.4%	2	2	14.3%	3	6	42.9%	4	3	21.4%	4.00	3.64	1.08
Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage																	
1	3	21.4%																	
2	2	14.3%																	
3	6	42.9%																	
4	3	21.4%																	
[Q33] Le fonctionnement de l'interface a été facile à apprendre / comprendre.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>5</td> <td>35.7%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>8</td> <td>57.1%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage	1	1	0.0%	2	5	35.7%	3	8	57.1%	5.00	4.50	0.65			
Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage																	
1	1	0.0%																	
2	5	35.7%																	
3	8	57.1%																	
[Q34] L'interface est efficace (i.e. permet de réaliser adéquatement la tâche).	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>7.1%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>1</td> <td>7.1%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>8</td> <td>57.1%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>4</td> <td>28.6%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage	1	1	7.1%	2	1	7.1%	3	8	57.1%	4	4	28.6%	4.00	4.07	0.83
Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage																	
1	1	7.1%																	
2	1	7.1%																	
3	8	57.1%																	
4	4	28.6%																	
[Q35] L'interface est efficiente (i.e. permet de réaliser la tâche avec un minimum d'effort).	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>3</td> <td>21.4%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>3</td> <td>21.4%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>5</td> <td>35.7%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>3</td> <td>21.4%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage	1	3	21.4%	2	3	21.4%	3	5	35.7%	4	3	21.4%	4.00	3.57	1.09
Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage																	
1	3	21.4%																	
2	3	21.4%																	
3	5	35.7%																	
4	3	21.4%																	
[Q36] L'interface est plaisante à utiliser.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>7.1%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>5</td> <td>35.7%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>6</td> <td>42.9%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>2</td> <td>14.3%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage	1	1	7.1%	2	5	35.7%	3	6	42.9%	4	2	14.3%	4.00	3.64	0.84
Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage																	
1	1	7.1%																	
2	5	35.7%																	
3	6	42.9%																	
4	2	14.3%																	

Tableau 6.10 : Réponses aux énoncés de Likert [Q31] à [Q41]

(interface Canon virtuelle, suite)

[Q37] L'interface répond à mes attentes.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>7</td> <td>14.3%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>5</td> <td>35.7%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage	1	2	0.0%	2	7	14.3%	3	5	35.7%	4	0	0.0%	5	0	0.0%	4.00	4.21	0.70
Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage																				
1	2	0.0%																				
2	7	14.3%																				
3	5	35.7%																				
4	0	0.0%																				
5	0	0.0%																				
[Q38] L'effort requis pour interagir avec l'interface est important.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>14.3%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>3</td> <td>21.4%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>3</td> <td>21.4%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>5</td> <td>35.7%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>1</td> <td>7.1%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage	1	2	14.3%	2	3	21.4%	3	3	21.4%	4	5	35.7%	5	1	7.1%	3.00	3.00	1.24
Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage																				
1	2	14.3%																				
2	3	21.4%																				
3	3	21.4%																				
4	5	35.7%																				
5	1	7.1%																				
[Q39] Je suis insatisfait de ma performance.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>4</td> <td>28.6%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>6</td> <td>42.9%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>3</td> <td>21.4%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>1</td> <td>7.1%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage	1	4	28.6%	2	6	42.9%	3	3	21.4%	4	1	7.1%	5	0	0.0%	2.00	2.07	0.92
Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage																				
1	4	28.6%																				
2	6	42.9%																				
3	3	21.4%																				
4	1	7.1%																				
5	0	0.0%																				
[Q40] Avec de l'entraînement face à cette interface, je pourrais réaliser la tâche plus rapidement.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>8</td> <td>57.1%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>5</td> <td>35.7%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage	1	1	0.0%	2	8	57.1%	3	5	35.7%	4	0	0.0%	5	0	0.0%	4.00	4.29	0.61
Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage																				
1	1	0.0%																				
2	8	57.1%																				
3	5	35.7%																				
4	0	0.0%																				
5	0	0.0%																				
[Q41] Avec de l'entraînement face à cette interface, je pourrais réaliser la tâche avec moins d'effort.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>4</td> <td>28.6%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>9</td> <td>64.3%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage	1	1	0.0%	2	4	28.6%	3	9	64.3%	4	0	0.0%	5	0	0.0%	5.00	4.57	0.65
Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage																				
1	1	0.0%																				
2	4	28.6%																				
3	9	64.3%																				
4	0	0.0%																				
5	0	0.0%																				

Tableau 6.11 : Charges perçues et effort moyen déployé (interface Canon virtuelle)

	Minimum	Maximum	μ	σ
[Q45c] Charge mentale (en pourcentage)	24.19	86.45	64.67	19.36
[Q46c] Charge physique (en pourcentage)	4.84	98.39	62.98	50.69
[Q47c] Effort moyen (en pourcentage)	14.52	96.77	50.69	22.61

6.4.4 Courbes d'apprentissage

La Figure 6.3 présente les courbes d'apprentissage face à l'interface connue du Canon MP750, tant sous forme matérielle (courbe continue), que sous forme virtuelle (courbe pointillée). Ces courbes ont été établies comme expliqué à la section 6.1.6. Les modèles obtenus (cf. Tableau 6.12) sont statistiquement hautement significatifs ($p<0.001$) et expliquent respectivement 65.2% et 62.8% de la variance observée dans les mesures, face à l'interface matérielle et face à l'interface virtuelle.

Tableau 6.12 : Modèle d'apprentissage (interfaces Canon matérielle et virtuelle)

	Résumé du modèle					Estimé des paramètres	
	R ²	F	DOF1	DOF2	p	T ₁	α
Interface matérielle	0.652	90.11	1	48	0.000	40.11	0.723
Interface virtuelle	0.628	80.86	1	48	0.000	59.03	0.535

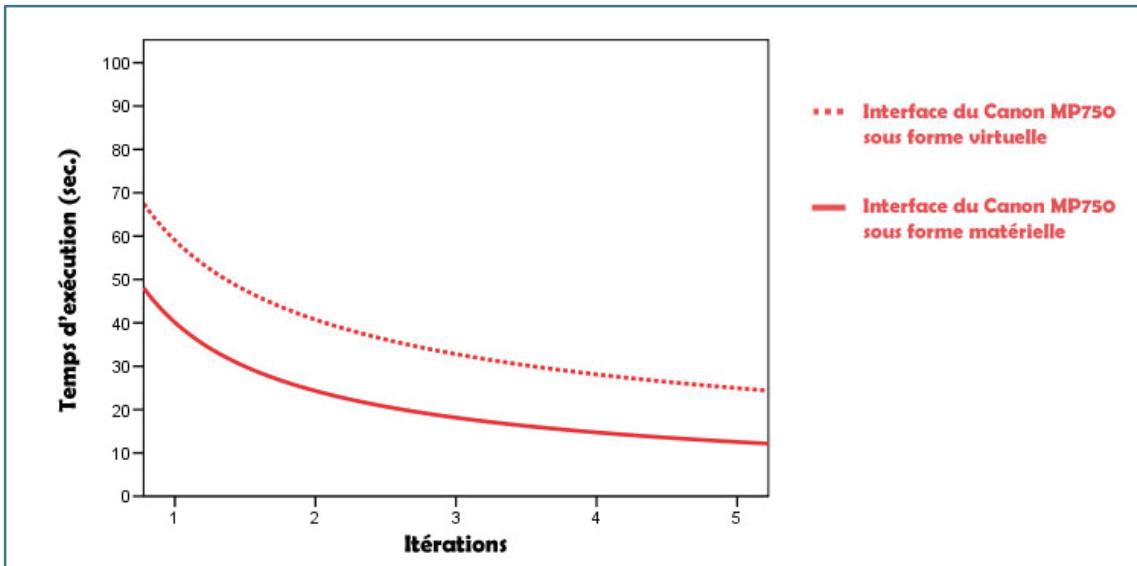


Figure 6.3 : Courbes d'apprentissage (interfaces Canon matérielle et virtuelle)

6.5 Résultats obtenus face à l'interface du Epson Stylus CX9400Fax

Cette section présente les données collectées face à l'interface du Epson CX9400Fax, lorsque connue, inconnue et répliquée virtuellement. Nous présentons aussi, dans une quatrième sous-section, les courbes d'apprentissage face à cette interface.

6.5.1 Résultats obtenus face à l'interface connue

Mesures objectives

Nous présentons, au Tableau 6.13, les statistiques descriptives du temps d'exécution de la tâche et du nombre d'erreurs commises, telles que comptabilisées à la section 6.1.3.

Tableau 6.13 : Temps d'exécution et nb. d'erreurs commises (interface Epson connue)

	Minimum	Maximum	μ	σ
[TEC] Temps d'exécution (sec.)	43	116	65.42	25.74
[EEC] Nb. d'erreurs commises	0	3	0.75	1.06

Mesures subjectives

Le Tableau 6.14 présente la distribution des réponses aux énoncés de Likert [Q9] à [Q19]. À titre informatif, la médiane des réponses à chaque énoncé est aussi présentée, ainsi que la moyenne et l'écart type. Le Tableau 6.15 résume quant à lui la charge mentale [Q45a], physique [Q46a] et l'effort moyen déployé [Q47a], tels que perçus par l'utilisateur lors des interactions avec l'interface connue du Epson CX9400Fax.

Tableau 6.14 : Réponses aux énoncés de Likert [Q9] à [Q19] (interface Epson connue)

	Distribution des réponses (de 1: fortement en désaccord à 5: fortement d'accord)					Méd.	μ	σ
	1	2	3	4	5			
[Q9] Cette interface ressemble à une interface que j'utilise régulièrement.						3.00	2.75	0.75

Figure showing a bar chart of the distribution of responses for statement Q9. The x-axis represents the Likert scale from 1 to 5, and the y-axis represents the percentage of responses. The distribution is skewed towards the right, with the highest frequency at response 3 (41.7%) and the lowest at response 4 (16.7%).

Réponse	Nombre	Pourcentage
1	0	0.0%
2	5	41.7%
3	5	41.7%
4	2	16.7%
5	0	0.0%

Tableau 6.14 : Réponses aux énoncés de Likert [Q9] à [Q19]

(interface Epson connue, suite)

[Q10] Il a été facile de réaliser la tâche.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point Likert</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>6</td> <td>16.7%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>4</td> <td>50.0%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0</td> <td>33.3%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Point Likert	Nombre de réponses	pourcentage	1	2	0.0%	2	6	16.7%	3	4	50.0%	4	0	33.3%	5	0	0.0%	4.00	4.17	0.72
Point Likert	Nombre de réponses	pourcentage																				
1	2	0.0%																				
2	6	16.7%																				
3	4	50.0%																				
4	0	33.3%																				
5	0	0.0%																				
[Q11] Le fonctionnement de l'interface a été facile à apprendre / comprendre.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point Likert</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>3</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>9</td> <td>25.0%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0</td> <td>75.0%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Point Likert	Nombre de réponses	pourcentage	1	3	0.0%	2	9	25.0%	3	0	75.0%	4	0	0.0%	5	0	0.0%	5.00	4.75	0.45
Point Likert	Nombre de réponses	pourcentage																				
1	3	0.0%																				
2	9	25.0%																				
3	0	75.0%																				
4	0	0.0%																				
5	0	0.0%																				
[Q12] L'interface est efficace (i.e. permet de réaliser adéquatement la tâche).	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point Likert</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>3</td> <td>8.3%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>8</td> <td>25.0%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0</td> <td>66.7%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Point Likert	Nombre de réponses	pourcentage	1	1	0.0%	2	3	8.3%	3	8	25.0%	4	0	66.7%	5	0	0.0%	5.00	4.58	0.67
Point Likert	Nombre de réponses	pourcentage																				
1	1	0.0%																				
2	3	8.3%																				
3	8	25.0%																				
4	0	66.7%																				
5	0	0.0%																				
[Q13] L'interface est efficiente (i.e. permet de réaliser la tâche avec un minimum d'effort).	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point Likert</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>3</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>8</td> <td>25.0%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>1</td> <td>66.7%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0</td> <td>8.3%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Point Likert	Nombre de réponses	pourcentage	1	3	0.0%	2	8	25.0%	3	1	66.7%	4	0	8.3%	5	0	0.0%	4.00	3.83	0.58
Point Likert	Nombre de réponses	pourcentage																				
1	3	0.0%																				
2	8	25.0%																				
3	1	66.7%																				
4	0	8.3%																				
5	0	0.0%																				
[Q14] L'interface est plaisante à utiliser.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point Likert</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>3</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>6</td> <td>25.0%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>3</td> <td>50.0%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0</td> <td>25.0%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Point Likert	Nombre de réponses	pourcentage	1	3	0.0%	2	6	25.0%	3	3	50.0%	4	0	25.0%	5	0	0.0%	4.00	4.00	0.74
Point Likert	Nombre de réponses	pourcentage																				
1	3	0.0%																				
2	6	25.0%																				
3	3	50.0%																				
4	0	25.0%																				
5	0	0.0%																				

Tableau 6.14 : Réponses aux énoncés de Likert [Q9] à [Q19]

(interface Epson connue, suite)

[Q15] L'interface répond à mes attentes.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point Likert</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>8</td> <td>66.7%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>4</td> <td>33.3%</td> </tr> </tbody> </table>	Point Likert	Nombre de réponses	Pourcentage	1	0	0.0%	2	0	0.0%	3	0	0.0%	4	8	66.7%	5	4	33.3%	4.00	4.33	0.50
Point Likert	Nombre de réponses	Pourcentage																				
1	0	0.0%																				
2	0	0.0%																				
3	0	0.0%																				
4	8	66.7%																				
5	4	33.3%																				
[Q16] L'effort requis pour interagir avec l'interface est important.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point Likert</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>8.3%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>3</td> <td>25.0%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>4</td> <td>33.3%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>4</td> <td>33.3%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Point Likert	Nombre de réponses	Pourcentage	1	1	8.3%	2	3	25.0%	3	4	33.3%	4	4	33.3%	5	0	0.0%	2.00	2.08	1.00
Point Likert	Nombre de réponses	Pourcentage																				
1	1	8.3%																				
2	3	25.0%																				
3	4	33.3%																				
4	4	33.3%																				
5	0	0.0%																				
[Q17] Je suis insatisfait de ma performance.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point Likert</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>8.3%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>2</td> <td>16.7%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>4</td> <td>33.3%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>5</td> <td>41.7%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Point Likert	Nombre de réponses	Pourcentage	1	1	8.3%	2	2	16.7%	3	4	33.3%	4	5	41.7%	5	0	0.0%	2.00	1.92	1.00
Point Likert	Nombre de réponses	Pourcentage																				
1	1	8.3%																				
2	2	16.7%																				
3	4	33.3%																				
4	5	41.7%																				
5	0	0.0%																				
[Q18] Avec de l'entraînement face à cette interface, je pourrais réaliser la tâche plus rapidement.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point Likert</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>5</td> <td>41.7%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>7</td> <td>58.3%</td> </tr> </tbody> </table>	Point Likert	Nombre de réponses	Pourcentage	1	0	0.0%	2	0	0.0%	3	0	0.0%	4	5	41.7%	5	7	58.3%	5.00	4.58	0.52
Point Likert	Nombre de réponses	Pourcentage																				
1	0	0.0%																				
2	0	0.0%																				
3	0	0.0%																				
4	5	41.7%																				
5	7	58.3%																				
[Q19] Avec de l'entraînement face à cette interface, je pourrais réaliser la tâche avec moins d'effort.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point Likert</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>3</td> <td>25.0%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>4</td> <td>33.3%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>5</td> <td>41.7%</td> </tr> </tbody> </table>	Point Likert	Nombre de réponses	Pourcentage	1	0	0.0%	2	0	0.0%	3	3	25.0%	4	4	33.3%	5	5	41.7%	4.00	4.17	0.84
Point Likert	Nombre de réponses	Pourcentage																				
1	0	0.0%																				
2	0	0.0%																				
3	3	25.0%																				
4	4	33.3%																				
5	5	41.7%																				

Tableau 6.15 : Charges perçues et effort moyen déployé (interface Epson connue)

	Minimum	Maximum	μ	σ
[Q45a] Charge mentale (en pourcentage)	6.45	74.19	36.69	19.45
[Q46a] Charge physique (en pourcentage)	1.61	62.90	25.13	18.60
[Q47a] Effort moyen (en pourcentage)	4.84	70.97	31.18	18.97

6.5.2 Résultats obtenus face à l'interface inconnue

Mesures objectives

Nous présentons, au Tableau 6.16, les statistiques descriptives du temps d'exécution de la tâche et du nombre d'erreurs commises, telles que comptabilisées à la section 6.1.3.

Tableau 6.16 : Temps d'exécution et nb. d'erreurs commises (interface Epson inconnue)

	Minimum	Maximum	μ	σ
[TEI] Temps d'exécution (sec.)	94	603	242.36	148.77
[EEI] Nb. d'erreurs commises	2	24	10.07	5.97

Mesures subjectives

Le Tableau 6.17 présente la distribution des réponses aux énoncés de Likert [Q20] à [Q30]. À titre informatif, la médiane des réponses à chaque énoncé est aussi présentée, ainsi la moyenne et l'écart type. Le Tableau 6.18 résume quant à lui la charge mentale

[Q45b], physique [Q46b] et l'effort moyen déployé [Q47b], tels que perçus par l'utilisateur lors des interactions avec l'interface inconnue du Epson CX9400Fax.

Tableau 6.17 : Réponses aux énoncés de Likert [Q20] à [Q30]

(interface Epson inconnue)

	Distribution des réponses (de 1: fortement en désaccord à 5: fortement d'accord)	Méd. 1 2 3 4 5	μ	σ										
		1	2	3	4	5								
[Q20] Cette interface ressemble à une interface que j'utilise régulièrement.	<table border="1"> <tr> <td>0.0%</td> <td>42.9%</td> <td>57.1%</td> <td>0.0%</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>6</td> <td>8</td> <td>4</td> <td>5</td> </tr> </table>	0.0%	42.9%	57.1%	0.0%	0.0%	1	6	8	4	5	3.00	2.57	0.51
0.0%	42.9%	57.1%	0.0%	0.0%										
1	6	8	4	5										
[Q21] Il a été facile de réaliser la tâche.	<table border="1"> <tr> <td>14.3%</td> <td>50.0%</td> <td>21.4%</td> <td>7.1%</td> <td>7.1%</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>7</td> <td>3</td> <td>1</td> </tr> </table>	14.3%	50.0%	21.4%	7.1%	7.1%	1	2	7	3	1	2.00	2.43	1.09
14.3%	50.0%	21.4%	7.1%	7.1%										
1	2	7	3	1										
[Q22] Le fonctionnement de l'interface a été facile à apprendre / comprendre.	<table border="1"> <tr> <td>0.0%</td> <td>42.9%</td> <td>35.7%</td> <td>14.3%</td> <td>7.1%</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>5</td> <td>6</td> <td>4</td> </tr> </table>	0.0%	42.9%	35.7%	14.3%	7.1%	1	2	5	6	4	3.00	2.86	0.95
0.0%	42.9%	35.7%	14.3%	7.1%										
1	2	5	6	4										

Tableau 6.17 : Réponses aux énoncés de Likert [Q20] à [Q30]

(interface Epson inconnue, suite)

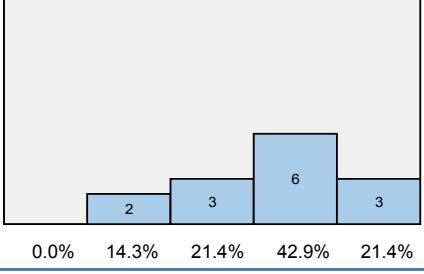
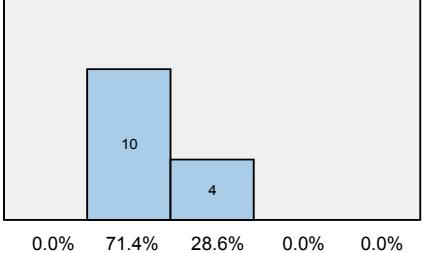
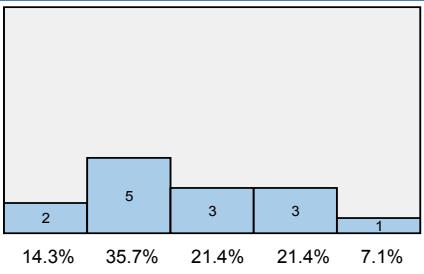
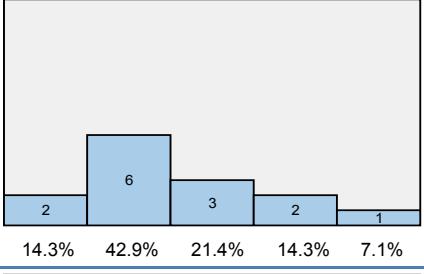
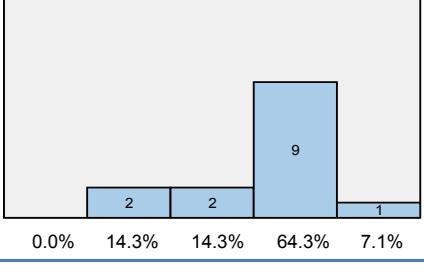
[Q23] L'interface est efficace (i.e. permet de réaliser adéquatement la tâche).	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>2</td> <td>14.3%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>3</td> <td>21.4%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>6</td> <td>42.9%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>3</td> <td>21.4%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage	1	0	0.0%	2	2	14.3%	3	3	21.4%	4	6	42.9%	5	3	21.4%	4.00	3.71	0.99
Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage																				
1	0	0.0%																				
2	2	14.3%																				
3	3	21.4%																				
4	6	42.9%																				
5	3	21.4%																				
[Q24] L'interface est efficiente (i.e. permet de réaliser la tâche avec un minimum d'effort).	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>10</td> <td>71.4%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>4</td> <td>28.6%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage	1	0	0.0%	2	10	71.4%	3	4	28.6%	4	0	0.0%	5	0	0.0%	2.00	2.29	0.47
Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage																				
1	0	0.0%																				
2	10	71.4%																				
3	4	28.6%																				
4	0	0.0%																				
5	0	0.0%																				
[Q25] L'interface est plaisante à utiliser.	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>14.3%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>5</td> <td>35.7%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>3</td> <td>21.4%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>3</td> <td>21.4%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>1</td> <td>7.1%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage	1	2	14.3%	2	5	35.7%	3	3	21.4%	4	3	21.4%	5	1	7.1%	2.50	2.71	1.20
Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage																				
1	2	14.3%																				
2	5	35.7%																				
3	3	21.4%																				
4	3	21.4%																				
5	1	7.1%																				
[Q26] L'interface répond à mes attentes.	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>14.3%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>6</td> <td>42.9%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>3</td> <td>21.4%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>2</td> <td>14.3%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>1</td> <td>7.1%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage	1	2	14.3%	2	6	42.9%	3	3	21.4%	4	2	14.3%	5	1	7.1%	2.00	2.57	1.16
Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage																				
1	2	14.3%																				
2	6	42.9%																				
3	3	21.4%																				
4	2	14.3%																				
5	1	7.1%																				
[Q27] L'effort requis pour interagir avec l'interface est important.	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>2</td> <td>14.3%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>2</td> <td>14.3%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>9</td> <td>64.3%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>1</td> <td>7.1%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage	1	0	0.0%	2	2	14.3%	3	2	14.3%	4	9	64.3%	5	1	7.1%	4.00	3.64	0.84
Échelle	Nombre de réponses	Pourcentage																				
1	0	0.0%																				
2	2	14.3%																				
3	2	14.3%																				
4	9	64.3%																				
5	1	7.1%																				

