

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

INTERFACE DIFFUSE : CONCEPTION, DÉVELOPPEMENT ET ÉVALUATION
D'UN NOUVEAU PARADIGME D'INTERACTION
HUMAIN-ORDINATEUR PORTÉ

NICOLAS PLOUZNIKOFF

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

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

(GÉNIE ÉLECTRIQUE)

JUIN 2008



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*

ISBN: 978-0-494-46114-3

Our file *Notre référence*

ISBN: 978-0-494-46114-3

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

■ ■ ■
Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée :

INTERFACE DIFFUSE : CONCEPTION, DÉVELOPPEMENT ET ÉVALUATION
D'UN NOUVEAU PARADIGME D'INTERACTION
HUMAIN-ORDINATEUR PORTÉ

présentée par : PLOUZNIKOFF Nicolas,

en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiae Doctor

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

M. GUIBAULT François, ing., Ph.D., président

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

Mme CHERIET Farida, ing., Ph.D., membre

M. BELKHITER Nadir, Doctorat, membre externe

À mes parents, pour tout.

REMERCIEMENTS

Je tiens, tout d'abord, à remercier mon directeur de recherche, le professeur Jean-Marc Robert, pour m'avoir guidé tout au long de ma thèse ainsi que pour sa flexibilité. Ses commentaires et ses conseils ont toujours été éclairés et utiles.

J'aimerais aussi remercier le CRSNG (Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada) pour l'appui financier (bourse d'excellence) et matériel (subvention de recherche pour l'achat de matériel) qu'il m'a apporté durant mes recherches doctorales.

Finalement, j'aimerais remercier mon frère, Alexandre, pour toutes les discussions constructives que nous avons eues, pour son soutien extraordinaire et ses encouragements constants.

RÉSUMÉ

L'informatique omniprésente (*ubiquitous computing*), la vision d'un support informatique transparent disponible en tout temps et en tout lieu, se manifeste à la fois par un déploiement de systèmes informatiques dans l'environnement (informatique disséminée) et sur l'utilisateur (informatique mobile, informatique portée). Ainsi, un ordinateur porté (*wearable computer*) est un système informatique porté par l'utilisateur, sur son corps ou intégré à ses vêtements ou accessoires, qui est utile et entièrement fonctionnel tout en étant porté, et qui possède quatre caractéristiques fondamentales : il est mobile, constant, (pro)actif et permet, ou aspire à des interactions humain-ordinateur transparentes. Le contexte d'utilisation d'une telle machine, dont le rôle est de soutenir la réalisation d'une tâche du monde réel, est caractérisé par la mobilité de l'utilisateur dans un environnement où les interactions humain-ordinateur ne constituent pas la tâche primaire. Les accès au système, autant en entrée qu'en sortie, devraient ainsi s'intégrer naturellement, et idéalement sans discontinuités, dans le flot des activités nécessaires à l'accomplissement de la tâche. Un ordinateur porté ne devrait donc pas opérer selon des paradigmes d'interaction traditionnels (ex., WIMP), ou employer les métaphores habituelles (ex., métaphore du bureau), qui sont clairement inadéquats pour l'informatique portée puisqu'ils reposent sur des interactions continues avec la machine,

exigent une attention totale de la part de l'utilisateur et sont principalement adaptés à un travail de bureau. Pour l'informatique portée, la tâche, l'environnement et l'ordinateur porté sont en compétition pour les ressources limitées de l'utilisateur dans un contexte où l'ordinateur, de par sa proximité, peut avoir une forte influence sur l'utilisateur. La conception d'un nouveau paradigme d'interaction adapté aux spécificités de l'informatique portée est donc indispensable afin que l'outil technologique s'efface devant l'activité humaine.