Tableau 6.17 : Réponses aux énoncés de Likert [Q20] à [Q30]
(interface Epson inconnue, suite)

[Q28] Je suis insatisfait de ma performance.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Nombre de répondants</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>7.1%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>1</td> <td>7.1%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>4</td> <td>28.6%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>7</td> <td>50.0%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>1</td> <td>7.1%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Nombre de répondants	Pourcentage	1	1	7.1%	2	1	7.1%	3	4	28.6%	4	7	50.0%	5	1	7.1%	4.00	3.43	1.02
Échelle	Nombre de répondants	Pourcentage																				
1	1	7.1%																				
2	1	7.1%																				
3	4	28.6%																				
4	7	50.0%																				
5	1	7.1%																				
[Q29] Avec de l'entraînement face à cette interface, je pourrais réaliser la tâche plus rapidement.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Nombre de répondants</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>1</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>4</td> <td>28.6%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>9</td> <td>64.3%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Nombre de répondants	Pourcentage	1	1	0.0%	2	1	0.0%	3	4	28.6%	4	9	64.3%	5.00	4.57	0.65			
Échelle	Nombre de répondants	Pourcentage																				
1	1	0.0%																				
2	1	0.0%																				
3	4	28.6%																				
4	9	64.3%																				
[Q30] Avec de l'entraînement face à cette interface, je pourrais réaliser la tâche avec moins d'effort.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Nombre de répondants</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>7.1%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>1</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>9</td> <td>64.3%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>4</td> <td>28.6%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Nombre de répondants	Pourcentage	1	1	7.1%	2	1	0.0%	3	9	64.3%	4	4	28.6%	4.00	4.14	0.77			
Échelle	Nombre de répondants	Pourcentage																				
1	1	7.1%																				
2	1	0.0%																				
3	9	64.3%																				
4	4	28.6%																				

Tableau 6.18 : Charges perçues et effort moyen déployé (interface Epson inconnue)

	Minimum	Maximum	μ	σ
[Q45b] Charge mentale (en pourcentage)	60.00	98.39	80.64	12.96
[Q46b] Charge physique (en pourcentage)	16.13	75.81	44.01	16.13
[Q47b] Effort moyen (en pourcentage)	45.16	100.00	67.74	19.37

6.5.3 Résultats obtenus face à l'interface virtuelle

Mesures objectives

Nous présentons, au Tableau 6.19, les statistiques descriptives du temps d'exécution de la tâche et du nombre d'erreurs commises, telles que comptabilisées à la section 6.1.3.

Tableau 6.19 : Temps d'exécution et nb. d'erreurs commises (interface Epson virtuelle)

	Minimum	Maximum	μ	σ
[TEV] Temps d'exécution (sec.)	58	170	86.42	30.09
[EEV] Nb. d'erreurs commises	0	3	0.58	0.90

Mesures subjectives

Le Tableau 6.20 présente la distribution des réponses aux énoncés de Likert [Q31] à [Q41]. À titre informatif, la médiane des réponses à chaque énoncé est aussi présentée, ainsi que la moyenne et l'écart type. Le Tableau 6.21 résume quant à lui la charge mentale [Q45c], physique [Q46c] et l'effort moyen déployé [Q47c], tels que perçus par l'utilisateur lors des interactions avec l'interface virtuelle du Epson CX9400Fax.

Tableau 6.20 : Réponses aux énoncés de Likert [Q31] à [Q41] (interface Epson virtuelle)

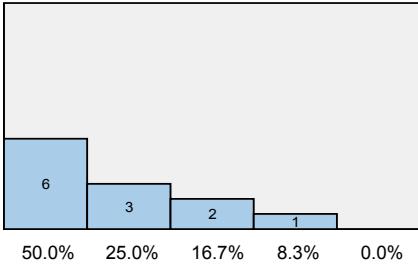
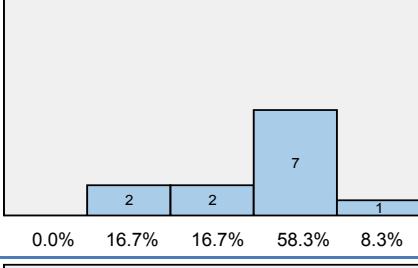
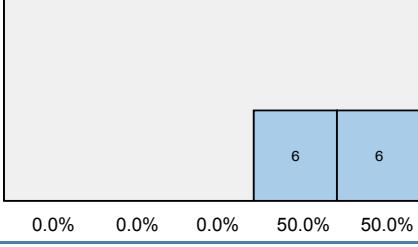
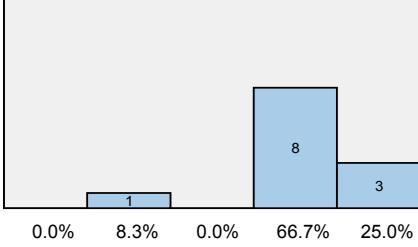
	Distribution des réponses (de 1: fortement en désaccord à 5: fortement d'accord)	1	2	3	4	5	Méd.	μ	σ
[Q31] Cette interface ressemble à une interface que j'utilise régulièrement.		6	3	2	1	0	1.50	1.83	1.03
[Q32] Il a été facile de réaliser la tâche.		2	2	7	1	0	4.00	3.58	0.90
[Q33] Le fonctionnement de l'interface a été facile à apprendre / comprendre.		6	6	0	0	0	4.50	4.50	0.52
[Q34] L'interface est efficace (i.e. permet de réaliser adéquatement la tâche).		1	0	0	8	3	4.00	4.08	0.79

Tableau 6.20 : Réponses aux énoncés de Likert [Q31] à [Q41]

(interface Epson virtuelle, suite)

[Q35] L'interface est efficiente (i.e. permet de réaliser la tâche avec un minimum d'effort).	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>8.3%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>41.7%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>25.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Pourcentage	1	0.0%	3	8.3%	5	41.7%	3	25.0%	4.00	3.83	0.84
Échelle	Pourcentage													
1	0.0%													
3	8.3%													
5	41.7%													
3	25.0%													
[Q36] L'interface est plaisante à utiliser.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>8.3%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>41.7%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>33.3%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Pourcentage	1	0.0%	2	8.3%	5	41.7%	4	33.3%	4.00	4.00	0.95
Échelle	Pourcentage													
1	0.0%													
2	8.3%													
5	41.7%													
4	33.3%													
[Q37] L'interface répond à mes attentes.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>8.3%</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>58.3%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>25.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Pourcentage	1	0.0%	1	8.3%	7	58.3%	3	25.0%	4.00	4.00	0.85
Échelle	Pourcentage													
1	0.0%													
1	8.3%													
7	58.3%													
3	25.0%													
[Q38] L'effort requis pour interagir avec l'interface est important.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5</td> <td>41.7%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>25.0%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>25.0%</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>8.3%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Pourcentage	5	41.7%	3	25.0%	3	25.0%	1	8.3%	3.00	3.00	1.04
Échelle	Pourcentage													
5	41.7%													
3	25.0%													
3	25.0%													
1	8.3%													
[Q39] Je suis insatisfait de ma performance.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>8.3%</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>58.3%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>33.3%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Pourcentage	1	8.3%	7	58.3%	4	33.3%	2.00	2.25	0.62		
Échelle	Pourcentage													
1	8.3%													
7	58.3%													
4	33.3%													

Tableau 6.20 : Réponses aux énoncés de Likert [Q31] à [Q41]
(interface Epson virtuelle, suite)

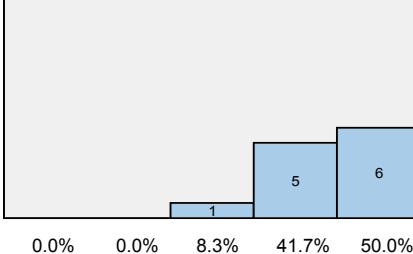
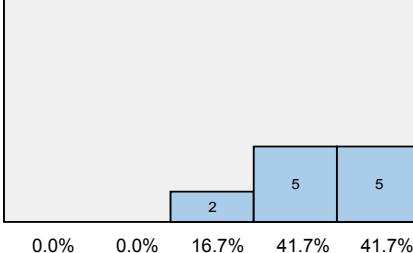
[Q40] Avec de l'entraînement face à cette interface, je pourrais réaliser la tâche plus rapidement.	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>8.3%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>41.7%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>41.7%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>50.0%</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>50.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Pourcentage	1	0.0%	2	8.3%	3	41.7%	4	41.7%	5	50.0%	6	50.0%	4.50	4.42	0.67
Échelle	Pourcentage																	
1	0.0%																	
2	8.3%																	
3	41.7%																	
4	41.7%																	
5	50.0%																	
6	50.0%																	
[Q41] Avec de l'entraînement face à cette interface, je pourrais réaliser la tâche avec moins d'effort.	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Échelle</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>16.7%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>41.7%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>41.7%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>50.0%</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>50.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Échelle	Pourcentage	1	0.0%	2	16.7%	3	41.7%	4	41.7%	5	50.0%	6	50.0%	4.00	4.25	0.75
Échelle	Pourcentage																	
1	0.0%																	
2	16.7%																	
3	41.7%																	
4	41.7%																	
5	50.0%																	
6	50.0%																	

Tableau 6.21 : Charges perçues et effort moyen déployé (interface Epson virtuelle)

	Minimum	Maximum	μ	σ
[Q45c] Charge mentale (en pourcentage)	25.81	98.39	56.45	27.57
[Q46c] Charge physique (en pourcentage)	1.61	98.39	51.35	31.37
[Q47c] Effort moyen (en pourcentage)	20.00	85.48	58.66	19.74

6.5.4 Courbes d'apprentissage

La Figure 6.4 présente les courbes d'apprentissage face à l'interface connue du Epson CX9400Fax, tant sous forme matérielle (courbe continue), que sous forme virtuelle (courbe pointillée). Ces courbes ont été établies comme expliqué à la section 6.1.6. Les modèles obtenus (cf. Tableau 6.22) sont statistiquement hautement significatifs

($p<0.001$) et expliquent respectivement 65.2% et 74.3% de la variance observée dans les mesures, face à l'interface matérielle et face à l'interface virtuelle.

Tableau 6.22 : Modèle d'apprentissage (interfaces Epson matérielle et virtuelle)

	Résumé du modèle					Estimé des paramètres	
	R ²	F	DOF1	DOF2	p	T ₁	α
Interface matérielle	0.652	89.78	1	48	0.000	55.86	0.660
Interface virtuelle	0.743	139.10	1	48	0.000	77.09	0.451

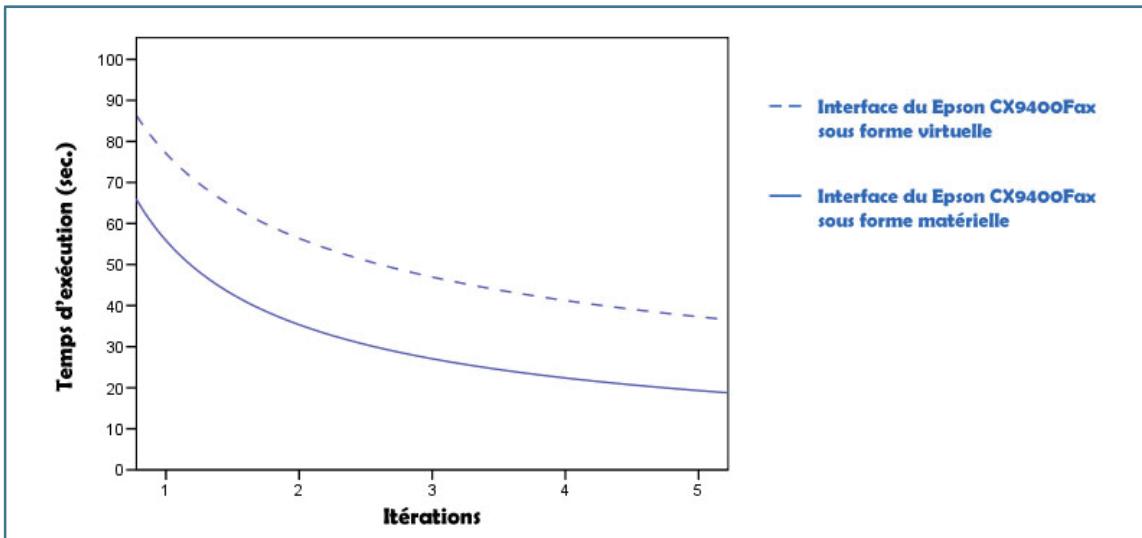


Figure 6.4 : Courbes d'apprentissage (interfaces Epson matérielle et virtuelle)

6.6 Résultats globaux du premier groupe

Nous présentons, dans cette section, les préférences personnelles des participants entre les différentes interfaces testées (cf. Tableau 6.23) ainsi que leurs opinions sur le paradigme proposé (cf. Tableau 6.24).

Tableau 6.23 : Ordonnancement des interfaces par ordre de préférence (1^{er} groupe)

	Ordre de préférence des interfaces (de 1: interface préférée à 3: interface moins préférée)	Méd.	μ	σ						
	1	2	3							
[Q48] Interface Canon connue.	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>78.6%</td> <td>14.3%</td> <td>7.1%</td> </tr> </table>	1	2	3	78.6%	14.3%	7.1%	1.00	1.29	0.61
1	2	3								
78.6%	14.3%	7.1%								
[Q48] Interface Canon virtuelle.	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>14.3%</td> <td>71.4%</td> <td>14.3%</td> </tr> </table>	1	2	3	14.3%	71.4%	14.3%	2.00	2.00	0.56
1	2	3								
14.3%	71.4%	14.3%								
[Q48] Interface Epson inconnue.	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>7.1%</td> <td>14.3%</td> <td>78.6%</td> </tr> </table>	1	2	3	7.1%	14.3%	78.6%	3.00	2.71	0.61
1	2	3								
7.1%	14.3%	78.6%								

Tableau 6.24 : Réponses aux énoncés de Likert sur le paradigme proposé (1^{er} groupe)

	Distribution des réponses (de 1: fortement en désaccord à 5: fortement d'accord)	Méd.	μ	σ																		
	1 2 3 4 5																					
[Q49] Les interfaces virtuelles ne présentent aucun potentiel.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point Likert</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>7</td> <td>50.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>6</td> <td>42.9%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>1</td> <td>7.1%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Point Likert	Nombre de réponses	Pourcentage (%)	1	7	50.0%	2	6	42.9%	3	1	7.1%	4	0	0.0%	5	0	0.0%	1.50	1.57	0.65
Point Likert	Nombre de réponses	Pourcentage (%)																				
1	7	50.0%																				
2	6	42.9%																				
3	1	7.1%																				
4	0	0.0%																				
5	0	0.0%																				
[Q50] Utiliser une interface virtuelle semble approprié pour interagir avec certains appareils de l'environnement.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point Likert</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>14.3%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>8</td> <td>57.1%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>4</td> <td>28.6%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Point Likert	Nombre de réponses	Pourcentage (%)	1	2	14.3%	2	0	0.0%	3	8	57.1%	4	4	28.6%	5	0	0.0%	4.00	4.14	0.66
Point Likert	Nombre de réponses	Pourcentage (%)																				
1	2	14.3%																				
2	0	0.0%																				
3	8	57.1%																				
4	4	28.6%																				
5	0	0.0%																				
[Q51] Si le concept était miniaturisé et raffiné, je préférerais utiliser une interface virtuelle [...] plutôt que de m'adapter à leur interface matérielle inconnue.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point Likert</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>14.3%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>9</td> <td>64.3%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>3</td> <td>21.4%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Point Likert	Nombre de réponses	Pourcentage (%)	1	2	14.3%	2	0	0.0%	3	9	64.3%	4	3	21.4%	5	0	0.0%	4.00	4.07	0.62
Point Likert	Nombre de réponses	Pourcentage (%)																				
1	2	14.3%																				
2	0	0.0%																				
3	9	64.3%																				
4	3	21.4%																				
5	0	0.0%																				
[Q52] Si le concept était miniaturisé et raffiné, je préférerais utiliser une interface virtuelle [...] plutôt que d'utiliser leur interface matérielle connue.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point Likert</th> <th>Nombre de réponses</th> <th>Pourcentage (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>7.1%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>7</td> <td>50.0%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>1</td> <td>7.1%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>3</td> <td>21.4%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>2</td> <td>14.3%</td> </tr> </tbody> </table>	Point Likert	Nombre de réponses	Pourcentage (%)	1	1	7.1%	2	7	50.0%	3	1	7.1%	4	3	21.4%	5	2	14.3%	2.00	2.86	1.29
Point Likert	Nombre de réponses	Pourcentage (%)																				
1	1	7.1%																				
2	7	50.0%																				
3	1	7.1%																				
4	3	21.4%																				
5	2	14.3%																				

Pour déterminer si les réponses obtenues sont statistiquement significatives, nous présentons, au Tableau 6.25, différents tests du chi-carré de Pearson (*chi-square goodness-of-fit test*) visant à évaluer si l'hypothèse nulle, selon laquelle la distribution de ces réponses serait uniforme, peut être rejetée.

Tableau 6.25 : Tests du chi-carré de Pearson sur les préférences des participants et leurs opinions sur le paradigme proposé (1^{er} groupe)

	Chi carré	DOF	p
[Q48] Interface connue (Canon MP750) Mode : 1^{ère} position	13.000	2	0.002
[Q48] Interface virtuelle (Canon MP750) Mode : 2^{ième} position	9.143	2	0.010
[Q48] Interface inconnue (Epson CX9400Fax) Mode : 3^{ième} position	13.000	2	0.002
[Q49] Les interfaces virtuelles ne présentent aucun potentiel.	4.429	2	0.109
[Q50] Utiliser une interface virtuelle semble approprié pour interagir avec certains appareils de l'environnement.	4.000	2	0.135
[Q51] Si le concept était miniaturisé et raffiné, je préférerais utiliser une interface virtuelle personnalisable et adaptée à mes besoins pour dialoguer avec certains appareils de mon environnement plutôt que de m'adapter à leur interface matérielle inconnue. Mode : d'accord	6.143	2	0.046
[Q52] Si le concept était miniaturisé et raffiné, je préférerais utiliser une interface virtuelle personnalisable et adaptée à mes besoins pour dialoguer avec certains appareils de mon environnement plutôt que d'utiliser leur interface matérielle connue.	8.857	4	0.065

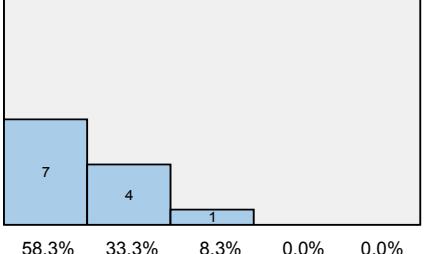
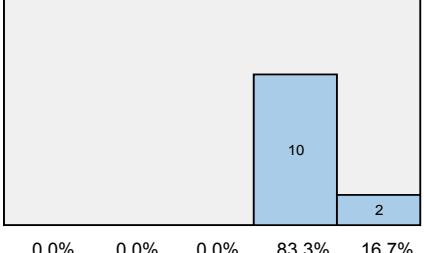
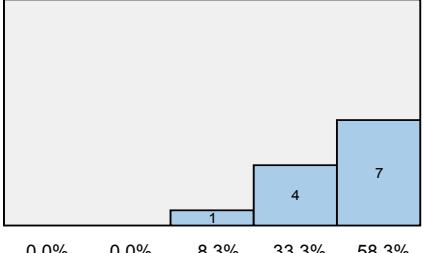
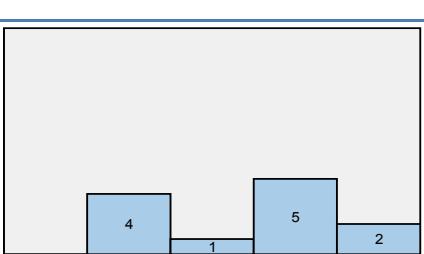
6.7 Résultats globaux du second groupe

Nous présentons, dans cette section, les préférences personnelles des participants entre les différentes interfaces testées (cf. Tableau 6.26) ainsi que leurs opinions sur le paradigme proposé (cf. Tableau 6.27).

Tableau 6.26 : Ordonnancement des interfaces par ordre de préférence (2^{ième} groupe)

	Ordre de préférence des interfaces (de 1: interface préférée à 3: interface moins préférée)															
		1	2	3	Méd.	μ	σ									
[Q48] Interface Epson connue.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Ordre</th> <th>Nombre de participants</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>10</td> <td>83.3%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>2</td> <td>16.7%</td> </tr> </tbody> </table>	Ordre	Nombre de participants	Pourcentage	1	10	83.3%	2	0	0.0%	3	2	16.7%	1.00	1.17	0.39
Ordre	Nombre de participants	Pourcentage														
1	10	83.3%														
2	0	0.0%														
3	2	16.7%														
[Q48] Interface Epson virtuelle.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Ordre</th> <th>Nombre de participants</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>8.3%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>10</td> <td>83.3%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>1</td> <td>8.3%</td> </tr> </tbody> </table>	Ordre	Nombre de participants	Pourcentage	1	1	8.3%	2	10	83.3%	3	1	8.3%	2.00	2.00	0.43
Ordre	Nombre de participants	Pourcentage														
1	1	8.3%														
2	10	83.3%														
3	1	8.3%														
[Q48] Interface Canon inconnue.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Ordre</th> <th>Nombre de participants</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>8.3%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>11</td> <td>91.7%</td> </tr> </tbody> </table>	Ordre	Nombre de participants	Pourcentage	1	1	8.3%	2	0	0.0%	3	11	91.7%	3.00	2.83	0.58
Ordre	Nombre de participants	Pourcentage														
1	1	8.3%														
2	0	0.0%														
3	11	91.7%														

Tableau 6.27 : Réponses aux énoncés de Likert sur le paradigme proposé (2^{ième} groupe)

	Distribution des réponses (de 1: fortement en désaccord à 5: fortement d'accord)	Méd.	μ	σ																		
	1 2 3 4 5																					
[Q49] Les interfaces virtuelles ne présentent aucun potentiel.	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Réponse</th> <th>Nombre</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>7</td> <td>58.3%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>4</td> <td>33.3%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>1</td> <td>8.3%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Réponse	Nombre	Pourcentage	1	7	58.3%	2	4	33.3%	3	1	8.3%	4	0	0.0%	5	0	0.0%	1.00	1.50	0.67
Réponse	Nombre	Pourcentage																				
1	7	58.3%																				
2	4	33.3%																				
3	1	8.3%																				
4	0	0.0%																				
5	0	0.0%																				
[Q50] Utiliser une interface virtuelle semble approprié pour interagir avec certains appareils de l'environnement.	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Réponse</th> <th>Nombre</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>10</td> <td>83.3%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>2</td> <td>16.7%</td> </tr> </tbody> </table>	Réponse	Nombre	Pourcentage	1	0	0.0%	2	0	0.0%	3	0	0.0%	4	10	83.3%	5	2	16.7%	4.00	4.17	0.39
Réponse	Nombre	Pourcentage																				
1	0	0.0%																				
2	0	0.0%																				
3	0	0.0%																				
4	10	83.3%																				
5	2	16.7%																				
[Q51] Si le concept était miniaturisé et raffiné, je préférerais utiliser une interface virtuelle [...] plutôt que de m'adapter à leur interface matérielle inconnue.	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Réponse</th> <th>Nombre</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>8.3%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>4</td> <td>33.3%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>7</td> <td>58.3%</td> </tr> </tbody> </table>	Réponse	Nombre	Pourcentage	1	1	8.3%	2	4	33.3%	3	7	58.3%	5.00	4.50	0.67						
Réponse	Nombre	Pourcentage																				
1	1	8.3%																				
2	4	33.3%																				
3	7	58.3%																				
[Q52] Si le concept était miniaturisé et raffiné, je préférerais utiliser une interface virtuelle [...] plutôt que d'utiliser leur interface matérielle connue.	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Réponse</th> <th>Nombre</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>4</td> <td>33.3%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>5</td> <td>41.7%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>2</td> <td>16.7%</td> </tr> </tbody> </table>	Réponse	Nombre	Pourcentage	1	4	33.3%	2	5	41.7%	3	2	16.7%	4.00	3.42	1.17						
Réponse	Nombre	Pourcentage																				
1	4	33.3%																				
2	5	41.7%																				
3	2	16.7%																				

Pour déterminer si les réponses obtenues sont statistiquement significatives, nous présentons, au Tableau 6.28, différents tests du chi-carré de Pearson (*chi-square goodness-of-fit test*) visant à évaluer si l'hypothèse nulle, selon laquelle la distribution de ces réponses serait uniforme, peut être rejetée.

Tableau 6.28 : Tests du chi-carré de Pearson sur les préférences des participants et leurs opinions sur le paradigme proposé (2^{ième} groupe)

	Chi carré	DOF	p
[Q48] Interface connue (Epson CX9400Fax) Mode : 1^{ère} position	5.333	1	0.021
[Q48] Interface virtuelle (Epson CX9400Fax) Mode : 2^{ième} position	13.500	2	0.001
[Q48] Interface inconnue (Canon MP750) Mode : 3^{ième} position	8.333	1	0.004
[Q49] Les interfaces virtuelles ne présentent aucun potentiel.	4.500	2	0.105
[Q50] Utiliser une interface virtuelle semble approprié pour interagir avec certains appareils de l'environnement. Mode : d'accord	5.333	1	0.021
[Q51] Si le concept était miniaturisé et raffiné, je préférerais utiliser une interface virtuelle personnalisable et adaptée à mes besoins pour dialoguer avec certains appareils de mon environnement plutôt que de m'adapter à leur interface matérielle inconnue.	4.500	2	0.105
[Q52] Si le concept était miniaturisé et raffiné, je préférerais utiliser une interface virtuelle personnalisable et adaptée à mes besoins pour dialoguer avec certains appareils de mon environnement plutôt que d'utiliser leur interface matérielle connue.	3.333	3	0.343

6.8 Résultats techniques

Les tableaux 6.29 et 6.30 présentent la distribution des réponses aux énoncés de Likert [Q42] à [Q44], face aux interfaces virtuelles du Canon MP750 et du Epson CX9400Fax.

Ces réponses seront utilisées pour caractériser l'implémentation proposée, telle que perçue par les participants. Même si les énoncés sélectionnés ciblent les mêmes fonctionnalités, nous séparons encore, pour rester conservateur, la présentation et l'analyse des réponses entre les deux groupes de participants créés, qui ont chacun testé une interface virtuelle différente.

Tableau 6.29 : Réponses aux énoncés de Likert [Q42] à [Q44]

(interface Canon virtuelle)

	Distribution des réponses (de 1: fortement en désaccord à 5: fortement d'accord)	Méd.	μ	σ												
[Q42] L'interface virtuelle est difficile à percevoir.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Réponse</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>21.4%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>57.1%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>14.3%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>7.1%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Réponse	Pourcentage	1	21.4%	2	57.1%	3	14.3%	4	7.1%	5	0.0%	2.00	2.07	0.83
Réponse	Pourcentage															
1	21.4%															
2	57.1%															
3	14.3%															
4	7.1%															
5	0.0%															
[Q43] L'interface virtuelle est visuellement bien intégrée à la réalité.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Réponse</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>7.1%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>21.4%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>35.7%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>35.7%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>35.7%</td> </tr> </tbody> </table>	Réponse	Pourcentage	1	7.1%	2	21.4%	3	35.7%	4	35.7%	5	35.7%	4.00	4.00	0.96
Réponse	Pourcentage															
1	7.1%															
2	21.4%															
3	35.7%															
4	35.7%															
5	35.7%															

Tableau 6.29 : Réponses aux énoncés de Likert [Q42] à [Q44]

(interface Canon virtuelle, suite)

[Q44] Utiliser l'interface virtuelle est similaire à utiliser une interface matérielle.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point Likert</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>21.4%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>42.9%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>35.7%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Point Likert	Pourcentage	1	0.0%	2	21.4%	3	42.9%	4	35.7%	5	0.0%	3.00	3.14	0.77
Point Likert	Pourcentage															
1	0.0%															
2	21.4%															
3	42.9%															
4	35.7%															
5	0.0%															

Tableau 6.30 : Réponses aux énoncés de Likert [Q42] à [Q44] (interface Epson virtuelle)

	Distribution des réponses (de 1: fortement en désaccord à 5: fortement d'accord)	Méd.	μ	σ												
		1	2	3	4	5										
[Q42] L'interface virtuelle est difficile à percevoir.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point Likert</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>8.3%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>58.3%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>16.7%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>8.3%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>8.3%</td> </tr> </tbody> </table>	Point Likert	Pourcentage	1	8.3%	2	58.3%	3	16.7%	4	8.3%	5	8.3%	2.00	2.50	1.09
Point Likert	Pourcentage															
1	8.3%															
2	58.3%															
3	16.7%															
4	8.3%															
5	8.3%															
[Q43] L'interface virtuelle est visuellement bien intégrée à la réalité.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point Likert</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>25.0%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>16.7%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>41.7%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>16.7%</td> </tr> </tbody> </table>	Point Likert	Pourcentage	1	0.0%	2	25.0%	3	16.7%	4	41.7%	5	16.7%	4.00	3.50	1.09
Point Likert	Pourcentage															
1	0.0%															
2	25.0%															
3	16.7%															
4	41.7%															
5	16.7%															
[Q44] Utiliser l'interface virtuelle est similaire à utiliser une interface matérielle.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Point Likert</th> <th>Pourcentage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.0%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>25.0%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>16.7%</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>58.3%</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0.0%</td> </tr> </tbody> </table>	Point Likert	Pourcentage	1	0.0%	2	25.0%	3	16.7%	4	58.3%	5	0.0%	4.00	3.33	0.89
Point Likert	Pourcentage															
1	0.0%															
2	25.0%															
3	16.7%															
4	58.3%															
5	0.0%															

Pour déterminer si les réponses obtenues sont statistiquement significatives, nous présentons, aux tableaux 6.31 et 6.32, différents tests du chi-carré de Pearson (*chi-square goodness-of-fit test*) visant à évaluer si l'hypothèse nulle, selon laquelle la distribution de ces réponses serait uniforme, peut être rejetée.

Tableau 6.31 : Tests du chi-carré de Pearson sur les perceptions de l'interface Canon virtuelle

	Chi carré	DOF	p
[Q42] L'interface virtuelle est difficile à percevoir. Mode : en désaccord	8.286	3	0.040
[Q43] L'interface virtuelle est visuellement bien intégrée à la réalité.	3.143	3	0.370
[Q44] Utiliser l'interface virtuelle est similaire à utiliser une interface matérielle.	1.000	2	0.607

Tableau 6.32 : Tests du chi-carré de Pearson sur les perceptions de l'interface Epson virtuelle

	Chi carré	DOF	P
[Q42] L'interface virtuelle est difficile à percevoir. Mode : en désaccord	11.333	4	0.023
[Q43] L'interface virtuelle est visuellement bien intégrée à la réalité.	2.000	3	0.572
[Q44] Utiliser l'interface virtuelle est similaire à utiliser une interface matérielle.	3.500	2	0.174

6.9 Analyse inférentielle des résultats obtenus

Pour alimenter notre discussion présentée à la section 6.10, nous procédons à une analyse inférentielle des résultats exposés plus haut, impliquant notamment, selon notre méthodologie, une comparaison :

- entre les interfaces matérielles connues et leur contrepartie virtuelle (cf. section 5.1.1);
- entre les interfaces matérielles inconnues et les alternatives virtuelles proposées (cf. section 5.1.2);
- et entre ces dernières et les interfaces matérielles connues (cf. section 5.1.3).

Nous commençons toutefois notre analyse en comparant les interfaces matérielles retenues, lorsque connues et inconnues des utilisateurs, afin de déterminer laquelle est la plus performante face à la tâche demandée et laquelle est la plus aisée à apprendre.

6.9.1 Comparaison entre les interfaces matérielles connues

Nous comparons, dans cette section, l'interface matérielle du Canon MP750 à celle du Epson CX9400Fax, lorsque connues.

Variables continues

Pour déterminer si nous pouvons recourir à des tests paramétriques pour comparer les variables continues recueillies (temps d'exécution, nombre d'erreurs, charges perçues et effort moyen déployé), nous proposons au Tableau 6.33, une étude de leur distribution. Comme les ratios des coefficients d'asymétrie et d'aplatissement sur l'erreur standard se

situent à l'extérieur de l'intervalle [-2; 2] pour les erreurs commises et la charge physique perçue face au Canon MP750, nous devons rejeter l'hypothèse nulle d'une distribution normale pour ces variables. Les tests de Shapiro-Wilk (cf. Tableau 6.34) nous forcent aussi à rejeter cette hypothèse pour la majorité des autres variables.

Tableau 6.33 : Analyse de l'asymétrie et de l'aplatissement des distributions des variables continues recueillies (interfaces matérielles Canon et Epson connues)

	Asymétrie			Aplatissement		
	Stat	Erreur	S/E	Stat	Erreur	S/E
[TCC] Temps d'exécution (Canon connue)	1.031	0.597	1.726	0.456	1.154	0.395
[TEC] Temps d'exécution (Epson connue)	1.025	0.637	1.608	-0.421	1.232	-0.341
[ECC] Erreurs commises (Canon connue)	1.942	0.597	3.250	3.177	1.154	2.753
[EEC] Erreurs commises (Epson connue)	1.149	0.637	1.802	0.126	1.232	0.102
[Q45a] Charge mentale (Canon connue)	-0.063	0.597	-0.106	-0.919	1.154	-0.797
[Q45a] Charge mentale (Epson connue)	0.328	0.637	0.514	-0.387	1.232	-0.314
[Q46a] Charge physique (Canon connue)	2.098	0.597	3.512	5.864	1.154	5.081
[Q46a] Charge physique (Epson connue)	0.759	0.637	1.191	0.120	1.232	0.097
[Q47a] Effort moyen (Canon connue)	1.096	0.597	1.835	0.346	1.154	0.300
[Q47a] Effort moyen (Epson connue)	0.518	0.637	0.812	0.214	1.232	0.174

Tableau 6.34 : Tests de normalité de Shapiro-Wilk sur les variables continues recueillies (interfaces matérielles Canon et Epson connues)

	Shapiro-Wilk		
	W	DOF	p
[TCC] Temps d'exécution (Canon connue)	0.903	14	0.125
[TEC] Temps d'exécution (Epson connue)	0.820	12	0.016
[ECC] Erreurs commises (Canon connue)	0.618	14	0.000
[EEC] Erreurs commises (Epson connue)	0.748	12	0.003
[Q45a] Charge mentale (Canon connue)	0.954	14	0.630
[Q45a] Charge mentale (Epson connue)	0.968	12	0.890
[Q46a] Charge physique (Canon connue)	0.771	14	0.002
[Q46a] Charge physique (Epson connue)	0.939	12	0.485
[Q47a] Effort moyen (Canon connue)	0.863	14	0.033
[Q47a] Effort moyen (Epson connue)	0.951	12	0.657

Comme nous ne pouvons pas défendre la normalité de la plupart des variables continues étudiées, nous ne pourrons utiliser de T tests de Student pour les comparer. Nous aurons ainsi recours aux tests non paramétriques de Mann-Whitney pour deux échantillons indépendants, afin d'étudier la significativité statistique des différences entre les variables continues d'intérêt (cf. Tableau 6.35).

Tableau 6.35 : Étude de la significativité statistique des différences entre les temps d'exécution, les nombres d'erreurs commises, les charges perçues et les efforts moyens déployés, pour les deux interfaces matérielles connues

	Mann-Whitney		
	U	Z	p
[TCC-EEC] Différence entre les temps d'exécution.	39.000	-2.317	0.021
[ECC-EEC] Différence entre les erreurs commises.	72.500	-0.699	0.485
[Q45a-Q45a] Différence entre les charges mentales.	46.500	-1.933	0.053
[Q46a-Q45a] Différence entre les charges physiques.	79.000	-0.258	0.797
[Q47a-Q47a] Différence entre les efforts moyens.	77.000	-0.360	0.718

Suite à cette comparaison, nous pouvons affirmer que :

- le temps d'exécution de la tâche face à l'interface matérielle connue du Canon MP750 est plus court que celui face à l'interface matérielle connue du Epson CX9400Fax. Cette différence moyenne de 17.9 secondes (représentant une diminution de 27.3%) est statistiquement significative;
- la charge mentale perçue lors des interactions avec l'interface matérielle connue du Epson CX9400Fax est plus faible que celle perçue face à l'interface matérielle connue du Canon MP750. Cette différence moyenne de 13.3% (représentant une diminution de 26.5%) peut être considérée comme statistiquement significative.

Variables ordinales

Le Tableau 6.36 propose une étude de la significativité statistique des différences entre les réponses [Q10] à [Q19] du questionnaire, pour les interfaces matérielles connues. Nous avons encore eu recours à des tests non paramétriques de Mann-Whitney pour deux échantillons indépendants, étant donné que nous étudions des variables ordinales. La seule différence statistiquement significative à noter se situe au niveau de l'impact de l'entraînement sur le temps d'exécution de la tâche. En effet, les utilisateurs s'étant familiarisés avec l'interface du Epson CX9400Fax sont plus enclins à penser qu'ils pourraient améliorer leur performance avec de l'entraînement; cette différence se reflète sur le mode des histogrammes (« fortement d'accord » comparé à « d'accord ») des réponses aux questions [Q18] présentés aux sections 6.4.1 et 6.5.1, ainsi que sur leur moyenne (4.58 par rapport à 3.79)

Tableau 6.36 : Étude de la significativité statistique des différences entre les réponses aux énoncés de Likert [Q10] à [Q19], pour les deux interfaces matérielles connues

	Mann-Whitney		
	U	Z	p
[Q10-Q10] Différence entre la facilité de réalisation de la tâche.	67.000	-0.962	0.336
[Q11-Q11] Différence entre la facilité d'apprentissage et de compréhension des interfaces.	75.000	-0.579	0.563
[Q12-Q12] Différence entre l'efficacité des interfaces.	78.000	-0.383	0.702
[Q13-Q13] Différence entre l'efficience des interfaces.	66.500	-1.157	0.247

Tableau 6.36 : Étude de la significativité statistique des différences entre les réponses aux énoncés de Likert [Q10] à [Q19], pour les deux interfaces matérielles connues (suite)

[Q14-Q14] Différence entre l'aspect plaisant des interfaces.	75.000	-0.512	0.609
[Q15-Q15] Différence entre les réponses aux attentes.	74.000	-0.669	0.504
[Q16-Q16] Différence entre les efforts requis pour interagir avec les interfaces.	80.000	-0.218	0.828
[Q17-Q17] Différence entre la satisfaction face aux performances obtenues.	80.000	-0.230	0.818
[Q18-Q18] Différence entre les propensions à admettre une augmentation de la rapidité suite à un entraînement.	43.000	-2.294	0.020
[Q19-Q19] Différence entre les propensions à admettre une diminution de l'effort déployé suite à un entraînement.	75.000	-0.504	0.614

6.9.2 Comparaison entre les interfaces matérielles inconnues

Nous comparons, dans cette section, l'interface matérielle du Canon MP750 à celle du Epson CX9400Fax, lorsqu'inconnues des utilisateurs.

Variables continues

Pour déterminer si nous pouvons recourir à des tests paramétriques pour comparer les variables continues recueillies (temps d'exécution, nombre d'erreurs, charges perçues et effort moyen déployé), nous proposons au Tableau 6.37, une étude de leur distribution. Comme le ratio du coefficient d'asymétrie sur l'erreur standard se situe à l'extérieur de l'intervalle [-2; 2] pour le temps d'exécution face au Canon MP750, nous devons rejeter l'hypothèse nulle d'une distribution normale pour cette variable. Quant aux autres

variables, nous pourrons supposer qu'elles se conforment à une distribution normale; même les tests de Shapiro-Wilk de normalité (cf. Tableau 6.38) ne nous permettent pas de rejeter cette hypothèse.

Tableau 6.37 : Analyse de l'asymétrie et de l'aplatissement des distributions des variables continues recueillies (interfaces matérielles Canon et Epson inconnues)

	Asymétrie			Aplatissement		
	Stat	Erreur	S/E	Stat	Erreur	S/E
[TCI] Temps d'exécution (Canon inconnue)	-0.039	0.637	-0.061	-0.404	1.232	-0.327
[TEI] Temps d'exécution (Epson inconnue)	1.337	0.597	2.239	1.370	1.154	1.187
[ECI] Erreurs commises (Canon inconnue)	0.508	0.637	0.797	0.511	1.232	0.415
[EEI] Erreurs commises (Epson inconnue)	0.947	0.597	1.585	0.840	1.154	0.728
[Q45b] Charge mentale (Canon inconnue)	-0.404	0.637	-0.634	-0.711	1.232	-0.577
[Q45b] Charge mentale (Epson inconnue)	-0.444	0.597	-0.743	-1.028	1.154	-0.891
[Q46b] Charge physique (Canon inconnue)	-0.012	0.637	-0.019	-1.287	1.232	-1.044
[Q46b] Charge physique (Epson inconnue)	0.054	0.597	0.091	-0.175	1.154	-0.151
[Q47b] Effort moyen (Canon inconnue)	-0.257	0.637	-0.404	-1.068	1.232	-0.867
[Q47b] Effort moyen (Epson inconnue)	0.252	0.597	0.421	-1.533	1.154	-1.328

Tableau 6.38 : Tests de normalité de Shapiro-Wilk sur les variables continues recueillies (interfaces matérielles Canon et Epson inconnues)

	Shapiro-Wilk		
	W	DOF	p
[TCI] Temps d'exécution (Canon inconnue)	0.959	12	0.776
[TEI] Temps d'exécution (Epson inconnue)	0.195	14	0.036
[ECI] Erreurs commises (Canon inconnue)	0.929	12	0.295
[EEI] Erreurs commises (Epson inconnue)	0.940	14	0.498
[Q45b] Charge mentale (Canon inconnue)	0.944	12	0.550
[Q45b] Charge mentale (Epson inconnue)	0.914	14	0.178
[Q46b] Charge physique (Canon inconnue)	0.953	12	0.678
[Q46b] Charge physique (Epson inconnue)	0.968	14	0.846
[Q47b] Effort moyen (Canon inconnue)	0.953	12	0.689
[Q47b] Effort moyen (Epson inconnue)	0.894	14	0.092

Comme nous ne pouvons pas défendre la normalité du temps d'exécution face à l'interface matérielle Epson inconnue, nous aurons recours à un test non paramétrique de Mann-Whitney entre deux échantillons indépendants pour étudier la significativité statistique de la différence entre les temps d'exécution recueillis (cf. Tableau 6.39). En ce qui a trait à l'étude des différences entre les autres variables, dont la normalité ne peut être rejetée, nous pourrons utiliser des T tests de Student non pairés, plus puissants (cf. Tableau 6.40).

Tableau 6.39 : Étude de la significativité statistique des différences entre les temps d'exécution, pour les deux interfaces matérielles inconnues

	Mann-Whitney		
	U	Z	p
[TCI-TEI] Différence entre les temps d'exécution.	8.500	-3.884	0.000

Tableau 6.40 : Étude de la significativité statistique des différences entre les nombres d'erreurs commises, les charges perçues et les efforts moyens déployés, pour les deux interfaces matérielles inconnues

	T test de Student		
	T	DOF	p
[ECI-EEI] Différence entre les erreurs commises. Note : variances différentes	4.154	14.553	0.001
[Q45b-Q45b] Différence entre les charges mentales.	-0.739	24.000	0.467
[Q46b-Q46b] Différence entre les charges physiques. Note : variances différentes	-0.546	15.647	0.593
[Q47b-Q47b] Différence entre les efforts moyens.	-0.208	24.000	0.837

Suite à cette comparaison, nous pouvons affirmer que :

- le temps d'exécution de la tâche face à l'interface matérielle du Epson CX9400Fax est nettement plus long que face à l'interface matérielle du Canon MP750, lorsque les deux sont inconnues des utilisateurs. Cette différence moyenne de 155.6 secondes (représentant une augmentation de 179.4%) est statistiquement hautement significative;

- le nombre d'erreurs commises face à l'interface matérielle du Epson CX9400Fax est nettement plus élevé que face à l'interface matérielle du Canon MP750, lorsque les deux sont inconnues des utilisateurs. Cette différence moyenne de 6.8 erreurs par tâche (représentant une augmentation de 209.8%) est statistiquement hautement significative.