De ce fait, nous mettons de l'avant le concept « d'interface diffuse », un nouveau paradigme d'interaction humain-ordinateur porté reposant sur l'hypothèse que plus la tâche implique des objets réels plus l'interface du support informatique soutenant la tâche devrait s'immiscer dans le monde réel. Pour une interface diffuse, l'environnement EST l'interface de l'ordinateur porté. Une interface diffuse permet ainsi d'interagir avec l'ordinateur porté à travers des manipulations usuelles du monde réel. S'appuyant sur les théories de la cognition distribuée et située, ce paradigme de manipulation directe radicalement transformé utilise les artéfacts associés à la tâche et les objets de l'environnement de l'utilisateur comme interface primaire à l'ordinateur porté. Ces entités deviennent alors autant de périphériques de l'ordinateur porté, d'ancres de l'interface, auxquelles sont couplées les fonctionnalités de l'ordinateur porté nécessaires à la réalisation de la tâche.

Afin de tester et valider le nouveau paradigme d'interaction proposé, nous avons conçu et développé des interfaces diffuses pour trois tâches usuelles (gestion d'horaire, recherche bibliographique et gestion bancaire) à partir de l'analyse de la tâche et en

faisant appel à différentes techniques de diffusion : interactions implicites (c.-à-d. se produisant naturellement au cours de la tâche) versus explicites (c.-à-d. introduites artificiellement), manipulations conjointes, etc. Une étude d'utilisabilité en deux volets avec plus de 30 participants a permis de comparer expérimentalement les tâches réalisées de façon conventionnelle et à l'aide de l'ordinateur porté, de mesurer les performances techniques et humaines des interfaces développées et, de manière plus générale, d'investiguer les capacités et les limites du paradigme d'interaction proposé.

Les résultats et les observations recueillies indiquent que le paradigme d'interaction proposé est bien reçu et qu'il est clairement adapté aux ordinateurs portés puisque les interfaces développées sont toutes perçues par les utilisateurs comme étant faciles à apprendre, utiles, efficaces, efficientes, satisfaisantes et, de façon générale, utilisables. De plus, pour les tâches investiguées, un ordinateur porté doté d'une interface diffuse présente un coût d'utilisation, en termes de ressources physiques, perceptuelles et cognitives devant lui être consacrées et d'effort devant être déployé, qui est négligeable par rapport aux bénéfices pouvant en être retirés par les utilisateurs. À la lumière des caractéristiques des tâches, nous avons élaboré des lignes directrices et des principes d'ingénierie pour la conception, le développement et l'évaluation d'interfaces diffuses.

La contribution majeure de cette thèse à l'avancement des connaissances scientifiques et techniques porte sur la conception, le développement et l'évaluation pour les ordinateurs portés d'un nouveau paradigme d'interaction fonctionnel et approprié, accompagné des architectures matérielle et logicielle associées. Ce paradigme permet d'aboutir à des interfaces intrinsèquement locales s'appuyant sur les artéfacts de la tâche. Des

recherches plus poussées sont nécessaires pour étudier les nombreuses facettes des interfaces diffuses mais, en faisant disparaître les métaphores et les périphériques traditionnels, ces dernières nous rapprochent d'une intégration transparente de l'ordinateur porté à la tâche et de la démocratisation de l'informatique portée dont les applications potentielles sont vastes : domaine des services d'urgence, tâches de maintenance, inspection industrielle, utilisation personnelle, etc.

ABSTRACT

The seminal vision depicting ubiquitous computing laid the foundation of both pervasive computing (disseminating computing capabilities in the environment) and wearable computing (integrating computing capabilities to the mobile user). Four fundamental characteristics define a wearable computer: it is useful and completely functional while worn by the user (either directly on the body or integrated to clothes or accessories), it is constant (i.e. always available, always on and always ready to interact with the user), it is (pro)active (i.e. context sensitive) and it enables, or strives for, a seamless integration of human-wearable computer interactions into the natural flow of the user's task related activities. A wearable computer's role is to synergistically support real-world tasks in a context where human-computer interactions are not the primary focus. Because of these key differences compared to traditional computing devices, a wearable computer cannot be limited to and should not even be forced to use current interaction techniques (e.g. based on WIMP), or common operating metaphors (e.g. the desktop metaphor), since these expressly rely on continuous interactions with the system, require a user's total attention and are essentially adapted to a desk related work. Such paradigms are clearly unsuitable for wearable computing for which the task, the environment and the computer are all competing for the user's limited resources and where the computer, because of its

proximity, can have a heavy influence over the user. A new interaction paradigm tailored to the specificities of wearable computing thus needs to be introduced, along with all the underlying interaction mechanisms, in order for the technological tool to disappear in front of human activity.