Variables ordinaires

Le Tableau 6.41 propose une étude de la significativité statistique des différences entre les réponses [Q21] à [Q30] du questionnaire, pour les interfaces matérielles inconnues. Nous avons encore eu recours à des tests non paramétriques de Mann-Whitney pour deux échantillons indépendants, étant donné que nous étudions des variables ordinaires. La seule différence statistiquement significative à noter se situe au niveau de la facilité de compréhension des interfaces inconnues. En effet, l'interface matérielle du Canon MP750 semble plus facile à comprendre que celle du Epson CX9400Fax; cette différence se reflète sur les modes (« ni en accord/ni en désaccord ») comparé à « en désaccord ») et les moyennes (2.86 par rapport à 2.08) des histogrammes des réponses aux questions [Q22] présentés aux sections 6.4.2 et 6.5.2. Notons finalement, même si la probabilité (0.082) de rejeter l'hypothèse nulle n'est pas statistiquement significative comparé au seuil fixé (0.05), qu'il semble y avoir une différence entre l'effort requis pour interagir avec chaque interface inconnue ([Q27]); cette différence indiquerait que

l'interface du Epson CX9400Fax exige une plus grande réflexion de la part des utilisateurs.

Tableau 6.41 : Étude de la significativité statistique des différences entre les réponses aux énoncés de Likert [Q21] à [Q30], pour les deux interfaces matérielles inconnues

	Mann-Whitney		
	U	Z	p
[Q21-Q21] Différence entre la facilité de réalisation de la tâche.	76.500	-0.410	0.682
[Q22-Q22] Différence entre la facilité d'apprentissage et de compréhension des interfaces.	47.000	-2.028	0.043
[Q23-Q23] Différence entre l'efficacité des interfaces.	68.500	-0.830	0.407
[Q24-Q24] Différence entre l'efficience des interfaces.	67.000	-0.966	0.334
[Q25-Q25] Différence entre l'aspect plaisant des interfaces.	70.000	-0.752	0.452
[Q26-Q26] Différence entre les réponses aux attentes.	79.500	-0.243	0.808
[Q27-Q27] Différence entre les efforts requis pour interagir avec les interfaces.	54.500	-1.740	0.082
[Q28-Q28] Différence entre la satisfaction face aux performances obtenues.	61.000	-1.276	0.202
[Q29-Q29] Différence entre les propensions à admettre une augmentation de la rapidité suite à un entraînement.	83.000	-0.61	0.951
[Q30-Q30] Différence entre les propensions à admettre une diminution de l'effort déployé suite à un entraînement.	55.500	-1.634	0.102

6.9.3 Comparaison des interfaces connues à leur contrepartie virtuelle

Nous comparons, dans cette section, les interfaces matérielles du Canon MP750 et du Epson CX9400Fax, lorsque connues des utilisateurs, à leur contrepartie virtuelle.

Variables continues

Comme la majorité des mesures continues recueillies face aux interfaces matérielles connues ne semblent pas suivre une loi normale (cf. section 6.9.1), nous aurons recours, dans notre étude de la significativité statistique de leurs différences face aux interfaces virtuelles, aux tests non paramétriques des rangs signés de Wilcoxon, entre deux échantillons pairés (cf. Tableau 5.9). Nous présentons respectivement ci-dessous, aux tableaux 6.42 et 6.43, les comparaisons statistiques entre les variables continues d'intérêt, pour les interfaces du Canon MP750 et celles du Epson CX9400Fax.

Tableau 6.42 : Étude de la significativité statistique des différences entre les temps d'exécution, les nombres d'erreurs commises, les charges perçues et les efforts moyens déployés, entre l'interface matérielle connue du Canon et sa contrepartie virtuelle

	Rangs signés de Wilcoxon	
	Z	p
[TCC-TCV] Différence entre les temps d'exécution.	-2.826	0.005
[ECC-ECV] Différence entre les erreurs commises.	-0.586	0.558
[Q45a-Q45c] Différence entre les charges mentales.	-1.789	0.074
[Q46a-Q46c] Différence entre les charges physiques	-2.919	0.004
[Q47a-Q47c] Différence entre les efforts moyens.	-1.758	0.079

Tableau 6.43 : Étude de la significativité statistique des différences entre les temps d'exécution, les nombres d'erreurs commises, les charges perçues et les efforts moyens déployés, entre l'interface matérielle connue du Epson et sa contrepartie virtuelle

	Rangs signés de Wilcoxon	
	Z	p
[TEC-TEV] Différence entre les temps d'exécution.	-2.826	0.005
[EEC-EEV] Différence entre les erreurs commises.	-0.816	0.414
[Q45a-Q45c] Différence entre les charges mentales.	-2.433	0.015
[Q46a-Q46c] Différence entre les charges physiques	-2.936	0.003
[Q47a-Q47c] Différence entre les efforts moyens.	-2.589	0.010

Suite à cette comparaison, nous pouvons affirmer que :

- le temps d'exécution de la tâche face aux interfaces virtuelles est plus long que celui face à leur contrepartie matérielle. Ces différences moyennes, de 21.0 secondes (représentant une augmentation de 32.1%) entre l'interface matérielle du Epson CX9400Fax et sa contrepartie virtuelle, et de 25.1 secondes (représentant une augmentation de 52.8%) entre l'interface matérielle du Canon MP750 et sa contrepartie virtuelle, sont statistiquement très significatives;
- le nombre d'erreurs commises face aux interfaces virtuelles n'est pas statistiquement différent du nombre d'erreurs commises face à leur contrepartie matérielle respective;

- le recours à une interface virtuelle augmente de façon statistiquement significative la charge mentale et physique perçue, ainsi que l'effort déployé (cf. Tableau 6.44).

Tableau 6.44 : Augmentation de la charge mentale et physique perçue, et de l'effort moyen déployé, lors d'interactions avec une interface virtuelle connue, par rapport à sa contrepartie matérielle

	Canon MP750	Epson CX9400Fax
Différence entre les charges mentales perçues (interface virtuelle – interface matérielle)	14.7% (↑ de 29.5%)	19.8% (↑ de 53.8%)
Différence entre les charges physiques perçues (interface virtuelle – interface matérielle)	37.4% (↑ de 145.7%)	26.2% (↑ de 104.3%)
Différence entre les efforts moyens déployés (interface virtuelle – interface matérielle)	16.4% (↑ de 47.7%)	27.48 (↑ de 88.1%)

Variables ordinaires

Les tableaux 6.45 et 6.46 proposent une étude de la significativité statistique des différences entre les réponses [Q10] à [Q19] et les réponses [Q32] à [Q41] du questionnaire, pour comparer les deux interfaces matérielles connues à leur contrepartie virtuelle respective. Nous avons encore eu recours aux tests non paramétriques des rangs signés de Wilcoxon, entre deux échantillons pairés, étant donné que nous étudions des variables ordinaires.

Les trois différences significatives à noter, entre l'interface matérielle et l'interface virtuelle du Canon MP750, se situent au niveau :

- de la facilité à accomplir la tâche, où les participants identifient l'interface matérielle comme légèrement plus facile à utiliser que l'interface virtuelle. Cette différence se reflète dans les moyennes (4.43 comparé à 3.64) des histogrammes des réponses aux questions [Q10] et [Q32] présentés aux sections 6.4.1 et 6.4.3, bien que leur mode se situent tous deux à « d'accord »;
- de la perception de l'efficacité de l'interface, où les utilisateurs déclassent l'interface virtuelle d'un niveau, par rapport à l'interface matérielle. Cette différence se reflète dans les modes (« fortement d'accord » comparé à « d'accord ») et les moyennes (4.71 comparé à 4.07) des histogrammes des réponses aux questions [Q12] et [Q34] présentés aux sections 6.4.1 et 6.4.3;
- et du sentiment des utilisateurs, suite à un entraînement, à pouvoir davantage réduire l'effort déployé face à l'interface virtuelle que face à l'interface matérielle. Cette différence se reflète dans les modes (« fortement d'accord » comparé à « d'accord ») et les moyennes (4.57 comparé à 4.00) des histogrammes des réponses aux questions [Q19] et [Q41] présentés aux sections 6.4.1 et 6.4.3.

Tableau 6.45 : Étude de la significativité statistique des différences entre les réponses aux énoncés de Likert [Q10] à [Q19] et les réponses aux énoncés de Likert [Q32] à [Q41], entre l'interface matérielle connue du Canon et sa contrepartie virtuelle

	Rangs signés de Wilcoxon	
	Z	P
[Q10-Q32] Différence entre la facilité de réalisation de la tâche.	-2.209	0.027
[Q11-Q33] Différence entre la facilité d'apprentissage et de compréhension des interfaces.	-0.707	0.480
[Q12-Q34] Différence entre l'efficacité des interfaces.	-2.310	0.021
[Q13-Q35] Différence entre l'efficience des interfaces.	-1.732	0.083
[Q14-Q36] Différence entre l'aspect plaisant des interfaces.	-1.823	0.068
[Q15-Q37] Différence entre les réponses aux attentes.	0.000	1.000
[Q16-Q38] Différence entre les efforts requis pour interagir avec les interfaces.	-1.742	0.082
[Q17-Q39] Différence entre la satisfaction face aux performances obtenues.	-1.667	0.096
[Q18-Q40] Différence entre les propensions à admettre une augmentation de la rapidité suite à un entraînement.	-1.732	0.083
[Q19-Q41] Différence entre les propensions à admettre une diminution de l'effort déployé suite à un entraînement.	-2.309	0.021

En ce qui a trait aux interfaces du Epson CX9400Fax, nous n'avons identifié qu'une seule différence statistiquement significative entre l'interface matérielle et sa contrepartie virtuelle, située au niveau de l'effort déployé pour accomplir la tâche demandée. Selon les réponses obtenues, l'interface matérielle exigerait moins d'effort

que sa contrepartie virtuelle. Cette différence se reflète sur les modes (« ni en accord/ni en désaccord » comparé à « en désaccord ») et les moyennes (3.00 par rapport à 2.08) des histogrammes des réponses aux questions [Q16] et [Q38] présentés aux sections 6.4.1 et 6.4.3.

Tableau 6.46 : Étude de la significativité statistique des différences entre les réponses aux énoncés de Likert [Q10] à [Q19] et les réponses aux énoncés de Likert [Q32] à [Q41], entre l'interface matérielle connue du Epson et sa contrepartie virtuelle

	Rangs signés de Wilcoxon	
	Z	P
[Q10-Q32] Différence entre la facilité de réalisation de la tâche.	-1.725	0.084
[Q11-Q33] Différence entre la facilité d'apprentissage et de compréhension des interfaces.	-1.342	0.180
[Q12-Q34] Différence entre l'efficacité des interfaces.	-1.667	0.096
[Q13-Q35] Différence entre l'efficience des interfaces	0.000	1.000
[Q14-Q36] Différence entre l'aspect plaisant des interfaces.	-0.175	0.861
[Q15-Q37] Différence entre les réponses aux attentes	-1.633	0.102
[Q16-Q38] Différence entre les efforts requis pour interagir avec les interfaces.	-2.145	0.032
[Q17-Q39] Différence entre la satisfaction face aux performances obtenues.	-1.265	0.206
[Q18-Q40] Différence entre les propensions à admettre une augmentation de la rapidité suite à un entraînement.	-0.816	0.414
[Q19-Q41] Différence entre les propensions à admettre une diminution de l'effort déployé suite à un entraînement.	-0.447	0.655

6.9.4 Comparaison des interfaces inconnues à leur alternative virtuelle

Nous comparons, dans cette section, chacune des deux interfaces matérielles, lorsqu'inconnues des utilisateurs, aux alternatives virtuelles proposées. Nous mettrons ainsi en opposition, dans un premier temps, l'interface matérielle inconnue du Canon MP750 à l'interface virtuelle connue calquée sur le Epson CX9400Fax et, dans un deuxième temps, l'interface matérielle inconnue du Epson CX9400Fax à l'interface virtuelle connue calquée sur le Canon MP750.

Variables continues

Pour déterminer si nous pouvons recourir à des tests paramétriques faisant appel aux variables continues recueillies face aux interfaces virtuelles connues (temps d'exécution, nombre d'erreurs, charges perçues et effort moyen déployé), nous proposons, aux tableaux 6.47 et 6.48, une étude de leur distribution. Comme les ratios des coefficients d'asymétrie et d'aplatissement sur l'erreur standard se situent à l'extérieur de l'intervalle [-2; 2] pour la majorité des variables d'intérêt, nous n'avons d'autres choix que de rejeter l'hypothèse nulle de leur normalité, tant en ce qui a trait à l'interface virtuelle du Canon MP750 qu'à celle du Epson CX9400Fax. Face à cette conclusion, il nous faudra délaisser l'utilisation de T tests de Student et nous tourner, pour étudier la significativité statistique des différences entre les mesures recueillies, entre les interfaces virtuelles connues et les interfaces matérielles inconnues, vers tests non paramétriques pairés de Wilcoxon (cf. tableaux 6.49 et 6.50), et ce, même si les variables continues recueillies

face aux interfaces matérielles inconnues sont distribuées normalement (cf. section 6.9.2).

Tableau 6.47 : Analyse de l'asymétrie et de l'aplatissement des distributions des variables continues recueillies (interface virtuelle connue calquée sur le Canon MP750)

	Asymétrie			Aplatissement		
	Stat	Erreur	S/E	Stat	Erreur	S/E
[TCV] Temps d'exécution	1.030	0.597	1.723	-0.370	1.154	-0.320
[ECV] Erreurs commises	2.114	0.597	3.538	4.994	1.154	4.328
[Q45c] Charge mentale	-1.327	0.597	-2.221	1.057	1.154	0.916
[Q46c] Charge physique	-1.298	0.597	-2.173	1.627	1.154	1.409
[Q47c] Effort moyen	0.156	0.597	0.262	0.127	1.154	0.110

Tableau 6.48 : Analyse de l'asymétrie et de l'aplatissement des distributions des variables continues recueillies (interface virtuelle connue calquée sur le Epson CX9400Fax)

	Asymétrie			Aplatissement		
	Stat	Erreur	S/E	Stat	Erreur	S/E
[TCV] Temps d'exécution	2.288	0.637	3.590	5.707	1.232	4.631
[ECV] Erreurs commises	1.945	0.637	3.052	4.370	1.232	3.546
[Q45c] Charge mentale	0.454	0.637	0.712	-1.511	1.232	-1.227
[Q46c] Charge physique	-0.238	0.637	-0.374	-0.959	1.232	-0.779
[Q47c] Effort moyen	-0.512	0.637	-0.803	-0.051	1.232	-0.042

Tableau 6.49 : Étude de la significativité statistique des différences entre les temps d'exécution, les nombres d'erreurs commises, les charges perçues et les efforts moyens déployés, entre l'interface matérielle inconnue du Canon MP750 et l'interface virtuelle connue calquée sur le Epson CX9400Fax

Rangs signés de Wilcoxon		
	Z	p
[TCI-TEV] Différence entre les temps d'exécution.	-0.196	0.844
[ECI-EEV] Différence entre les erreurs commises.	-2.956	0.003
[Q45b-Q45c] Différence entre les charges mentales.	-2.590	0.010
[Q46b-Q46c] Différence entre les charges physiques	-0.593	0.553
[Q47b-Q47c] Différence entre les efforts moyens.	-1.245	0.213

Tableau 6.50 : Étude de la significativité statistique des différences entre les temps d'exécution, les nombres d'erreurs commises, les charges perçues et les efforts moyens déployés, entre l'interface matérielle inconnue du Epson CX9400Fax et l'interface virtuelle connue calquée sur le Canon MP750

Rangs signés de Wilcoxon		
	Z	p
[TEI-TCV] Différence entre les temps d'exécution.	-3.296	0.001
[EEI-ECV] Différence entre les erreurs commises.	-3.298	0.001
[Q45b-Q45c] Différence entre les charges mentales.	-2.103	0.035
[Q46b-Q46c] Différence entre les charges physiques	-1.759	0.079
[Q47b-Q47c] Différence entre les efforts moyens.	-2.041	0.041

Suite à ces comparaisons, nous pouvons affirmer que :

- le temps d'exécution de la tâche, face à l'interface virtuelle connue calquée sur le Canon MP750, est plus court que face à l'interface matérielle inconnue du Epson CX9400Fax. Cette différence moyenne de 169.7 secondes (représentant une diminution de 70.0%) est statistiquement hautement significative;
- les nombres d'erreurs commises, face aux interfaces matérielles inconnues, sont nettement plus élevés que face aux interfaces virtuelles connues. Ces différences de 9.4 erreurs (correspondant à une augmentation de 1318.3%) et de 2.7 erreurs (correspondant à une augmentation de 460.3%) par tâche, face à l'interface matérielle du Epson CX9400Fax et du Canon MP750, sont respectivement statistiquement hautement et très significatives;
- les charges mentales perçues, lors de la réalisation de la tâche, face aux interfaces matérielles inconnues, sont nettement plus élevées que face aux interfaces virtuelles connues. Ces différences de 16.0% (correspondant à une augmentation de 24.7%) et de 27.8% (correspondant à une augmentation de 49.3%), face à l'interface matérielle du Epson CX9400Fax et du Canon MP750, sont statistiquement très significatives;
- l'effort moyen déployé, face à l'interface virtuelle connue calquée sur le Canon MP750, est inférieur à celui déployé face à l'interface matérielle inconnue du Epson CX9400Fax. Cette différence moyenne de 17.1% (représentant une diminution de 25.2%) est statistiquement significative.

Variables ordinales

Les tableaux 6.51 et 6.52 proposent une étude de la significativité statistique des différences entre les réponses [Q21] à [Q30] et les réponses [Q32] à [Q41], pour comparer les deux interfaces matérielles inconnues aux alternatives virtuelles que nous avons proposées aux utilisateurs. Nous avons encore eu recours aux tests non paramétriques des rangs signés de Wilcoxon, entre deux échantillons pairés, étant donné que nous étudions des variables ordinales. Le Tableau 6.53 résume les différences significatives détectées entre l'interface matérielle inconnue du Canon MP750 et l'interface virtuelle connue calquée sur le Epson CX9400Fax. Quant au Tableau 6.54, il présente les différences significatives détectées entre l'interface matérielle inconnue du Epson CX9400Fax et l'interface virtuelle connue calquée sur le Canon MP750.

Tableau 6.51 : Étude de la significativité statistique des différences entre les réponses aux énoncés de Likert [Q21] à [Q30] et les réponses aux énoncés de Likert [Q32] à [Q41], entre l'interface matérielle inconnue du Canon MP750 et l'interface virtuelle connue calquée sur le Epson CX9400Fax

	Rangs signés de Wilcoxon	
	Z	P
[Q21-Q32] Différence entre la facilité de réalisation de la tâche.	-2.459	0.014

Tableau 6.51 : Étude de la significativité statistique des différences entre les réponses aux énoncés de Likert [Q21] à [Q30] et les réponses aux énoncés de Likert [Q32] à [Q41], entre l'interface matérielle inconnue du Canon MP750 et l'interface virtuelle connue calquée sur le Epson CX9400Fax (suite)

[Q22-Q33] Différence entre la facilité d'apprentissage et de compréhension des interfaces.	-3.090	0.002
[Q23-Q34] Différence entre l'efficacité des interfaces.	-1.445	0.149
[Q24-Q35] Différence entre l'efficience des interfaces.	-2.277	0.023
[Q25-Q36] Différence entre l'aspect plaisant des interfaces.	-2.364	0.018
[Q26-Q37] Différence entre les réponses aux attentes.	-2.381	0.017
[Q27-Q38] Différence entre les efforts requis pour interagir avec les interfaces.	-1.827	0.068
[Q28-Q39] Différence entre la satisfaction face aux performances obtenues.	-2.836	0.005
[Q29-Q40] Différence entre les propensions à admettre une augmentation de la rapidité suite à un entraînement.	-0.431	0.666
[Q30-Q41] Différence entre les propensions à admettre une diminution de l'effort déployé suite à un entraînement.	-0.680	0.496

Tableau 6.52 : Étude de la significativité statistique des différences entre les réponses aux énoncés de Likert [Q21] à [Q30] et les réponses aux énoncés de Likert [Q32] à [Q41], entre l'interface matérielle inconnue du Epson CX9400Fax et l'interface virtuelle connue calquée sur le Canon MP750

	Rangs signés de Wilcoxon	
	Z	P
[Q21-Q32] Différence entre la facilité de réalisation de la tâche.	-2.263	0.024
[Q22-Q33] Différence entre la facilité d'apprentissage et de compréhension des interfaces.	-2.994	0.003
[Q23-Q34] Différence entre l'efficacité des interfaces.	-1.095	0.273
[Q24-Q35] Différence entre l'efficience des interfaces.	-2.754	0.006
[Q25-Q36] Différence entre l'aspect plaisant des interfaces.	-2.289	0.022
[Q26-Q37] Différence entre les réponses aux attentes.	-2.901	0.004
[Q27-Q38] Différence entre les efforts requis pour interagir avec les interfaces.	-1.709	0.088
[Q28-Q39] Différence entre la satisfaction face aux performances obtenues.	-2.709	0.007
[Q29-Q40] Différence entre les propensions à admettre une augmentation de la rapidité suite à un entraînement.	-1.155	0.248
[Q30-Q41] Différence entre les propensions à admettre une diminution de l'effort déployé suite à un entraînement.	-1.387	0.166

Tableau 6.53 : Différences significatives détectées entre l'interface matérielle inconnue du Canon MP750 et l'interface virtuelle connue calquée sur le Epson CX9400Fax

	Significativité statistique	Moyenne des réponses face à l'interface matérielle inconnue du Canon MP750	Moyenne des réponses face à l'interface virtuelle connue du Epson CX9400Fax
[Q21 & Q32] Il a été facile de réaliser la tâche.	Significatif	2.25	3.58
[Q22 & Q33] Le fonctionnement de l'interface a été facile à apprendre / comprendre.	Très significatif	2.08	4.50
[Q24 & Q35] L'interface est efficiente.	Significatif	2.50	3.83
[Q25 & Q36] L'interface est plaisante à utiliser.	Significatif	2.33	4.00
[Q26 & Q37] L'interface répond à mes attentes.	Significatif	2.42	4.00
[Q28 & Q39] Je suis insatisfait de ma performance.	Très significatif	3.92	2.25

Tableau 6.54 : Différences significatives détectées entre l'interface matérielle inconnue du Epson CX9400Fax et l'interface virtuelle connue calquée sur le Canon MP750

	Significativité statistique	Moyenne des réponses face à l'interface matérielle inconnue du Epson CX9400Fax	Moyenne des réponses face à l'interface virtuelle connue du Canon MP750
[Q21 & Q32] Il a été facile de réaliser la tâche.	Significatif	2.43	3.64
[Q22 & Q33] Le fonctionnement de l'interface a été facile à apprendre / comprendre.	Très significatif	2.86	4.50
[Q24 & Q35] L'interface est efficiente.	Très significatif	2.29	3.57
[Q25 & Q36] L'interface est plaisante à utiliser.	Significatif	2.71	3.64
[Q26 & Q37] L'interface répond à mes attentes.	Très significatif	2.57	4.21
[Q28 & Q39] Je suis insatisfait de ma performance.	Très significatif	3.43	2.07

6.9.5 Comparaison des interfaces connues à leur alternative virtuelle

Nous comparons, dans cette section, chacune des deux interfaces matérielles, lorsque connues des utilisateurs, aux alternatives virtuelles proposées. Nous mettrons ainsi en opposition, dans un premier temps, l'interface matérielle connue du Canon MP750 à l'interface virtuelle connue calquée sur le Epson CX9400Fax et, dans un deuxième

temps, l'interface matérielle connue du Epson CX9400Fax à l'interface virtuelle connue calquée sur le Canon MP750.