We therefore set forth the concept of a “diffuse interface”, a new human-wearable computer interaction paradigm based on the hypothesis that the more a real-world task involves physical artifacts, the more the interface of the computer supporting this task should be shifted into the task domain. In a diffuse interface, interactions are initiated and driven using environmental artifacts: the real-world IS the interface to the wearable computer. This ecological approach to human-wearable computer interactions, drawing upon distributed and situated cognition theories, defines a completely transformed direct manipulation paradigm taking advantage of natural human abilities and the environmental characteristics and capabilities made available through the task. All environmental entities thus become potential peripherals, anchors of the interface, enabling a user to intuitively access the computer’s functionalities. As a result, the wearable computer interface emanates from the user’s immediate surroundings.

In order to test and validate the new interaction paradigm we’re advocating, we devised and developed diffuse interfaces for three common tasks (schedule lookup, bibliographic search, banking), starting from the tasks’ analysis and using a variety of diffusion techniques: implicit interactions (i.e. naturally occurring during the task) versus explicit interactions (i.e. artificially designed to be recognized by the computer), joint manipulations, etc. A two-part usability study with more than 30 participants was

conducted to experimentally compare the tasks performed in a conventional manner and with the help of the wearable computer, to measure the technical and human performances of the developed interfaces and, in a more general manner, to investigate the capabilities and the limits of our novel interaction paradigm.

The collected results and observations indicate that the proposed interaction paradigm is well received and well suited to wearable computers: the users perceive all the developed interfaces as being easy to learn, useful, effective, efficient, satisfying and, generally, usable. Moreover, for the investigated tasks, the cost of using a wearable computer through a diffuse interface, in terms of physical, perceptual, and cognitive resources that need to be allocated and the effort that has to be devoted to it, is negligible compared to the benefits that the users can derive. In light of the tasks' characteristics, guidelines and engineering principles have been distilled to guide the design, the development and the evaluation of diffuse interfaces.

The major contribution of this thesis to the advancement of scientific and technical knowledge is the formulation, the development and the evaluation of a new interaction paradigm, which is functional and appropriate for wearable computers, along with its associated hardware and software architectures. This paradigm leads to intrinsically local interfaces drawing upon the tasks' artifacts. Further research is needed to study the numerous aspects of diffuse interfaces but, by eliminating traditional metaphors and peripherals, such interfaces bring us closer to both a seamless integration of the wearable computer to the task. In turn, this could lead to the democratization of wearable

computing which has vast potential applications: in fields such as emergency services, for maintenance tasks, industrial inspection, personal use, etc.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iv
REMERCIEMENTS.....	v
RÉSUMÉ.....	vi
ABSTRACT	x
TABLE DES MATIÈRES	xiv
LISTE DES TABLEAUX.....	xxi
LISTE DES FIGURES	xxv
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....	xxix
LISTE DES ANNEXES	xxxi
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1 Sujet d'étude.....	1
1.2 Informatique portée	3

1.2.1	De l'informatique mobile ...	3
1.2.2	... à l'informatique portée	5
1.2.3	Ordinateur porté	6
1.2.4	Vers une plus grande transparence : l'ordinateur symbiotique	10
1.3	Structure de la thèse	11
CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES INTERFACES HUMAIN-ORDINATEUR PORTÉ		14
2.1	Aspects matériels	16
2.1.1	Périphériques d'entrée de données et de pointage	16
2.1.2	Périphériques de sortie	17
2.2	Aspects logiciels	19
2.2.1	Sensibilité au contexte	19
2.2.2	Information juste-à-temps	21
2.2.3	Réalité augmentée	22
2.3	Facteurs humains	23
2.4	Méthodes d'interaction	27
2.5	Évaluation de l'interface d'un ordinateur porté	32
2.6	Conclusion	34
CHAPITRE 3 : PROBLÉMATIQUE LIÉE AUX INTERACTIONS HUMAIN-ORDINATEUR PORTÉ		35
3.1	Vers une nouvelle interface humain-ordinateur porté	36

3.2	Associations entités - actions - fonctionnalités	40
3.3	Interface diffuse	44
3.4	Un accès personnel au monde de l'informatique ubiquitaire.....	48
3.5	Objectifs de recherche.....	49
3.5.1	Objectif principal	49
3.5.2	Objectifs spécifiques.....	50
CHAPITRE 4 : MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE		55
4.1	Étude comparative.....	55
4.1.1	Motivation.....	55
4.1.2	Choix des tâches	56
4.1.3	Analyse des tâches.....	57
4.1.4	Développement des interfaces diffuses	58
4.2	Tâches expérimentales	61
4.2.1	Tâche 1 : Gestion d'horaire	61
4.2.2	Tâche 2 : Recherche bibliographique	65
4.2.3	Tâche 3 : Gestion bancaire	70
4.2.4	Résumé synthétique	80
4.3	Sujets.....	81
4.4	Protocole expérimental.....	85
4.5	Mesures et observations recueillies.....	88
4.5.1	Mesures objectives.....	89
4.5.2	Mesures subjectives.....	91

4.5.3	Courbes d'apprentissage	94
4.5.4	Évaluation holistique	95

CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT D'UN PROTOTYPE

D'ORDINATEUR PORTÉ ET DES INTERFACES DIFFUSES ASSOCIÉES.....97

5.1	Prototype d'ordinateur porté	97
5.1.1	Architecture matérielle	99
5.1.2	Plate-forme centrale.....	102
5.1.3	Capteurs	106
5.1.4	Alimentation	109
5.1.5	Intégration vestimentaire	112
5.1.6	Dissipation de chaleur.....	115
5.2	Architecture logicielle générique	118
5.2.1	Couche Capteur	119
5.2.2	Couche Interprétation	119
5.2.3	Couche Application	120
5.2.4	Couche Présentation	120
5.3	Interfaces diffuses	122
5.3.1	Présentation d'information	122
5.3.2	Interface diffuse pour la tâche 1	123
5.3.3	Interface diffuse pour la tâche 2	129
5.3.4	Interface diffuse pour la tâche 3	135

CHAPITRE 6 : RÉSULTATS DE L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ET

DISCUSSION	143
6.1 Notes préliminaires	143
6.1.1 Échelles de Likert	143
6.1.2 Validité des mesures composites	146
6.1.3 Significativité statistique	147
6.2 Résultats pour la tâche 1 : Gestion d'horaire	147
6.2.1 Mesures objectives.....	147
6.2.2 Mesures subjectives	148
6.2.3 Observations	155
6.2.4 Courbes d'apprentissage	156
6.2.5 Analyse inférentielle.....	157
6.3 Résultats pour la tâche 2 : Recherche bibliographique	161
6.3.1 Mesures objectives.....	161
6.3.2 Mesures subjectives	162
6.3.3 Observations	169
6.3.4 Courbes d'apprentissage	173
6.3.5 Analyse inférentielle.....	174
6.4 Résultats pour la tâche 3 : Gestion bancaire	179
6.4.1 Mesures objectives.....	179
6.4.2 Mesures subjectives	179
6.4.3 Observations	186

6.4.4	Courbes d'apprentissage	187
6.4.5	Analyse inférentielle	188
6.5	Résultats généraux	193
6.5.1	Analyse inférentielle à travers les trois tâches.....	193
6.5.2	Évaluation comparative par les participants	202
6.5.3	Analyse en fonction du profil des sujets.....	206
6.5.4	Acceptabilité de la technologie.....	207
6.6	Discussion	210
6.6.1	Analyse des performances	211
6.6.2	Interactions implicites versus interactions explicites	213
6.6.3	Conception d'interactions explicites.....	214
6.6.4	Comparaison avec des paradigmes d'interaction traditionnels	215
6.6.5	Présentation d'information et niveaux d'attention	217
6.6.6	Évolution des modes opératoires	219
CHAPITRE 7 : CONCLUSION		221
7.1	Synthèse	221
7.1.1	Lignes directrices pour la conception	222
7.1.2	Lignes directrices pour le développement	223
7.1.3	Lignes directrices pour l'évaluation	224
7.2	Contributions.....	225
7.3	Futures avenues de recherche.....	227
7.3.1	Interfaces diffuses optimales	227