Variables continues

Comme la majorité des mesures continues recueillies face aux interfaces matérielles connues et face aux interfaces virtuelles ne semblent pas suivre une loi normale (cf. section 6.9.1 et 6.9.4), nous aurons recours, dans notre étude de la significativité statistique de leurs différences, à des tests non paramétriques de Mann-Whitney, entre deux échantillons indépendants. Nous présentons ci-dessous, aux tableaux 6.55 et 6.56, les comparaisons statistiques entre les variables continues d'intérêt.

Tableau 6.55 : Étude de la significativité statistique des différences entre les temps d'exécution, les nombres d'erreurs commises, les charges perçues et les efforts moyens déployés, entre l'interface matérielle connue du Canon MP750 et l'interface virtuelle connue calquée sur le Epson CX9400Fax

	Mann-Whitney		
	U	Z	P
[TCC-TEV] Différence entre les temps d'exécution.	13.500	-3.628	0.000
[ECC-EEV] Différence entre les erreurs commises.	75.500	-0.519	0.604
[Q45a-Q45c] Différence entre les charges mentales.	76.000	-0.412	0.680
[Q46a-Q46c] Différence entre les charges physiques.	46.000	-1.956	0.051
[Q47a-Q47c] Différence entre les efforts moyens.	34.000	-2.574	0.010

Tableau 6.56 : Étude de la significativité statistique des différences entre les temps d'exécution, les nombres d'erreurs commises, les charges perçues et les efforts moyens déployés, entre l'interface matérielle connue du Epson CX9400Fax et l'interface virtuelle connue calquée sur le Canon MP750

	Mann-Whitney		
	U	Z	P
[TEC-TCV] Différence entre les temps d'exécution.	54.500	-1.279	0.201
[EEC-ECV] Différence entre les erreurs commises.	72.000	-0.372	0.710
[Q45a-Q45c] Différence entre les charges mentales.	24.500	-3.062	0.002
[Q46a-Q46c] Différence entre les charges physiques.	14.500	-3.457	0.001
[Q47a-Q47c] Différence entre les efforts moyens.	37.000	-2.231	0.026

Suite à cette comparaison, nous pouvons affirmer que :

- le temps d'exécution de la tâche, face à l'interface virtuelle connue calquée sur le Epson CX9400Fax, est nettement plus long que face à l'interface matérielle connue du Canon MP750. Cette différence moyenne de 38.9 secondes (représentant une augmentation de 81.7%) est statistiquement hautement significative;
- le temps d'exécution de la tâche, face à l'interface virtuelle connue calquée sur le Canon MP750, n'est pas statistiquement différent de celui mesuré face à l'interface matérielle connue du Epson CX9400Fax;

- les nombres d'erreurs commises face aux interfaces matérielles connues ne sont pas statistiquement différents des nombres d'erreurs commises face aux alternatives virtuelles connues proposées;
- la charge mentale perçue, lors de la réalisation de la tâche face à l'interface virtuelle connue calquée sur le Epson CX9400Fax, n'est pas statistiquement différente de celle perçue face à l'interface matérielle connue du Canon MP750;
- la charge mentale perçue, lors de la réalisation de la tâche face à l'interface virtuelle connue calquée sur le Canon MP750, est supérieure à celle perçue face à l'interface matérielle connue du Epson CX9400Fax. Cette différence moyenne de 28.0% (représentant une augmentation de 76.3%) est statistiquement très significative;
- les charges physiques perçues, lors de la réalisation de la tâche face aux interfaces virtuelles connues, sont nettement plus élevées que face aux interfaces matérielles connues. Ces différences de 37.9% (correspondant à une augmentation de 150.6%) et de 25.7% (correspondant à une augmentation de 100.3%), face à l'interface matérielle du Epson CX9400Fax et du Canon MP750, sont statistiquement hautement significative et significative;
- les efforts moyens déployés, lors de la réalisation de la tâche face aux interfaces virtuelles connues, sont nettement plus élevés que face aux interfaces matérielles connues. Ces différences de 19.5% (correspondant à une augmentation de 62.6%) et de 24.3% (correspondant à une augmentation de 70.9%), face à

l'interface matérielle du Epson CX9400Fax et du Canon MP750, sont statistiquement très significatives.

Variables ordinales

Les tableaux 6.57 et 6.58 proposent une étude de la significativité statistique des différences entre les réponses [Q10] à [Q19] et les réponses [Q32] à [Q41], pour comparer les deux interfaces matérielles connues aux alternatives virtuelles que nous avons proposées aux utilisateurs. Nous avons encore eu recours à des tests non paramétriques de Mann-Whitney, entre deux échantillons indépendants, étant donné que nous étudions des variables ordinaires. Le Tableau 6.59 résume les différences significatives détectées entre l'interface matérielle connue du Canon MP750 et l'interface virtuelle connue calquée sur le Epson CX9400Fax. Quant au Tableau 6.60, il présente les différences significatives détectées entre l'interface matérielle connue du Epson CX9400Fax et l'interface virtuelle connue calquée sur le Canon MP750.

Tableau 6.57 : Étude de la significativité statistique des différences entre les réponses aux énoncés de Likert [Q10] à [Q19] et les réponses aux énoncés de Likert [Q32] à [Q41], entre l'interface matérielle connue du Canon MP750 et l'interface virtuelle connue calquée sur le Epson CX9400Fax

	Mann-Whitney		
	U	Z	p
[Q10-Q32] Différence entre la facilité de réalisation de la tâche.	39.000	-2.319	0.020
[Q11-Q33] Différence entre la facilité d'apprentissage et de compréhension des interfaces.	69.000	-0.569	0.569
[Q12-Q34] Différence entre l'efficacité des interfaces.	36.000	-2.594	0.009
[Q13-Q35] Différence entre l'efficience des interfaces	67.500	-0.650	0.516
[Q14-Q36] Différence entre l'aspect plaisant des interfaces.	73.500	-0.265	0.791
[Q15-Q37] Différence entre les réponses aux attentes	69.500	-0.654	0.573
[Q16-Q38] Différence entre les efforts requis pour interagir avec les interfaces.	40.000	-2.207	0.027
[Q17-Q39] Différence entre la satisfaction face aux performances obtenues.	42.500	-2.265	0.024
[Q18-Q40] Différence entre les propensions à admettre une augmentation de la rapidité suite à un entraînement.	49.000	-1.694	0.090
[Q19-Q41] Différence entre les propensions à admettre une diminution de l'effort déployé suite à un entraînement.	65.500	-0.748	0.454

Tableau 6.58 : Étude de la significativité statistique des différences entre les réponses aux énoncés de Likert [Q10] à [Q19] et les réponses aux énoncés de Likert [Q32] à [Q41], entre l'interface matérielle connue du Epson CX9400Fax et l'interface virtuelle connue calquée sur le Canon MP750

	Mann-Whitney		
	U	Z	p
[Q10-Q32] Différence entre la facilité de réalisation de la tâche.	52.000	-1.515	0.130
[Q11-Q33] Différence entre la facilité d'apprentissage et de compréhension des interfaces.	60.000	-1.165	0.244
[Q12-Q34] Différence entre l'efficacité des interfaces.	44.500	-2.000	0.046
[Q13-Q35] Différence entre l'efficience des interfaces	62.500	-0.918	0.359
[Q14-Q36] Différence entre l'aspect plaisant des interfaces.	54.000	-1.413	0.158
[Q15-Q37] Différence entre les réponses aux attentes	68.000	-0.627	0.530
[Q16-Q38] Différence entre les efforts requis pour interagir avec les interfaces.	38.000	-2.239	0.025
[Q17-Q39] Différence entre la satisfaction face aux performances obtenues.	65.000	-0.747	0.455
[Q18-Q40] Différence entre les propensions à admettre une augmentation de la rapidité suite à un entraînement.	54.000	-1.482	0.138
[Q19-Q41] Différence entre les propensions à admettre une diminution de l'effort déployé suite à un entraînement.	58.500	-1.169	0.243

Tableau 6.59 : Différences significatives détectées entre l’interface matérielle connue du Canon MP750 et l’interface virtuelle connue calquée sur le Epson CX9400Fax

	Significativité statistique	Moyenne des réponses face à l’interface matérielle connue du Canon MP750	Moyenne des réponses face à l’interface virtuelle connue du Epson CX9400Fax
[Q10 & Q32] Il a été facile de réaliser la tâche.	Significatif	4.43	3.58
[Q12 & Q34] L’interface est efficace	Très significatif	4.71	4.08
[Q16 & Q38] L’effort requis pour interagir avec l’interface est important.	Significatif	2.14	3.00
[Q17 & Q39] Je suis insatisfait de ma performance.	Significatif	1.71	2.25

Tableau 6.60 : Différences significatives détectées entre l’interface matérielle connue du Epson CX9400Fax et l’interface virtuelle connue calquée sur celle du Canon MP750

	Significativité statistique	Moyenne des réponses face à l’interface matérielle connue du Epson CX9400Fax	Moyenne des réponses face à l’interface virtuelle connue du Canon MP750
[Q12 & Q34] L’interface est efficace	Significatif	4.58	4.07
[Q16 & Q38] L’effort requis pour interagir avec l’interface est important.	Significatif	2.08	3.00

6.10 Discussion

Nous discuterons, dans un premier temps, des différences notées entre les deux interfaces matérielles retenues, afin de désigner celle étant la plus appropriée pour réaliser la tâche demandée, par le bassin de population représenté. Nous nous pencherons ensuite sur le coût d'utilisation des interfaces virtuelles, telles qu'implémentées, pour quantifier leur proximité aux interfaces matérielles originelles. Ceci nous permettra, en remarquant que l'épaisseur de la couche limitatrice introduite par notre paradigme n'est pas si élevée, de démontrer que l'interface virtuelle calquée sur l'interface matérielle la plus performante peut aisément déclasser l'interface matérielle inconnue la plus faible et même s'approcher à son niveau, lorsque connue des utilisateurs. Nous conclurons finalement en analysant l'acceptation du paradigme proposé et en discutant des performances de notre plateforme.

6.10.1 Détermination de l'interface la plus appropriée pour la tâche

Comme nous l'anticions lors de l'élaboration de nos tests croisés, l'une des deux interfaces matérielles testées est plus appropriée pour réaliser la tâche demandée. Lorsqu'inconnues, l'interface du Canon Pixma MP750 est en effet nettement plus facile à utiliser que celle du Epson Stylus CX9400Fax. Ceci se traduit autant sur le plan des performances enregistrées (temps d'exécution et nombre d'erreurs commises statistiquement respectivement plus faibles de 64.2% et de 67.5%) qu'au niveau de l'impression des utilisateurs précisant que l'interface du Canon MP750 est plus facile à comprendre (cf. section 6.9.2). Lorsque connues, la supériorité de l'interface matérielle

du Canon MP750 s'estompe un peu mais continue toutefois à présenter des temps d'exécution statistiquement plus courts (de 27.3%) que ceux enregistrés face à l'interface connue du Epson CX9400Fax (cf. section 6.9.1). Cette différence continue même après plusieurs itérations de la tâche (cf. Figure 6.3 et Figure 6.4), où les temps d'exécution face à l'interface du Canon MP750 (estimés en moyenne à 12.4 secondes après 5 itérations) restent 33.6% inférieurs à ceux enregistrés face à l'interface du Epson CX9400Fax (estimés en moyenne à 18.7 secondes après 5 itérations). Cette supériorité peut être expliquée notamment en considérant la longueur des chemins à suivre pour compléter la tâche demandée, qui favorise l'interface du Canon (cf. Figure 5.6 et Figure 5.7). La méthode de sélection du facteur d'agrandissement sur l'interface du Epson, exigeant un long maintien du bouton « + », n'est aussi sûrement pas étrangère à son infériorité.

Ces constations, ciblant une famille d'appareils et un bassin de population précis dans notre étude, peuvent facilement être généralisées à plusieurs autres interfaces et appareils environnants, en considérant qu'il existera toujours une interface mieux adaptée à une tâche et à un profil d'utilisateurs donnés. En espérant que la couche limitatrice introduite lors de la virtualisation d'une telle interface optimale ne soit pas trop prononcée, cette contrepartie virtuelle pourrait être adoptée, grâce à notre paradigme, en tout lieu et en tout temps pour dialoguer de manière plus efficace avec différents appareils de la même famille, présentant des interfaces inférieures.

6.10.2 Coût d'utilisation des interfaces virtuelles

Pour quantifier la couche limitatrice introduite lors de la virtualisation des deux interfaces retenues dans notre étude, nous nous tournons vers les résultats obtenus à la section 6.9.3. Nous remarquons que, contrairement à ce que nous espérions (cf. section 5.1.1), les temps d'exécution, les efforts déployés et les charges mentale et physique perçues par les utilisateurs sont plus élevés face aux interfaces virtuelles que face aux interfaces matérielles originelles, lorsque connues des utilisateurs (cf. Tableau 6.61).

Tableau 6.61 : Augmentation des temps d'exécution, des charges mentale et physique perçues, et des efforts moyens déployés, lors d'interactions avec les interfaces virtuelles développées, par rapport à leur contrepartie matérielle, toutes connues des utilisateurs

	Pourcentage d'augmentation
Différence entre les temps d'exécution (interface virtuelle – interface matérielle)	Entre 32.1% et 52.8%
Différence entre les charges mentales perçues (interface virtuelle – interface matérielle)	Entre 29.5% et 53.8%
Différence entre les charges physiques perçues (interface virtuelle – interface matérielle)	Entre 104.3% et 145.7%
Différence entre les efforts moyens déployés (interface virtuelle – interface matérielle)	Entre 47.7% et 88.1%

Notons toutefois que ces augmentations ne sont pas dramatiques pour une étude préliminaire et :

- qu'une grande proportion de l'augmentation de l'effort moyen déployé face aux interfaces virtuelles semble provenir de la charge physique élevée ressentie par les utilisateurs en enfilant la plateforme non encore miniaturisée;
- qu'une portion du temps d'exécution mesuré, face aux interfaces virtuelles, peut être directement attribuée aux méthodes d'interactions retenues (cf. section 4.3.4). En recourant à une autre solution, nous pourrions sûrement réduire, voire supprimer, le délai d'activation de chaque composante, établi actuellement à 0.4 seconde. Cette correction nous permettrait de raccourcir de 6.4 secondes et de 8.0 secondes le temps pris pour activer les 16 composantes de l'interface virtuelle calquée sur le Canon MP750 et les 20 composantes de celle calquée sur le Epson CX9400Fax. Cette seule rectification nous amènerait à des temps d'exécution, après 5 itérations de la tâche, situés autour de 28.9 secondes pour l'interface virtuelle du Epson (comparé à 18.7 secondes pour sa contrepartie matérielle) et de 18.1 secondes pour l'interface virtuelle du Canon (comparé à 12.4 secondes pour sa contrepartie matérielle), comme montré à la Figure 6.5 et à la Figure 6.6.

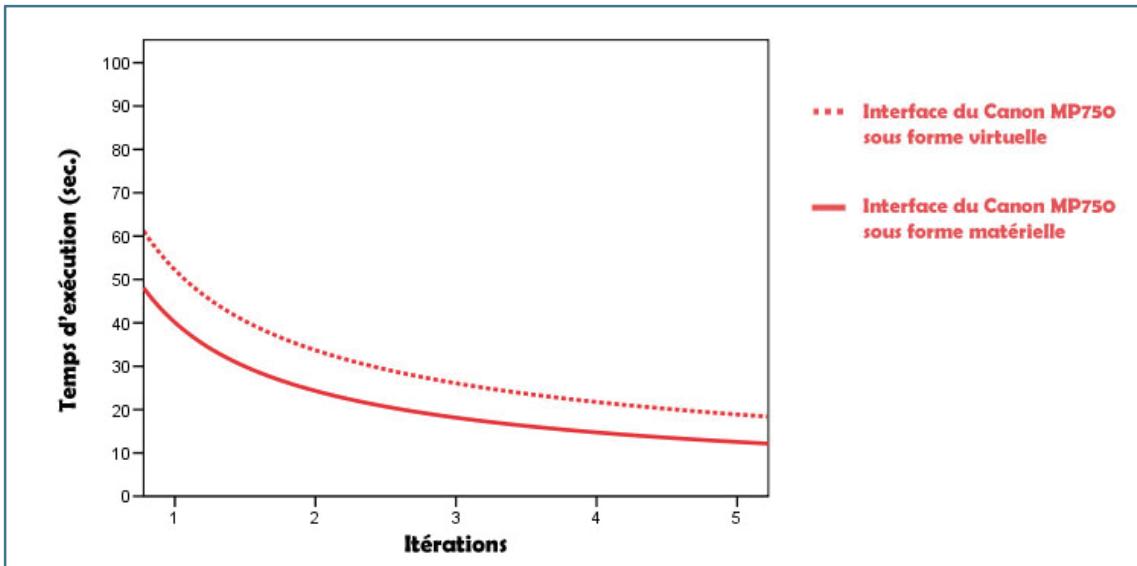


Figure 6.5 : Courbes d'apprentissage (interfaces Canon matérielle et virtuelle, rectifiée en éliminant les délais d'activation des composantes)

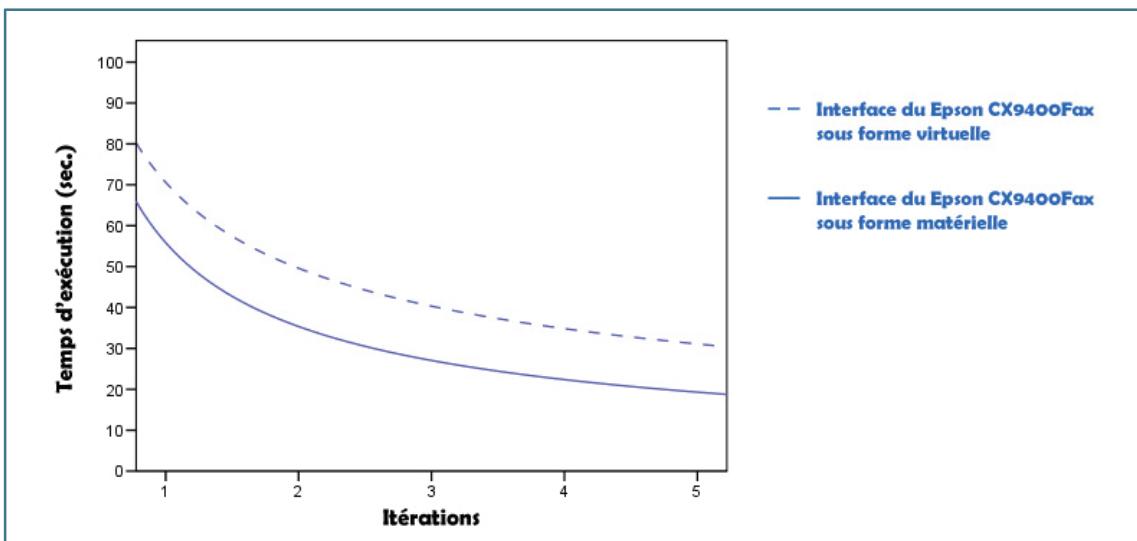


Figure 6.6 : Courbes d'apprentissage (interfaces Epson matérielle et virtuelle, rectifiée en éliminant les délais d'activation des composantes)

Notons aussi que le recours à une interface virtuelle, comparé à l'interface matérielle originelle, ne semble pas faire augmenter le nombre d'erreurs commises. Ceci peut être corroboré par les observations émises durant les tests, selon lesquelles les utilisateurs savent quelle entité de l'interface virtuelle activer, mais prennent plus de temps pour le faire. Cette difficulté, qui n'est pas attribuable à l'affichage et à la résolution des interfaces (étant donné que les interfaces virtuelles sont facilement visibles, si nous considérons les réponses statistiquement significatives des utilisateurs à la question [Q42] présentées à la section 6.8), pourrait provenir de la difficile perception des profondeurs sur un affichage monoscopique et de la faible familiarisation avec une telle plateforme pour interagir avec l'environnement. Mentionnons finalement, sur le plan a) de la satisfaction des utilisateurs face à leurs performances, b) des réponses à leurs attentes, c) de l'aspect plaisant des interfaces et d) de leur facilité de compréhension, qu'aucune différence significative n'a pu être notée entre les interfaces virtuelles et leur contrepartie matérielle. Ces résultats montrent clairement :

- que nous pouvons virtualiser fidèlement une interface matérielle donnée;
- que les différences actuelles en termes de temps d'exécution et de charges perçues, notamment au niveau physique, sont majoritairement issues de l'implémentation et des périphériques utilisés, et non du paradigme proposé.