7.3.2 Greffe sur des interfaces préexistantes	229
7.3.3 Informatique portée et informatique disséminée	230
7.3.4 Acceptation de masse	230
RÉFÉRENCES.....	232
ANNEXES.....	247

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 : Caractéristiques des tâches conventionnelles.....	81
Tableau 4.2 : Sexe des sujets.....	82
Tableau 4.3 : Age des sujets.....	82
Tableau 4.4 : Ordre des expériences	87
Tableau 4.5 : Comptes pour les ordres des expériences.....	88
Tableau 4.6 : Comptes pour les ordres de tâches	88
Tableau 4.7 : Mesures composites	94
Tableau 5.1 : Spécifications techniques de l'ordinateur porté (configuration de base) .	101
Tableau 5.2 : Sensibilité des cônes de la vision humaine	123
Tableau 6.1 : Coefficient α de Cronbach des mesures composites.....	146
Tableau 6.2 : Répartition des α de Cronbach calculés	147
Tableau 6.3 : Temps d'exécution en secondes pour la tâche 1	148
Tableau 6.4 : Nombre d'erreurs pour la tâche 1.....	148
Tableau 6.5 : Réponses aux énoncés de Likert pour la tâche 1.....	148
Tableau 6.6 : Mesures composites caractérisant l'interface diffuse pour la tâche 1	153
Tableau 6.7 : Charge physique en pourcentage pour la tâche 1	154
Tableau 6.8 : Charge mentale en pourcentage pour la tâche 1	154

Tableau 6.9 : Effort moyen déployé en pourcentage pour la tâche 1	154
Tableau 6.10 : Modèle d'apprentissage pour la tâche 1	156
Tableau 6.11 : Caractéristiques des différences analysées pour la tâche 1	158
Tableau 6.12 : Tests de normalité sur les différences paires pour la tâche 1	159
Tableau 6.13 : Tests des rangs signés de Wilcoxon pour la tâche 1	159
Tableau 6.14 : Résumé des variations statistiquement significatives lors de l'utilisation de l'ordinateur porté pour la tâche 1	161
Tableau 6.15 : Temps d'exécution en secondes pour la tâche 2	161
Tableau 6.16 : Nombre d'erreurs pour la tâche 2.....	162
Tableau 6.17 : Précision du geste de capture pour la tâche 2	162
Tableau 6.18 : Réponses aux énoncés de Likert pour la tâche 2.....	163
Tableau 6.19 : Mesures composites caractérisant l'interface diffuse pour la tâche 2....	168
Tableau 6.20 : Charge physique en pourcentage pour la tâche 2.....	168
Tableau 6.21 : Charge mentale en pourcentage pour la tâche 2.....	168
Tableau 6.22 : Effort moyen déployé en pourcentage pour la tâche 2.....	169
Tableau 6.23 : Modèle d'apprentissage pour la tâche 2.....	174
Tableau 6.24 : Caractéristiques des différences analysées pour la tâche 2.....	175
Tableau 6.25 : Tests de normalité sur les différences paires pour la tâche 2	176
Tableau 6.26 : Tests des rangs signés de Wilcoxon pour la tâche 2	177
Tableau 6.27 : Résumé des variations statistiquement significatives lors de l'utilisation de l'ordinateur porté pour la tâche 2.....	178
Tableau 6.28 : Temps d'exécution en secondes pour la tâche 3	179