Rappelons finalement que, même si les interfaces virtualisées ne peuvent encore concurrencer les interfaces matérielles originelles sur lesquelles elles ont été calquées (comme indiqué par les réponses statistiquement significatives des utilisateurs aux

questions [Q48], préférant toujours l'interface matérielle originelle à l'interface virtualisée), le paradigme avancé présente l'avantage de pouvoir reconfigurer les interfaces perçues. En mettant à profit cette caractéristique, nous pourrons proposer aux utilisateurs des interfaces intimement personnelles, qui seraient, certes, inférieures à des interfaces matérielles identiques, si elles existaient, mais qui présenteront l'avantage d'être bien réelles et peut-être plus utilisables que certaines interfaces matérielles génériques actuelles, comme nous le montrerons dans les prochaines sections.

6.10.3 Positionnement des interfaces virtuelles face aux interfaces inconnues

Il est clair, selon les réponses statistiquement significatives recueillies aux questions [Q48], que les utilisateurs préfèrent recourir aux interfaces virtuelles proposées, calquées sur une interface connue, que d'être forcés à découvrir une interface matérielle inconnue. Ces réponses placent en effet les interfaces virtuelles développées toujours au deuxième rang, en-dessous de l'interface matérielle originelle connue, mais au-dessus de l'interface matérielle inconnue. Cette préférence se reflète aussi au niveau des autres réponses aux énoncés de Likert (cf. tableaux 6.53 et 6.54), où les utilisateurs indiquent, de manière statistiquement significative :

- avoir eu **plus de facilité à réaliser la tâche** face aux interfaces virtuelles connues que face aux interfaces matérielles inconnues;
- avoir eu **plus de facilité à comprendre** les interfaces virtuelles connues que les interfaces matérielles inconnues;

- percevoir les interfaces virtuelles connues comme **plus efficientes** que les interfaces matérielles inconnues;
- trouver les interfaces virtuelles connues **plus plaisantes** que les interfaces matérielles inconnues;
- trouver que les interfaces virtuelles connues **répondent mieux à leurs attentes** que les interfaces matérielles inconnues;
- être **moins insatisfaits de leurs performances** face aux interfaces virtuelles connues que face aux interfaces matérielles inconnues.

Cette supériorité des interfaces virtuelles développées face aux interfaces matérielles inconnues se traduit aussi au niveau :

- de la **charge mentale perçue** par les utilisateurs et du **nombre d'erreurs commises**, significativement plus faibles face aux interfaces virtuelles connues que face aux interfaces matérielles inconnues;
- du **temps d'exécution** et de l'**effort moyen déployé**, significativement moins élevés face à l'interface virtuelle connue calquée sur le Canon MP750 que face à l'interface matérielle inconnue du Epson CX9400Fax.

En résumé, il est clair que les interfaces virtuelles présentent un potentiel indéniable face à certaines interfaces matérielles, lorsqu'inconnues des utilisateurs. Sans même les adapter aux besoins spécifiques de chacun des participants, les interfaces virtuelles développées ont pu déclasser les deux interfaces matérielles testées. Ceci indique sans

équivoque, comme nous nous y attendions à la section 5.1.2, que le paradigme proposé, tel qu'implémenté actuellement, pourrait supprimer les phases d'adaptation à des interfaces matérielles inconnues, en proposant aux utilisateurs de transporter leurs propres interfaces, afin de les imposer aux appareils environnants pour dialoguer efficacement avec eux.

6.10.4 Positionnement des interfaces virtuelles face aux interfaces connues

Suite au déclassement des interfaces matérielles inconnues au profit des interfaces virtuelles développées, nous discutons, dans cette section, du positionnement de ces dernières par rapport aux interfaces matérielles, lorsque connues des utilisateurs. Comme le paradigme proposé introduit une certaine couche limitatrice au niveau des actions et de la perception (cf. section 6.10.2), il serait impensable qu'une interface virtuelle, calquée sur une interface matérielle peu performante, puisse concurrencer une interface matérielle supérieure à cette dernière. Le seul positionnement à résoudre, dans le cadre de notre étude, se situe donc au niveau des comparaisons entre l'interface virtuelle calquée sur le Canon MP750 et l'interface matérielle du Epson CX9400Fax.

Mentionnons tout d'abord, dans notre discussion, que les comparaisons effectuées à la section 6.9.5 n'ont pu faire ressortir de différences significatives sur le plan des perceptions des utilisateurs, entre l'interface matérielle connue du Epson CX9400Fax et l'interface virtuelle calquée sur le Canon MP750, à l'exception de l'efficacité perçue

face à cette dernière (évaluée légèrement en-deçà de celle de l'interface matérielle, bien que les modes des deux histogrammes se situent tous deux au même niveau) et de l'effort requis pour interagir avec elle. Cette différence au niveau des efforts est d'ailleurs corroborée par les réponses aux questions [Q45] à [Q47], indiquant que les charges mentale et physique perçues par les utilisateurs, ainsi que l'effort moyen déployé, augmentent considérablement (augmentations respectives de 76.3%, 150.6% et 62.6%) face à l'interface virtuelle d'intérêt, comparativement à l'interface matérielle du Epson CX9400Fax. Bien que ces différences sur le plan des efforts et des charges perçues soient très élevées, l'absence de différences aux autres niveaux est tout de même encourageante.

Cette absence de différences statistiquement significatives entre les deux interfaces étudiées se poursuit d'ailleurs sur le plan des performances des utilisateurs, au niveau du temps d'exécution de la tâche et du nombre d'erreurs commises. Si nous étudions toutefois les courbes d'apprentissage, nous remarquons clairement, même si les différences au niveau du temps d'exécution initial n'étaient pas significatives, que l'interface matérielle du Epson CX9400Fax creuse un écart de plus en plus grand avec l'interface virtuelle calquée sur le Canon MP750, au fil des itérations. Cette différence semble se stabiliser autour de 6.3 secondes, après 5 itérations de la tâche (cf. Figure 6.7).

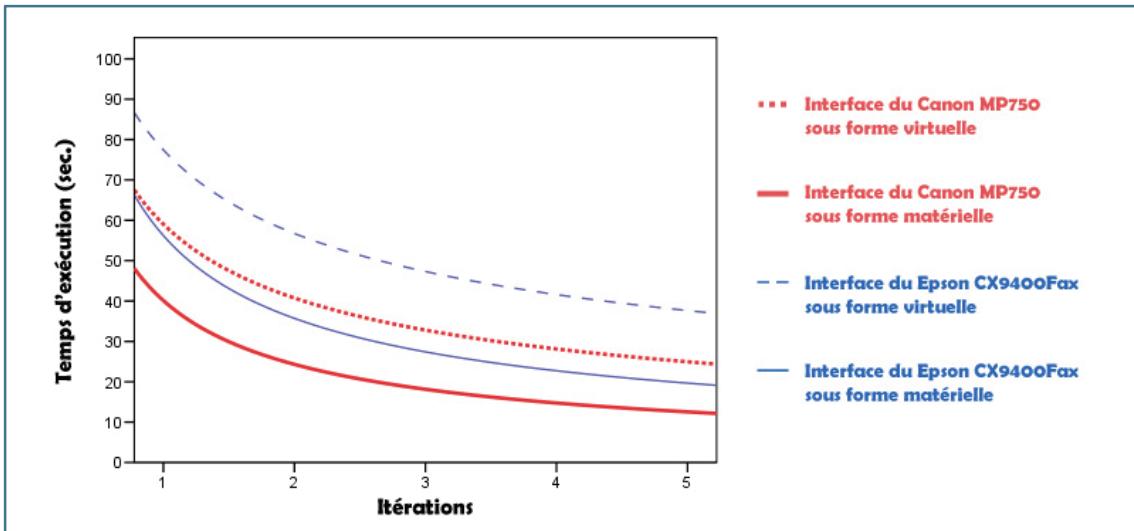


Figure 6.7 : Courbes d'apprentissage (interfaces Canon et Epson matérielles et virtuelles)

En résumé aucune des deux interfaces virtuelles proposées, telles qu'implémentées, ne semblent pouvoir concurrencer les deux interfaces matérielles retenues, lorsque connues des utilisateurs. En effet, même si l'interface virtuelle la plus forte est généralement perçue comme identique à l'interface matérielle la plus faible, elle tire encore de l'arrière au niveau des charges mentale et physique et des performances obtenues, en termes de temps d'exécution. Il serait donc difficile, en ce moment, d'argumenter en faveur d'un remplacement d'une des deux interfaces matérielles par l'interface virtuelle calquée sur le Canon MP750. Sur un plan plus positif, nous pouvons toutefois espérer arriver, à court terme, à réduire l'effort déployé par les utilisateurs, majoritairement tributaire de la charge physique perçue, en miniaturisant la plateforme. Le temps d'exécution face aux interfaces virtuelles pourra aussi être revu à la baisse, en recourant à une méthode d'interactions plus efficace que la méthode actuelle, qui introduit un délai

de 0.4 seconde avant l'activation de chaque composante. Si nous parvenons à accomplir ces deux tâches, et comme aucune autre différence significative n'a été soulignée entre les deux interfaces comparées, nous pourrons proposer aux utilisateurs familiers avec une interface connue (dans notre étude, l'interface du Epson CX9400Fax), de recourir à une interface virtuelle (dans notre étude, celle calquée sur le Canon MP750) pour accomplir une tâche précise, et ce, sans pénalité, même en ce qui a trait à leurs performances (cf. Figure 6.8 montrant que le temps d'exécution face à l'interface virtuelle calquée sur le Canon MP750 pourrait être similaire, et même inférieur, à celui obtenu face à l'interface matérielle du Epson CX9400Fax, suite à la suppression des 6.4 secondes de délai introduit par la méthode d'interactions retenue). Il sera alors possible, pour un utilisateur, de remplacer avantageusement plusieurs interfaces matérielles environnantes, connues mais mal adaptées à une tâche précise, par des interfaces virtuelles de meilleure qualité, qui pourront de plus être intimement personnalisées.

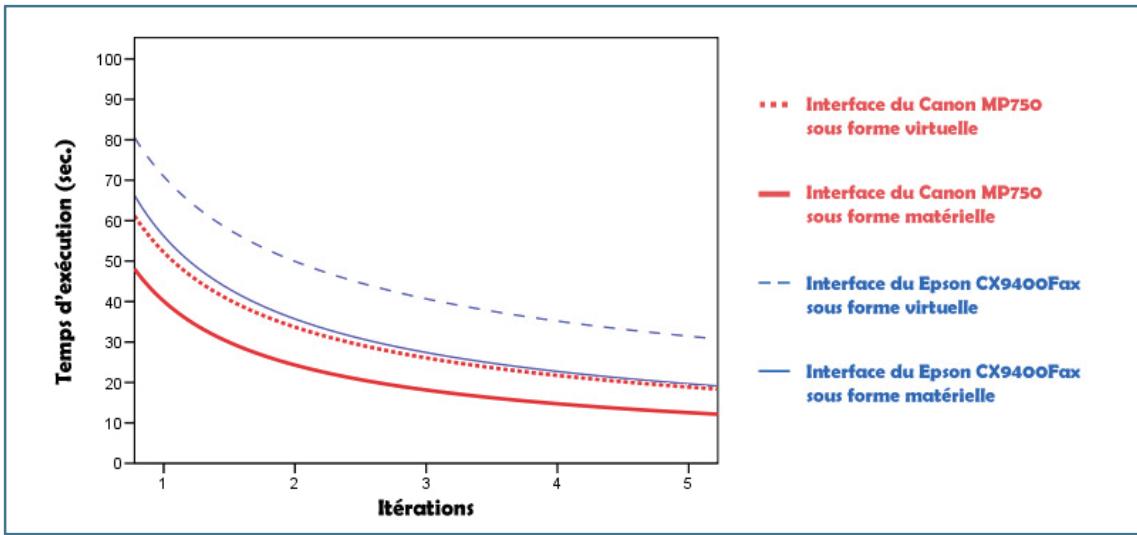


Figure 6.8 : Courbes d'apprentissage (interfaces Canon et Epson matérielles et virtuelles, rectifiées en éliminant les délais d'activation des composantes)

6.10.5 Acceptabilité du paradigme proposé

En conclusion à ce chapitre, nous discutons de l'acceptabilité générale du paradigme proposé. Soulignons préalablement que les participants retenus pour l'étude sont majoritairement représentatifs d'une population jeune (âgée de 18 à 35 ans), universitaire et favorable aux nouvelles technologies (à 93%). Les conclusions que nous tirerons ci-dessous ne pourront donc être généralisées à l'ensemble de la population sans une étude plus large.

En étudiant les réponses aux énoncés de Likert [Q50] et [Q51], nous remarquons que les utilisateurs perçoivent le concept proposé comme approprié pour interagir avec certains appareils de l'environnement, ce qui est très encourageant. Les participants appartenant

au premier groupe, et ayant sûrement davantage perçu l'utilité des interfaces virtuelles face à l'interface matérielle du Epson CX9400Fax inconnue, difficile à apprivoiser et facilement déclasser par l'interface virtuelle du Canon MP750 (réduisant le nombre d'erreurs commises et le temps d'exécution de 92.9% et de 70.0%, sans parler des charges perçues, de l'efficacité de l'interface, etc.), vont même jusqu'à admettre qu'ils préféreraient utiliser une interface virtuelle personnalisable et adaptée à leurs besoins, si le concept était raffiné et miniaturisé, plutôt que de s'adapter aux interfaces matérielles inconnues. Cette constatation confirme d'ailleurs l'ordonnancement des interfaces exposé plus tôt (cf. section 6.10.3 et réponses aux énoncés de Likert [Q48]).

Nous ne pouvons malheureusement pas émettre de conclusion quant aux énoncés [Q49] et [Q52], étant donné que nous n'avons pu prouver, en respectant le seuil de significativité proposé, que les réponses obtenues n'étaient pas issues d'une distribution uniforme et n'étaient donc pas aléatoires (cf. sections 6.6 et 6.7). Nous pouvons toutefois conclure, en augmentant ce seuil à 11%, mais en insistant sur nos réserves quant à la significativité statistique des conclusions tirées face à ce dernier :

- que les utilisateurs des deux groupes sont en désaccord avec l'énoncé [Q49], selon lequel les interfaces virtuelles ne présenteraient aucun potentiel et qui vient corroborer la conclusion émise plus tôt, voulant que le concept proposé soit approprié pour interagir avec certains appareils de l'environnement;
- que les utilisateurs du premier groupe sont en désaccord avec l'idée de recourir à une interface virtuelle, personnalisable et adaptée à leurs besoins, pour dialoguer

avec certains appareils de leur environnement plutôt que d'utiliser leur interface matérielle **connue** et ce, même si le concept était miniaturisé et raffiné.

Cette dernière constatation met en relief la distance qu'il reste encore aux interfaces virtuelles à combler, par rapport aux interfaces matérielles, lorsque connues des utilisateurs, comme expliqué à la section 6.10.4. Il est en fait normal que les participants à notre étude arrivent à cette conclusion, qui peut être expliquée, dans le cadre de notre expérience :

- par le fait qu'aucune des deux interfaces virtuelles testées ne leur a permis d'améliorer leurs performances face aux interfaces matérielles connues;
- par le fait que les deux interfaces virtuelles étaient plus taxantes que les deux interfaces matérielles connues;
- par le fait que les expériences menées présentaient toutes les interfaces virtuelles testées par-dessus les appareils dont les interfaces matérielles étaient inconnues, incitant peut-être inconsciemment les utilisateurs à croire que leur application se limitait à remplacer une interface inconnue;
- et par une certaine réticence global au changement, selon laquelle les utilisateurs ne percevraient pas l'intérêt, après s'être familiarisés avec une interface matérielle donnée, d'en apprivoiser une toute autre, cette fois virtuelle, afin d'économiser quelques secondes dans un cadre quotidien.

En résumé, le paradigme avancé semble être bien accueilli par le bassin de population retenu, qui y voit non seulement un potentiel certain, mais qui serait prêt à l'adopter, ne serait-ce que pour supprimer les phases d'adaptation à des interfaces matérielles inconnues, si la plateforme était raffinée.

CHAPITRE 7 : CONCLUSION

Ce chapitre conclut la thèse en proposant tout d'abord une synthèse des travaux effectués, ainsi qu'un regard critique sur l'introduction du paradigme proposé et ses possibles retombées. Nous présenterons ensuite un condensé des contributions, tant scientifiques que techniques, de cette première recherche exploratoire sur la virtualisation d'interfaces matérielles. Nous terminerons finalement en exposant différentes futures avenues de recherche, à court comme à long terme, qui permettront assurément de raffiner la plateforme proposée et de mieux positionner notre paradigme.

7.1 Synthèse

Face à la généricité des interfaces matérielles actuelles, nous avons proposé un nouveau paradigme d'interactions humain-machine consistant à recréer, en réalité augmentée, des interfaces personnalisables sous une forme purement logicielle, afin de contourner les panneaux de contrôle des appareils environnants, mal adaptés aux besoins uniques de chaque utilisateur. Ce concept de virtualisation, que nous avons réduit dans les derniers chapitres à une simple détection des interfaces matérielles environnantes, pour les remplacer par des interfaces virtuelles connues, est en fait bien plus large qu'il ne paraît.

Il ne devrait en effet pas être limité à proposer quelques interfaces virtuelles ponctuelles car il semble être l'acteur principal dans la disparition des interfaces matérielles, dans leur passage à une dimension purement logicielle, où elles deviendront infiniment malléables, bref, dans leur « virtualisation ». Certes, l'idée de pouvoir transporter une interface connue, amovible, telle que présentée actuellement, pour remplacer une interface matérielle inconnue détectée dans l'environnement est très intéressante (et mène d'ailleurs à des résultats déjà prometteurs) mais ce concept doit être poussé plus loin, dans un futur où les interfaces matérielles n'existeraient plus, où nous ne détecterions pas leur présence dans l'environnement mais plutôt l'existence d'un conteneur, vide, où nous pourrions arrimer une interface intimement personnelle. Cette façon de voir les interfaces nous mènera sans aucun doute à repenser leur processus de design et de conception, qui devront s'adapter à l'infine variété des utilisateurs, mais qui offriront la possibilité à chacun d'unifier les interfaces utilisées, sur une base personnelle.

Bref, cette thèse a lancé les fondations de cette vision, où les interfaces proposées commencent déjà à s'approcher de certaines interfaces matérielles, même familières des utilisateurs, et ce, sans même être personnalisées. À moyen terme, il semble très probable que la virtualisation d'interfaces permettra aux utilisateurs qui y auront recours de dialoguer plus efficacement avec les appareils environnants que les utilisateurs qui utiliseront encore leurs interfaces matérielles. Toutefois, il serait erroné de penser que les retombées du paradigme proposé justifieraient, pour un simple

utilisateur, de pousser pour l'introduction des ordinateurs portés. En étant réaliste, les quelques secondes, voire minutes, gagnées jour après jour ne sauraient justifier l'investissement dans une telle plateforme. Mais, en prenant du recul et en constatant que les phénomènes actuels de miniaturisation et d'intégration semblent nous mener peu à peu vers l'avènement des ordinateurs portés dans notre quotidien, le recours à des interfaces virtuelles pourrait être considéré. Il en va toutefois autrement en ce qui a trait aux applications « médicales » et industrielles d'un tel concept, où les interactions humain-machine sont plus critiques ou représentent la majeure partie des activités humaines. Dans un tel contexte, adapter l'interface d'un poste de travail sur une chaîne de montage aux besoins de chaque opérateur, ou faciliter la transition temporaire d'une ancienne interface à une nouvelle machine, ou même proposer à un utilisateur souffrant de déficiences visuelles des interfaces simplifiées, grossies et présentant par exemple un bouton de raccourci sur les appareils multifonctions, afin d'effectuer des photocopies agrandies à 400%, ne semble pas futile, tant sur le plan des interactions avec l'interface que dans la facilitation des activités subséquentes. Il ne serait donc pas surprenant de voir apparaître les premières interfaces virtuelles dans ces environnements, où elles seront peu à peu raffinées avant leur introduction éventuelle auprès des particuliers.

À terme, les interfaces virtuelles, présentant toutes les caractéristiques d'une interface optimale pour un utilisateur spécifique, mèneront sûrement à un dialogue humain-machine plus adéquat et plus performant que les interfaces matérielles actuelles. Elles permettront de favoriser la consistance des interfaces d'un appareil à l'autre, d'accroître

leur adaptabilité pour répondre aux attentes de chacun et, ultimement, pourront s'adapter d'elles-mêmes à nos besoins ponctuels, grâce aux données recueillies par la plateforme portée. Bref, elles permettront à chaque utilisateur de se retrouver en territoire connu, lorsque confronté à n'importe quelle machine.

7.2 Contributions

La contribution principale de nos recherches, principalement exploratoires, fut la proposition, la mise en application et l'évaluation d'un nouveau paradigme d'interactions humain-machine, non encore exploré. Ce paradigme, reposant sur une plateforme et une architecture peu communes, permettra, à terme, à chaque utilisateur de dialoguer avec les appareils environnants par l'intermédiaire d'interfaces intimement personnelles. Il s'agit d'une contribution majeure, car les interfaces matérielles actuelles ne peuvent s'adapter aux besoins de chacun et mènent ultimement, en tentant de cibler les attentes de plusieurs, à un dialogue humain-machine sous-optimal. En supprimant leur support matériel, ce paradigme introduit des interfaces entièrement logicielles, malléables, présentées en réalité augmentée, intégrées à l'environnement de façon transparente et qui risquent de changer la vision que nous avons du dialogue humain-machine actuel.

Plus précisément, cette thèse contribue à l'avancement des connaissances scientifiques :

- en articulant le concept de virtualisation d'interfaces matérielles, en justifiant sa raison d'être, en précisant ses avantages par rapport aux avenues de recherche actuelles et en identifiant les spécialisations qu'il pourrait supporter, au niveau de l'adaptabilité dynamique des interfaces proposées, de la virtualisation partielle, du guidage des utilisateurs, etc.
- en identifiant les avantages et les limites, pour une famille d'appareils donnée et un bassin de population spécifique, des interfaces virtuelles et des modes opératoires recréés, afin de les positionner par rapport aux paradigmes d'interactions actuels;
- en présentant des résultats expérimentaux sur l'évaluation de la performance humaine face à ce nouveau genre d'interfaces, et sur l'accueil d'un tel paradigme.

Cette thèse contribue également à la recherche appliquée et au développement des technologies, en touchant à :

- la conception et au développement partiel d'une plateforme matérielle modulaire, apte à supporter la présentation d'interfaces en réalité augmentée, d'assurer les communications avec les appareils environnants et de détecter les interactions de l'utilisateur;
- la conception et au développement d'une architecture logicielle en couches, générique et réutilisable, recréant deux des modes opératoires les plus utilisés et apte à supporter, a priori, une multitude d'interfaces virtuelles différentes;

- la conception de trois interfaces virtuelles distinctes permettant de dialoguer, en réalité augmentée, avec trois appareils de l'environnement.

7.3 Futures avenues de recherche

Nous présentons, dans les sous-sections ci-dessous, plusieurs futures avenues de recherche s'attardant principalement sur les améliorations de la plateforme proposée, sur le support de modes opératoires additionnels, sur la découverte des fonctionnalités offertes, sur l'introduction de techniques de description efficace d'interfaces, sur la possible adaptativité du paradigme avancé, ainsi que sur l'impact sociétal de son adoption à grande échelle.

7.3.1 Améliorations de la plateforme

Nous serions tentés d'identifier la miniaturisation comme une de nos priorités de recherche, au niveau matériel. Cette miniaturisation, qui n'est sans aucun doute un pré-requis à une acceptation de masse des ordinateurs portés sur lesquels nous nous basons pour mettre en pratique le paradigme proposé, viendra toutefois d'elle-même d'autres domaines. Dans l'espace de notre étude, les téléphones cellulaires ont pu en effet rejoindre, en termes de puissance de calcul, la plateforme que nous avions initialement sélectionnée. Il n'est donc pas exclu que cette tendance continue et que nous disposions, à moyen terme, du matériel nécessaire et miniaturisé pour introduire notre paradigme à grande échelle.

Il nous semble en fait plus sage de nous concentrer, à court terme, sur l'étude de différents périphériques qui pourraient améliorer les performances des utilisateurs dans leur dialogue humain-machine. Sur ce plan, notons, entre autres, qu'il serait critique de pallier au problème de délai d'activation des composantes, issu de la méthode d'interactions choisie, elle-même tributaire des périphériques d'entrée retenus. Pour contrecarrer ce problème, il serait intéressant d'étudier une possible transposition à notre plateforme d'un dispositif de repérage laser similaire à celui de Cassinelli [74], pour suivre les mains et les doigts de l'utilisateur, afin de détecter en profondeur la moindre flexion pour activer un bouton. D'autres solutions, toutes aussi intéressantes à étudier, consisteraient à recourir à une caméra supplémentaire, qui nous permettrait aussi de proposer à l'utilisateur une vision stéréoscopique du monde, et qui nous fournirait les informations nécessaires pour compléter notre interprétation tridimensionnelle de l'environnement. L'introduction de capteurs de pression, au bout des doigts de l'utilisateur, constituerait aussi une solution idéale, bien qu'intrusive, pour détecter les interactions avec une surface de support aux interfaces proposées, et permettrait d'isoler sans équivoque l'activation de boutons virtuels. Au niveau des périphériques de sortie, des dispositifs de retour tactiles [84], tels des exosquelettes exerçant différentes forces sur les mains de l'utilisateur ou des gants chargés de générer un ensemble de pressions sur le bout de ses doigts (par l'intermédiaire de courants électriques, de systèmes de coussins d'air ou d'expansion et de compression thermiques de fils métalliques [85]), pourraient aussi être considérés pour simuler différents contacts avec les composantes virtuelles proposées, afin de rapatrier la dimension matérielle que nous avions élaguée

au niveau de nos interfaces. En résumé, il serait intéressant d'étudier l'utilité de cette multitude de périphériques qui pourraient venir se greffer à notre plateforme actuelle, pour réduire la couche limitatrice qui sépare actuellement les interfaces virtuelles de leur contrepartie matérielle. Des études expérimentales plus poussées nous permettraient alors de quantifier l'impact de ces technologies sur les performances des utilisateurs, de mesurer leur charge physique lors d'utilisations soutenues et d'établir si, et à quel coût, les interfaces virtuelles proposées pourraient répliquer toutes les caractéristiques de leurs consœurs matérielles, notamment en ce qui a trait à cette dimension haptique à laquelle nous sommes accoutumés.

7.3.2 Étude de modes opératoires supplémentaires

Au niveau des modes opératoires créés, nous nous sommes, pour l'instant, limités à ceux jugés les plus répandus. Il sera toutefois essentiel, si nous désirons réellement proposer le paradigme d'interactions avancé, de se pencher, à court terme, sur la réPLICATION précise d'autres gestes opératoires, telle l'interaction avec des pédales et des manettes. Pour ce faire, nous pourrions :

- en nous basant sur les périphériques d'entrée actuels, détecter les rotations du poignet de l'utilisateur face à des roulettes et identifier la saisie de composantes virtuelles (ex. : manettes, leviers, volants, etc.), en puisant dans les multiples recherches similaires actuellement disponibles (telles celles menées par Starner pour interpréter l'alphabet des sourds-muets sur une plateforme portée [86]) et en

tirant profit de différentes librairies dédiées à la reconnaissance de gestes (tel GART [87]);

- en ajoutant à notre plateforme une caméra supplémentaire ou un dispositif de suivi laser [74], évaluer la profondeur des mouvements des mains de l'utilisateur, pour supporter, par exemple, des interactions avec des leviers virtuels hors du plan de la caméra actuelle;
- en nous tournant vers des périphériques plus intrusifs, tels des gyroscopes, des encres conductrices ou des fibres optiques [88], mesurer l'inflexion des membres, des pieds et des mains de l'utilisateur, hors du champ de vision de ce dernier, pour contrôler différentes pédales virtuelles par exemple.

Ces futurs développements nous semblent préalables à la virtualisation d'une large gamme d'interfaces hétérogènes et nous permettront de pousser plus loin nos études utilisateurs.

7.3.3 Découverte des fonctionnalités offertes par les appareils environnants

Avant d'espérer pouvoir dialoguer avec la majorité des appareils environnants par l'intermédiaire d'interfaces virtuelles, il nous faudra aussi pousser plus avant la normalisation des échanges d'informations entre la plateforme proposée et les appareils contrôlés, notamment en ce qui a trait à la découverte des fonctionnalités qu'ils supportent. Comme plusieurs recherches et standards (cf. [31], [45] et [89]), nous nous

étions basés sur des adaptateurs primitifs pour télécharger une description simplifiée de commandes (symbolisées par des intervalles et des sous-ensembles) et de variables d'états, représentant les fonctionnalités des appareils multifonctions utilisés durant notre étude expérimentale (cf. sections 5.4.4 et 5.4.5). Bien que ces techniques furent suffisantes dans le cadre de nos recherches, il nous semble important de militer pour la miniaturisation et la standardisation des adaptateurs utilisés, qui pourraient, à terme, être intégrés à tous les nouveaux appareils manufacturés, ainsi que pour l'apparition d'un langage descriptif riche, flexible et formel, capable de supporter des commandes complexes, basé sur un dictionnaire partagé entre la plateforme et les machines.

7.3.4 Description et dissémination d'interfaces personnalisées

En proposant notre paradigme, nous souhaitions apporter à chaque utilisateur des interfaces adaptées à ses besoins. Une telle ambition, si concrétisée, est toutefois lourde de conséquences au niveau de la conception de telles interfaces. En effet, les processus actuels de design, ciblant un large bassin de population, devront être repensés pour être adaptés à l'unicité des utilisateurs. Pour simplifier ce travail, il serait intéressant de développer des règles logiques de description des besoins de chaque utilisateur, qui pourraient être utilisées pour générer en direct des interfaces adaptées à un sujet précis, plutôt que de dessiner graphiquement et de décrire manuellement le comportement et l'apparence des interfaces, comme proposé dans notre étude exploratoire. L'introduction de tels patrons, qui prendraient en compte les fonctionnalités des appareils environnants

et qui pourraient s'inspirer des recherches de Nichols [89] sur les « *smart templates* », semble essentielle à la démocratisation des interfaces virtuelles.

7.3.5 Interfaces adaptatives et informatique disséminée

En poussant plus loin le concept présenté dans notre étude expérimentale, nous pourrions espérer, à terme, aboutir à des interfaces adaptatives, réorganisables dynamiquement en fonction d'un historique (capté par l'ordinateur porté, toujours allumé) ou des données environnementales, afin d'accompagner l'utilisateur dans ses besoins changeants. Comme l'introduction d'interfaces virtuelles ciblait justement la simplification des interactions humain-machine, il semble en fait tout à fait normal de tendre vers une telle adaptativité des interfaces, qui pourront par exemple, face à un guichet bancaire, détecter le montant du chèque dans la main de l'utilisateur pour créer dynamiquement un bouton de raccourci pour le déposer, voire même, en cas de certitude, représenter complètement l'utilisateur en prenant en charge la transmission de ses intentions, afin de minimiser l'interface présentée. Pour ce faire, nous pourrions nous inspirer des multiples recherches proposées au cours des dernières années et se penchant sur des applications et des services sensibles au contexte (*context-aware*), pour imposer différentes règles ontologiques prédéfinies (telles SOUPA [90], proposées par Chen et al., figurant parmi les ensembles les plus complets pour modéliser le contexte, les suppositions, les intentions et les rôles). Combinées à des modèles utilisateurs [91], ces règles, déjà prises en charge par différents « *middlewares* » tels Solar [92] et PACE [93], auraient le potentiel de déclencher des comportements spécifiques au niveau des

interfaces virtuelles (ex. : réorganisation et altération des composantes, modification des chemins requis pour compléter une tâche, prise en charge de sous-tâches) en fonction de différents stimuli. Pour pousser encore plus loin l'adaptativité des interfaces virtuelles proposées, des modèles de décisions théoriques (*decision-theoretic models* [94]) plus généraux et des techniques de reconnaissance de plans (*plan recognition* [95]) pourront être incorporés à notre plateforme pour, par exemple, reconnaître la présence de chemins répétitifs pris par l'utilisateur face à une interface précise et lui offrir d'exécuter les actions pour lui, ou les regrouper sous un bouton de raccourci généré dynamiquement. Ultimement, la mise en réseau des appareils environnants pourra fournir, à notre plateforme, des précisions quant à leur vision de l'environnement dans lequel évolue l'utilisateur, pour décharger ou compléter les fonctions d'analyse de l'ordinateur porté. Bref, un lien évident se tisse entre l'informatique portée et l'informatique disséminée, qui pourront collaborer afin de simplifier davantage les interactions humain-machine.

7.3.6 Étude des comportements des utilisateurs

Même si le paradigme proposé fut introduit afin de simplifier les interactions humain-machine, il ne faut pas perdre de vue que son impact pourrait, à long terme, s'étendre à d'autres sphères. En effet, il serait intéressant, avant de démocratiser les interfaces virtuelles, d'étudier en profondeur les répercussions de leur utilisation sur les capacités générales d'adaptation des utilisateurs, car il serait dommage de constater, qu'en réduisant leurs obligations de s'adapter à de nouvelles situations, nous diminuions leurs

capacités générales d'adaptation, comme l'ont souligné quelques participants à notre étude.

RÉFÉRENCES

- [1] M. D. Brouwer-Janse, R. W. Bennett, T. Endo, F. L. van Nes, H. J. Strubbe et D. R. Gentner, "*Interfaces for Consumer Products: "How to Camouflage the Computer?"*", présenté à SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Monterey, États-Unis, 1992, pp. 287-290.
- [2] C. Doerrer et R. Werthschutzky, "*A New Approach to Operating Machines with High Functionality*", présenté à EuroHaptics 2001, Birmingham, Angleterre, 2001, pp. 105-107.
- [3] D. A. Norman et S. W. Draper, "*User-Centered System Design: New Perspectives on Human-Computer Interaction*", CRC, 1986, 544 pages.
- [4] E. Brangier et J. Barcenilla, "*Concevoir un produit facile à utiliser: adapter les technologies à l'homme*", Editions d'Organisation, 2003, 260 pages.
- [5] J. Nielsen, "*Usability Engineering*", Morgan Kaufmann, 1994, 362 pages.

- [6] J. Nielsen, "*Heuristic Evaluation*" dans Usability Inspection Methods, vol. 5, John Wiley & Sons, 1994, pp. 25-62.
- [7] P. G. Polson, C. Lewis, J. Rieman et C. Wharton, "*Cognitive Walkthroughs: A Method for Theory-Based Evaluation of User Interfaces*", International Journal of Man-Machine Studies, vol. 36, num. 5, 1992, pp. 741-773.
- [8] ISO, "*ISO 13407 - User-centred design process for interactive systems*", 1999, 26 pages.
- [9] J. Grudin, "*The Case Against User Interface Consistency*", Communications of the ACM, vol. 32, num. 10, 1989, pp. 1164-1173.
- [10] J. Nielsen, "*Coordinating User Interfaces for Consistency*", Morgan Kaufmann, 2002, 152 pages.
- [11] S. Mann, "*Mediated Reality*", Massachusetts Institute of Technology's Media Lab, Cambridge, États-Unis, Rapport technique 260, 1994.
- [12] W. Badami et N. W. Chbat, "*Home Appliances Get Smart*", IEEE Spectrum, vol. 35, num. 8, 1998, pp. 36-43.
- [13] M. Weiser, "*The Computer for the Twenty-First Century*", Scientific American, vol. 265, num. 3, 1991, pp. 94-104.

- [14] A. Schmidt et K. van Laerhoven, "How to Build Smart Appliances", IEEE Personal Communications, vol. 8, num. 4, 2001, pp. 66-71.
- [15] J. R. Cooperstock, S. S. Fels, W. Buxton et K. C. Smith, "Reactive Environments: Throwing Away Your Keyboard and Mouse", Communications of the ACM, vol. 40, num. 9, 1997, pp. 65-73.
- [16] L. Winer et J. R. Cooperstock, "The "Intelligent Classroom": Changing Teaching and Learning with an Evolving Technological Environment", Computers and Education, vol. 38, 2002, pp. 253-266.
- [17] B. Brumitt, B. Meyers, J. Krumm, A. Kern et S. Shafer, "EasyLiving: Technologies for Intelligent Environments", présenté à Handheld and Ubiquitous Computing, Bristol, Angleterre, 2000, pp. 97-119.
- [18] B. Johanson, A. Fox et T. Winograd, "The Interactive Workspaces Project: Experience with Ubiquitous Computing Rooms", IEEE Pervasive Computing, vol. 1, num. 2, 2002, pp. 67-74.
- [19] M. Dertouzos, "The Future of Computing", Scientific American, vol. 281, num. 2, 1999, pp. 52-55.

- [20] D. Garlan, D. Siewiorek, A. Smailagic et P. Steenkiste, "*Project Aura: Towards Distraction-Free Pervasive Computing*", IEEE Pervasive Computing, vol. 1, num. 2, 2002, pp. 22-31.
- [21] N. Kawaguchi, "*Cogma: A Middleware for Cooperative Smart Appliances for Ad hoc Environment*", présenté à 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Philadelphie, États-Unis, 2004, pp. 146-151.
- [22] M. Hellenschmidt, "*Distributed Implementation of a Self-Organizing Appliance Middleware*", présenté à 2005 Joint Conference on Smart Objects and Ambient Intelligence, Grenoble, France, 2005, pp. 201-206.
- [23] E. Aarts, "*Ambient Intelligence: A Multimedia Perspective*", IEEE Multimedia, vol. 11, num. 1, 2004, pp. 12-19.
- [24] T. Berners-Lee, J. Hendler et O. Lassila, "*The Semantic Web : A New Form of Web Content That Is Meaningful to Computers Will Unleash a Revolution of New Possibilities*", Scientific American, vol. 284, num. 5, 2001, pp. 34-43.
- [25] X. Wang, D. Zhang, J. S. Dong, C. Y. Chin et S. R. Hettiarachchi, "*Semantic Space: An Infrastructure for Smart Spaces*", IEEE Pervasive Computing, vol. 3, num. 3, 2004, pp. 32-39.

- [26] J. Nichols, B. A. Myers, M. Higgins, J. Hughes, T. K. Harris, R. Rosenfeld et M. Pignol, "*Generating Remote Control Interfaces for Complex Appliances*", présenté à 15th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, Paris, France, 2002, pp. 161-170.
- [27] A. Saito, M. Minami, Y. Kawahara, H. Morikawa et T. Aoyama, "*Smart Baton System: A Universal Remote Control System in Ubiquitous Computing Environment*", présenté à 2003 IEEE International Conference on Consumer Electronics, 2003, pp. 308-309.
- [28] IrDA, "*Infrared Data Association*", accédé le 17 février 2009 (www.irda.org).
- [29] Sun-Microsystems, "*Jini Connection Technology*", accédé le 17 février 2009 (www.sun.com/jini).
- [30] HAVi, "*Home Audio/Video Interoperability*", accédé le 17 février 2009 (www.havi.org).
- [31] UPnP, "*Universal Plug and Play Forum*", accédé le 17 février 2009 (www.upnp.org).
- [32] M. Tezuka, Y. Honda et M. Kato, "*Development of Bi-Directional Remote Controller Protocol and Systems for Domestic Appliances*", IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 46, num. 3, 2000, pp. 802-811.

- [33] J.-R. Chang Chien et C.-C. Tai, "*The Information Home Appliance Control System - A Bluetooth Universal Type Remote Controller*", présenté à 2004 IEEE International Conference on Networking, Sensing & Control, Taipei, Taiwan, 2004, pp. 399-400.
- [34] J. Haartsen, M. Naghshineh, J. Inouye, O. J. Joeressen et W. Allen, "*Bluetooth: Vision, Goals and Architecture*", ACM Mobile Computing and Communications Review, vol. 2, num. 4, 1998, pp. 38-45.
- [35] T. D. Hodes, R. H. Katz, E. Servan-Schreiber et L. A. Rowe, "*Composable Ad-hoc Mobile Services for Universal Interaction*", présenté à 3rd Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, Budapest, Hongrie, 1997, pp. 1-12.
- [36] Logitech., "*Harmony Remote Controls*", accédé le 27 novembre 2008 (<http://www.logitech.com/index.cfm/remotes/&cl=us,en>).
- [37] J. Nichols, B. A. Myers, T. K. Harris, R. Rosenfeld, S. Shriver, S. Higgins et J. Hughes, "*Requirements for Automatically Generating Multi-Modal Interfaces for Complex Appliances*", présenté à 4th IEEE International Conference on Multimodal Interfaces, Pittsburgh, États-Unis, 2002, pp. 377-382.

- [38] J. Nichols et B. A. Myers, "Studying the Use of Handhelds to Control Smart Appliances", présenté à 23rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, Providence, États-Unis, 2003, pp. 274-279.
- [39] J. Nichols, B. A. Myers et R. B., "UNIFORM: Automatically Generating Consistent Remote Control User Interfaces", présenté à SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Montréal, Canada, 2006, pp. 611-620.
- [40] J. Nichols, B. A. Myers, M. Higgins, J. Hughes, T. K. Harris, R. Rosenfeld et K. Litwack, "Personal Universal Controllers: Controlling Complex Appliances With GUIs and Speech", présenté à SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Fort Lauderdale, États-Unis, 2003, pp. 624-625.
- [41] J. Nichols, B. A. Myers et K. Litwack, "Improving Automatic Interface Generation with Smart Templates", présenté à 9th International Conference on Intelligent User Interfaces, Funchal, Madeira, Portugal, 2004, pp. 286-288.
- [42] S. R. Ponnekanti, B. Lee, A. Fox, P. Hanrahan et T. Winograd, "ICrafter: A Service Framework for Ubiquitous Computing Environments", présenté à 3rd International Conference on Ubiquitous Computing, Atlanta, États-Unis, 2001, pp. 56-75.
- [43] M. Abrams et J. Helms, "UIML 3.0 Language Specification (Draft)", Harmonia Inc., 2002, 116 pages.

- [44] A. Mir Farooq et M. Abrams, "*Simplifying Construction of Multi-Platform User Interfaces using UIML*", présenté à European Conference UIML, Paris, France, 2001.
- [45] INCITS-V2, "*Information Technology Access Interfaces*", 2002, accédé le 31 janvier 2006 (www.ncits.org/tc_home/v2.htm).
- [46] A. Plouznikoff, N. Plouznikoff, J. M. Robert et M. Desmarais, "*Enhancing Human-Machine Interactions: Virtual Interface Alteration through Wearable Computers*", présenté à SIGCHI conference on Human Factors in computing systems, Montréal, Canada, 2006, pp. 363-376.
- [47] D. A. Norman, "*The Invisible Computer: Why Good Products Can Fail, the Personal Computer Is So Complex, and Information Appliances Are the Solution*", MIT Press, 1998, 316 pages.
- [48] K. L. Mills et J. Scholtz, "*Situated Computing: The Next Frontier for HCI Research*" dans Human-Computer Interaction in the New Millenium, Addison-Wesley Professional, 2002, pp. 537-552.
- [49] N. Plouznikoff et J. M. Robert, "*Caractéristiques, enjeux et défis de l'informatique portée*", présenté à 16th Conference of the Association Francophone d'Interaction Homme-Machine, Namur, Belgique, 2004, pp. 125-132.

- [50] T. Starner, "*The Challenges of Wearable Computing: part 1 & 2*", IEEE Micro, vol. 21, num. 4, 2001, pp. 44-67.
- [51] C. D. Wickens, "*Information Processing, Decision Making and Cognition*" dans Handbook of Human Factors, Wiley, 1987, pp. 72-107.
- [52] C. D. Wickens, "*Engineering Psychology and Human Performance (3rd Ed.)*", Prentice Hall, 1999, 573 pages.
- [53] B. Howard et S. Howard, "*Lightglove: Wrist-Worn Virtual Typing and Pointing*", présenté à 5th International Symposium on Wearable Computers, Zurich, Suisse, 2001, pp. 172-173.
- [54] P. De la Hamette, P. Lukowicz, G. Tröster et T. Svoboda, "*Fingermouse: A Wearable Hand Tracking System*", présenté à 4th International Conference on Ubiquitous Computing, Göteborg, Suède, 2002, pp. 15-16.
- [55] C. Randell et H. Muller, "*Context Awareness by Analysing Accelerometer Data*", présenté à 4th International Symposium on Wearable Computers, Atlanta, États-Unis, 2000, pp. 175-176.
- [56] A. Plouznikoff, N. Plouznikoff et J. M. Robert, "*Virtualisation d'interfaces matérielles par l'intermédiaire d'un ordinateur porté*", présenté à 17ième

Conférence Internationale de l'Association Francophone d'Interaction Homme-Machine, Toulouse, France, 2005, pp. 287-290.

- [57] A. S. Hetal, S. E. Moore et B. Ramachandran, "*Drishti: An Integrated Navigation System for Visually Impaired and Disabled*", présenté à 5th International Symposium on Wearable Computers, Zurich, Suisse, 2001, pp. 149-158.
- [58] S. Mann, "*Mediated Reality with Implementations for Everyday Life*", 2002, accédé le 27 février 2009 (http://wearcam.org/presence_connect/).
- [59] P. Milgram et F. Kishino, "*A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays*", IEICE Transactions on Information Systems, vol. E77-D, num. 12, 1994, pp. 1321-1329.
- [60] R. S. Laramee et C. Ware, "*Rivalry and Interference with a Head Mounted Display*", ACM Transactions on Computer-Human Interaction, vol. 9, num. 3, 2002, pp. 238-251.
- [61] T. A. Furness III, "*Retinal Displays, Keynote Address*", présenté à 2nd International Symposium on Wearable Computers, Los Alamos, États-Unis, 2002.
- [62] F. Gemperle, N. Ota et D. P. Siewiorek, "*Design of a Wearable Tactile Display*", présenté à 5th International Symposium on Wearable Computers, Zurich, Suisse, 2001, pp. 5-12.

- [63] A. Toney, L. Dunne, B. Thomas et S. P. Ashdown, "*A Shoulder Pad Insert Vibrotactile Display*", présenté à 7th IEEE International Symposium on Wearable Computers, White Plains, États Unis, 2003, pp. 35-45.
- [64] R. T. Azuma, "*A Survey of Augmented Reality*", Presence: Teleoperators and Virtual Environments, vol. 6, num. 4, 1997, pp. 355-385.
- [65] M. Billinghurst, J. Bowskill, N. Dyer et J. Morphett, "*Spatial Information Displays on a Wearable Computer*", IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 18, num. 6, 1998, pp. 24-31.
- [66] M. Kolsch, R. Bane, T. Hollerer et M. Turk, "*Multimodal Interaction with a Wearable Augmented Reality System*", Computer Graphics and Applications, IEEE, vol. 26, num. 3, 2006, pp. 62-71.
- [67] R. Grasset, J.-D. Gascuel et S. D., "*Interactive Mediated Reality*", présenté à 2nd IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Newcastle, Australie, 2003, pp. 302-303.
- [68] N. Plouznikoff, A. Plouznikoff, M. Desmarais et J. M. Robert, "*Support mobile à la tâche: médiation utilisateur - monde réel par l'intermédiaire d'un ordinateur porté*", présenté à 18ième Conférence Internationale de l'Association Francophone d'Interaction Homme-Machine, Montréal, Canada, 2006, pp. 107-114.

- [69] N. Plouznikoff, "*Interface diffuse: conception, développement et évaluation d'un nouveau paradigme d'interaction humain-ordinateur porté*", Doctorat en Génie Électrique, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada, 2008, 287 pages.
- [70] ARToolkit, "ARToolkit", v. 2.65, 2008, accédé le 17 février 2009 (<http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>).
- [71] C. Stephanidis, "*The Concept of Unified User Interfaces*" dans User Interfaces for All: Concepts, Methods, and Tools, Lawrence Erlbaum Associates, 2001, pp. 371-388.
- [72] B. Shneiderman, "*Accommodation for Human Diversity*" dans Designing the User Interface : Strategies for Effective Human-Computer Interaction, Addison-Wesley, 1998, pp. 18-27.
- [73] J. Nielsen et T. K. Landauer, "*A Mathematical Model of the Finding of Usability Problems*", présenté à INTERACT '93 and CHI '93 Conference on Human Factors in Computing Systems, Amsterdam, Pays Bas, 1993, pp. 206-213.
- [74] A. Cassinelli, S. Perrin et M. Ishikawa, "*Smart Laser-Scanner for 3D Human-Machine Interface*", présenté à SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Portland, États-Unis, 2005, pp. 1138-1139.

- [75] D. G. Lowe, "*Object Recognition from Local Scale-Invariant Features*", présenté à 7th IEEE International Conference on Computer Vision, Corfu, Grèce, 1999, pp. 1150-1157.
- [76] D. G. Lowe, "*Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints*", International Journal of Computer Vision, vol. 60, num. 2, 2004, pp. 91-110.
- [77] J. Shi et C. Tomasi, "*Good Features to Track*", présenté à IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Seattle, États-Unis, 1994, pp. 593-600.
- [78] B. D. Lucas et T. Kanade, "*An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision*", présenté à 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Vancouver, Canada, 1981, pp. 674-679.
- [79] S. M. Dominguez, T. Keaton et A. H. Sayed, "*Robust Finger Tracking for Wearable Computer Interfacing*", présenté à 2001 Workshop on Perceptive User Interfaces, Orlando, États-Unis, 2001, pp. 1-5.
- [80] G. Wald, "*Human Vision and the Spectrum*", Science, vol. 101, num. 2635, 1945, pp. 653-658.
- [81] S. K. Card, T. P. Moran et A. Newell, "*The Psychology of Human Computer Interaction*", Lawrence Erlbaum Associates, 1983, 490 pages.

- [82] R. Likert, "A Technique for the Measurement of Attitudes", Archives of Psychology, vol. 140, 1932, pp. 1-55.
- [83] TWAIN Working Group, "TWAIN", v. 2.0, 2008, accédé le 13 janvier 2009 (<http://www.twain.org>).
- [84] G. Robles-de-la-Torre, "Principles of Haptic Perception in Virtual Environments" dans Human Haptic Perception: Basics and Applications, Birkhäuser Basel, 2008, pp. 363-379.
- [85] R. Scheibe, M. Moehring et B. Froehlich, "Tactile Feedback at the Finger Tips for Improved Direct Interaction in Immersive Environments", présenté à 2007 IEEE Virtual Reality Conference, Charlotte, États-Unis, 2007, pp. 293-294.
- [86] T. Starner, J. Weaver et A. Pentland, "Real-time American Sign Language Recognition Using Desk and Wearable Computer-Based Video", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 20, num. 12, 1998, pp. 1371-1375.
- [87] K. Lyons, H. Brashear, T. Westeyn, J. S. Kim et T. Starner, "GART: The Gesture and Activity Recognition Toolkit ", présenté à 12th International Conference on Intelligent Multimodal Interaction Environments, Beijing, Chine, 2007, pp. 718-727.

- [88] A. Lasko-Harvill, C. Blanchard, W. Smithers, Y. Harvill et A. Coffman, "*From DataGlove to DataSuit*", présenté à CompCon'88, San Francisco, États-Unis, 1988, pp. 536-538.
- [89] J. Nichols, "*Automatically Generating High-Quality User Interfaces for Appliances*", Doctorat en Informatique, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, États-Unis, 2006, 358 pages.
- [90] Chen H., Finin T. et J. A., "*The SOUPA Ontology for Pervasive Computing*" dans *Ontologies for Agents: Theory and Experiences*, B. Basel, Ed., 2005, pp. 233-258.
- [91] A. Kobsa, "*User Modeling: Recent Work, Prospects and Hazards*" dans *Adaptive User Interfaces: Principles and Practice*, North-Holland, 1993, pp. 111-128.
- [92] G. Chen, M. Li et D. Kotz, "*Design and Implementation of a Large-Scale Context Fusion Network*", présenté à First Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems, Boston, États-Unis, 2004, pp. 246-255.
- [93] K. Henricksen, J. Indulksa, T. McFadden et S. Balasubramaniam, "*Middleware for Distributed Context-Aware Systems*", présenté à International Symposium on Distributed Objects and Applications, Agia Napa, Chypre, 2005, pp. 846-863.
- [94] A. Jameson, B. Grobmann-Hutter, L. March, R. Rummer, T. Bohnenberger et F. Wittig, "*When Actions Have Consequences: Empirically Based Decision Making*

for Intelligent User Interfaces", Knowledge-Based Systems, vol. 14, 2000, pp. 75-92.

[95] H. A. Kautz, "*A Formal Theory of Plan Recognition and its Implementation*" dans Reasoning About Plans, Morgan Kaufmann, 1991, pp. 69-124.

ANNEXE A :
CERTIFICAT DE CONFORMITÉ ÉTHIQUE



Comité d'éthique de la
recherche avec des
sujets humains

Adresse civique :
Campus de l'Université de Montréal
2900, boul. Édouard-Montpetit
École Polytechnique
2500, chemin de Polytechnique
H3T 1J4

Adresse postale :
C.P. 6079, succursale Centre-ville
Montréal (Québec) Canada
H3C 3A7

Téléphone : (514)340-4990
Télécopieur : (514)340-4992

École affiliée à
l'Université de Montréal

Membres réguliers du comité :

Ginette Denicourt, IRSST
Daniel Imbeau, génie industriel
Bernard Lapierre, éthicien *
André Phaneuf, UdeMontréal
Pierre Savard, génie biomédical

Céline Roehrig, secrétaire

* président du Comité

**CERTIFICAT D'ACCEPTATION D'UN PROJET DE COMITÉ
D'ÉTHIQUE DE LA RECHERCHE AVEC
DES SUJETS HUMAINS DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE**

Montréal, le 15 novembre 2007.

M. Alexandre Plouznikoff
Étudiant au doctorat
Département de génie informatique et génie logiciel
École Polytechnique de Montréal

N/Réf : Dossier CÉR-07/08-07

Cher M. Plouznikoff,

J'ai le plaisir de vous informer que suite aux modifications/précisions que vous avez apportées aux questions soulevées par le Comité d'éthique de la recherche avec des sujets humains lors de sa réunion du 13 novembre 2007, votre projet de recherche intitulé «*Virtualisation d'interfaces matérielles : proposition, application et évaluation d'un nouveau paradigme d'interactions humain-machine*» que vous réalisez sous la direction du professeur Michel Desmarais, du département de génie informatique et génie logiciel, peut aller de l'avant.

Il est entendu que le présent certificat est valable pour le projet tel que soumis au Comité d'éthique de la recherche avec sujets humains. La secrétaire du Comité d'éthique de la recherche avec des sujets humains doit immédiatement être informé de toute modification qui pourrait être apportée ultérieurement au protocole expérimental, de même que de tout problème imprévu pouvant avoir une incidence sur la santé et la sécurité des personnes impliquées dans le projet de recherche (sujets, professionnels de recherche ou chercheurs).

Nous vous prions également de nous faire parvenir **un bref rapport annuel** ainsi qu'un avis à la fin de vos travaux.

Je vous souhaite bonne chance dans vos travaux de recherche,

Bernard Lapierre
Président
Comité d'éthique de la recherche avec des sujets humains

c.c. : Michel Desmarais, GIGL
Céline Roehrig, DRI

ANNEXE B :
QUESTIONNAIRE REMPLI PAR LES
PARTICIPANTS LORS DE L'ÉTUDE
EXPÉRIMENTALE

Étude sur la virtualisation d'interfaces

En tant que participant, vous avez réalisé une tâche simple à l'aide :

- d'un appareil multi-fonctions avec lequel vous vous étiez préalablement familiarisé;
- d'un appareil dont le fonctionnement vous était préalablement inconnu;
- du même appareil inconnu, mais par l'entremise d'une interface virtuelle familière.

En complétant ce questionnaire, vous nous aiderez à recueillir des mesures qualitatives et quantitatives pour mieux évaluer ce nouveau concept d'interfaces virtuelles.

Section 1 : Informations générales

Q1. Sexe: Homme Femme

Q2. Age : _____ ans

Q3. Programme d'étude / domaine d'emploi : _____

Q4. Avez-vous déjà suivi un cours portant sur les interfaces humain-machine ?

Oui Non

Q5. Quel est votre niveau de familiarité avec l'informatique (ordinateurs de bureau, ordinateurs portables, assistants numériques personnels, écrans tactiles, etc.) ?

Débutant Intermédiaire Avancé Expert

Q6. Quel est votre niveau de familiarité avec les appareils multi-fonctions (imprimante, fax, numériseur, photocopieur) ?

Débutant Intermédiaire Avancé Expert

Q7. Combien de fois par mois effectuez-vous des photocopies ?

1 fois ou moins De 2 à 3 fois De 4 à 5 fois Plus de 6 fois

Q8. Quelle est votre attitude face aux nouvelles technologies?

Défavorable Neutre Favorable

Section 2 : Utilisation de l'interface familière

Donnez votre opinion sur les énoncés suivants en cochant la case appropriée.

	1	2	3	4	5
	Fortement en désaccord	En désaccord	Ni en accord, ni en désaccord	D'accord	Fortement d'accord
Q9. Cette interface ressemble à une interface que j'utilise régulièrement.					
Q10. Il a été facile de réaliser la tâche.					
Q11. Le fonctionnement de l'interface a été facile à apprendre/comprendre.					
Q12. L'interface est efficace (i.e. permet de réaliser adéquatement la tâche).					
Q13. L'interface est efficiente (i.e. permet de réaliser adéquatement la tâche avec un minimum d'effort).					
Q14. L'interface est plaisante à utiliser.					
Q15. L'interface répond à mes attentes.					
Q16. L'effort requis pour interagir avec l'interface est important.					
Q17. Je suis insatisfait de ma performance.					
Q18. Avec de l'entraînement face à cette interface, je pourrais réaliser la tâche plus rapidement.					
Q19. Avec de l'entraînement face à cette interface, je pourrais réaliser la tâche avec moins d'effort.					

Section 3 : Utilisation de l'interface inconnue

Donnez votre opinion sur les énoncés suivants en cochant la case appropriée.

	Fortement en désaccord	En désaccord	Ni en accord, ni en désaccord	D'accord	Fortement d'accord
	1	2	3	4	5
Q20. Cette interface ressemble à une interface que j'utilise régulièrement.					
Q21. Il a été facile de réaliser la tâche.					
Q22. Le fonctionnement de l'interface a été facile à apprendre/comprendre.					
Q23. L'interface est efficace (i.e. permet de réaliser adéquatement la tâche).					
Q24. L'interface est efficiente (i.e. permet de réaliser adéquatement la tâche avec un minimum d'effort).					
Q25. L'interface est plaisante à utiliser.					
Q26. L'interface répond à mes attentes.					
Q27. L'effort requis pour interagir avec l'interface est important.					
Q28. Je suis insatisfait de ma performance.					
Q29. Avec de l'entraînement face à cette interface, je pourrais réaliser la tâche plus rapidement.					
Q30. Avec de l'entraînement face à cette interface, je pourrais réaliser la tâche avec moins d'effort.					

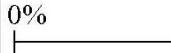
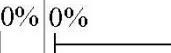
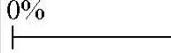
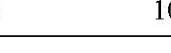
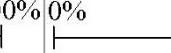
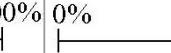
Section 4 : Utilisation de l'interface virtuelle

Donnez votre opinion sur les énoncés suivants en cochant la case appropriée.

	Fortement en désaccord	En désaccord	Ni en accord, ni en désaccord	D'accord	Fortement d'accord
	1	2	3	4	5
Q31. Cette interface ressemble à une interface que j'utilise régulièrement.					
Q32. Il a été facile de réaliser la tâche.					
Q33. Le fonctionnement de l'interface a été facile à apprendre/comprendre.					
Q34. L'interface est efficace (i.e. permet de réaliser adéquatement la tâche).					
Q35. L'interface est efficiente (i.e. permet de réaliser adéquatement la tâche avec un minimum d'effort).					
Q36. L'interface est plaisante à utiliser.					
Q37. L'interface répond à mes attentes.					
Q38. L'effort requis pour interagir avec l'interface est important.					
Q39. Je suis insatisfait de ma performance.					
Q40. Avec de l'entraînement face à cette interface, je pourrais réaliser la tâche plus rapidement.					
Q41. Avec de l'entraînement face à cette interface, je pourrais réaliser la tâche avec moins d'effort.					
Q42. L'interface virtuelle est difficile à percevoir.					
Q43. L'interface virtuelle est visuellement bien intégrée à la réalité.					
Q44. Utiliser l'interface virtuelle est similaire à utiliser une interface matérielle.					

Section 5 : Évaluation comparative

Répondez aux questions suivantes en plaçant une croix sur chaque échelle. La charge représente la fraction de votre capacité totale que vous avez investie dans la tâche : 100% signifie que vous n'auriez rien pu faire d'autre en parallèle à ce niveau, 0% signifie que vous n'étiez pas du tout occupé à ce niveau.

Lors de la réalisation de la tâche à l'aide de l'interface	familière	inconnue	virtuelle
Q45. Quelle était votre charge mentale moyenne?	0%  100%	0%  100%	0%  100%
Q46. Quelle était votre charge physique moyenne?	0%  100%	0%  100%	0%  100%
Q47. Quel était l'effort moyen que vous avez déployé?	0%  100%	0%  100%	0%  100%

Q48. Ordonnez les interfaces suivantes dans votre ordre de préférence, en utilisant les numéros 1, 2 et 3 (1 étant votre préférée) :

Interface virtuelle Interface familière Interface inconnue

Section 6 : Conclusion

Donnez votre opinion sur les énoncés suivants en cochant la case appropriée.

	Fortement en désaccord	En désaccord	Ni en accord, ni en désaccord	D'accord	Fortement d'accord
	1	2	3	4	5
Q49. Les interfaces virtuelles ne présentent aucun potentiel.					
Q50. Utiliser une interface virtuelle semble approprié pour interagir avec certains appareils de l'environnement.					
Q51. Si le concept était miniaturisé et raffiné, je préférerais utiliser une interface virtuelle personnalisable et adaptée à mes besoins pour dialoguer avec certains appareils de mon environnement plutôt que <i>de m'adapter à leur interface matérielle inconnue</i> .					
Q52. Si le concept était miniaturisé et raffiné, je préférerais utiliser une interface virtuelle personnalisable et adaptée à mes besoins pour dialoguer avec certains appareils de mon environnement plutôt que <i>d'utiliser leur interface matérielle connue</i> .					

Q53. Quels avantages voyez-vous aux interfaces virtuelles (facultatif) ?

Q54. Quels inconvénients voyez-vous aux interfaces virtuelles (facultatif) ?

Q55. Avez-vous d'autres commentaires particuliers à nous faire part (facultatif) ?

ANNEXE C:
EXTRAITS DU FICHIER DE DESCRIPTION XML
DES ÉTATS D'UNE INTERFACE VIRTUELLE
CALQUÉE SUR UN APPAREIL MULTIFONCTION
EPSON STYLUS CX9400FAX

État initial, variables globales et images à utiliser pour l'écran LCD

```

<INITIALSTATE>Photo</INITIALSTATE>

<VAR>INCOLOR<LOOP>N</LOOP><SET>{ "FALSE", "TRUE" }</SET></VAR>
<VAR>BRIGHTNESS<LOOP>N</LOOP><ARRAY>[ -4, 4, 0 ]</ARRAY></VAR>
<VAR>IMAGEQUALITY<LOOP>N</LOOP><SET>{"Draft", "Standard", "Best"}</SET></VAR>
<VAR>NBOFCOPIESUNITS<LOOP>N</LOOP><ARRAY>[ 0, 9, 1 ]</ARRAY></VAR>

...

<BACKGROUND>BKGCOPY<LOOP>N</LOOP><SET>{ "", "Copy.bmp" }</SET></BACKGROUND>
<BACKGROUND>BKGCOLORBW<LOOP>N</LOOP><SET>{ "", "Color.bmp", "BW.bmp" }</SET></BACKGROUND>

```

État de photocopie

```

<STATE>Copy
  <TYPE>MasterState</TYPE>
  <ACTION>BKGCOPY=1</ACTION>
  <ACTION>INCOLOR?BKGCOLORBW=1:BKGOLORBW=2</ACTION>
  <MSG>$NBCOPIESTENS$$NBCOPIESUNITS$ copies - +<X>50</X><Y>13</Y><COL>W</COL></MSG>
  <MSG>Color B&W<X>20</X><Y>30</Y><COL>W</COL></MSG>
  <MSG>Layout : $WITHBORDERS$<X>2</X><Y>56</Y><COL>W</COL></MSG>

  ...
  <BUTTON>Left
    <ACTION>BKGCOLORBW=1</ACTION>
    <ACTION>INCOLOR=1</ACTION>
  </BUTTON>

  ...
  <BUTTON>Menu
    <ACTION>BKGCOPY=0</ACTION>
    <ACTION>BKGCOLORBW=0</ACTION>
    <ACTION>GOTO=Config</ACTION>
  </BUTTON>
  <BUTTON>Photo
    <ACTION>BKGCOPY=0</ACTION>
    <ACTION>BKGCOLORBW=0</ACTION>
    <ACTION>GOTO=Photo</ACTION>
  </BUTTON>

  ...
</STATE>

```

État d'impression des photos

```

<STATE>Photo
  <TYPE>MasterState</TYPE>
  <ACTION>BKGPHOTO=1</ACTION>

  ...
  <MSG>"View and Print Photos"<X>11</X><Y>50</Y><COL>W</COL></MSG>
  <MSG>"Select photos to print"<X>7</X><Y>72</Y><COL>W</COL></MSG>
  <MSG>"Proceed      Select"<X>14</X><Y>96</Y><COL>W</COL></MSG>
  <BUTTON>Left
    <ACTION>BKGPHOTO+1</ACTION>
  </BUTTON>

  ...
  <BUTTON>Copy
    <ACTION>BKGPHOTO=0</ACTION>
    <ACTION>GOTO=Copy</ACTION>
  </BUTTON>

  ...
</STATE>

```

Sous-état de configuration de la qualité d'impression

```

<STATE>QualitySelection
  <TYPE>SubStateLevel2</TYPE>
  <ACTION>BKGQUALITY=IMAGEQUALITY+1</ACTION>
  <MSG>$IMAGEQUALITY[0]$<X>46</X><Y>34</Y><COL>W</COL></MSG>
  <MSG>$IMAGEQUALITY[1]$<X>46</X><Y>48</Y><COL>W</COL></MSG>
  <MSG>$IMAGEQUALITY[2]$<X>46</X><Y>62</Y><COL>W</COL></MSG>
  <BUTTON>Left
    <ACTION>BKGQUALITY=0</ACTION>
    <ACTION>EXITSUBSTATE</ACTION>
  </BUTTON>
  <BUTTON>OK
    <ACTION>BKGQUALITY=0</ACTION>
    <ACTION>EXITSUBSTATE</ACTION>
  </BUTTON>
  <BUTTON>Up
    <ACTION>IMAGEQUALITY+-1</ACTION>
    <ACTION>BKGQUALITY=IMAGEQUALITY+1</ACTION>
  </BUTTON>
  <BUTTON>Down
    <ACTION> IMAGEQUALITY+1</ACTION>
    <ACTION>BKGQUALITY=IMAGEQUALITY+1</ACTION>
  </BUTTON>
</STATE>

```