Tableau 6.29 : Nombre d'erreurs pour la tâche 3.....	179
Tableau 6.30 : Réponses aux énoncés de Likert pour la tâche 3.....	180
Tableau 6.31 : Mesures composites caractérisant l'interface diffuse pour la tâche 3	185
Tableau 6.32 : Charge physique en pourcentage pour la tâche 3.....	185
Tableau 6.33 : Charge mentale en pourcentage pour la tâche 3.....	185
Tableau 6.34 : Effort moyen déployé en pourcentage pour la tâche 3.....	186
Tableau 6.35 : Modèle d'apprentissage pour la tâche 3.....	188
Tableau 6.36 : Caractéristiques des différences analysées pour la tâche 3.....	189
Tableau 6.37 : Tests de normalité sur les différences paires pour la tâche 3.....	190
Tableau 6.38 : Tests des rangs signés de Wilcoxon pour la tâche 3.....	191
Tableau 6.39 : Résumé des variations statistiquement significatives lors de l'utilisation de l'ordinateur porté pour la tâche 3.....	193
Tableau 6.40 : Variations relatives entre les temps d'exécution de la tâche.....	195
Tableau 6.41 : Tests de normalité sur les variations relatives entre les temps d'exécution de la tâche.....	195
Tableau 6.42 : Tests de normalité sur les mesures composites.....	196
Tableau 6.43 : Analyses de Friedman comparant les interfaces diffuses utilisées pour les trois tâches.....	197
Tableau 6.44 : Tests post-hoc des rangs signés de Wilcoxon pour les analyses de Friedman significatives.....	199
Tableau 6.45 : Différences statistiquement significatives entre les interfaces diffuses utilisées pour les trois tâches.....	201

Tableau 6.46 : Comparaison des interfaces diffuses utilisées.....	202
Tableau 6.47 : Tests du chi-carré de Pearson pour la comparaison des interfaces	205
Tableau 6.48 : Corrélations statistiquement significatives avec l'âge des sujets.....	207
Tableau 6.49 : Réponses aux énoncés de Likert pour l'acceptabilité de la technologie	208
Tableau 6.50 : Mesure composite de l'acceptabilité de la technologie.....	209
Tableau 6.51 : Caractéristiques des tâches lorsque réalisées avec l'ordinateur porté.....	211

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Émergence de l'informatique mobile	4
Figure 1.2 : Un rapprochement continuels vers l'utilisateur	6
Figure 1.3 : Classification des systèmes informatiques	8
Figure 1.4 : Relation humain - ordinateur symbiotique	10
Figure 2.1 : Exemples de périphériques	19
Figure 2.2 : Des tâches primaires différentes	27
Figure 3.1 : Les entités de l'environnement jouent le rôle de périphériques	37
Figure 3.2 : Comblers le gouffre entre l'espace de la tâche et celui du support à la tâche	38
Figure 3.3 : Représentation d'une interface diffuse	39
Figure 3.4 : Illustration des doubles fonctionnalités des artefacts de la tâche	41
Figure 4.1 : Conception, développement et évaluation d'une interface diffuse.....	60
Figure 4.2 : Feuillet horaire utilisé pour la tâche conventionnelle.....	62
Figure 4.3 : Billet de la tâche 1 conventionnelle présenté aux participants.....	62
Figure 4.4 : AHT pour la tâche 1 conventionnelle.....	63
Figure 4.5 : Modèle NGOMSL pour la tâche 1 conventionnelle.....	63
Figure 4.6 : Série de livres utilisés pour la tâche 2	66
Figure 4.7 : Billet de la tâche 2 conventionnelle présenté aux participants.....	66

Figure 4.8 : AHT pour la tâche 2 conventionnelle.....	67
Figure 4.9 : Modèle NGOMSL pour la tâche 2 conventionnelle.....	67
Figure 4.10 : Billet de la tâche 3 conventionnelle présenté aux participants.....	71
Figure 4.11 : Réalisation de la tâche 3 conventionnelle via le site web reproduit.....	72
Figure 4.12 : Exemple de traces recueillies automatiquement.....	76
Figure 4.13 : Exemple de traces recueillies automatiquement (détails).....	77
Figure 4.14 : AHT pour la tâche 3 conventionnelle.....	77
Figure 4.15 : Modèle NGOMSL pour la tâche 3 conventionnelle.....	78
Figure 4.16 : Distribution de l'âge des sujets.....	82
Figure 4.17 : Programme d'étude des sujets.....	83
Figure 4.18 : Sujets ayant déjà suivi un cours sur les interfaces humain-ordinateur.....	83
Figure 4.19 : Niveau de familiarité des sujets avec l'informatique.....	84
Figure 4.20 : Attitude des sujets face aux nouvelles technologies.....	84
Figure 5.1 : Survol de l'architecture matérielle de l'ordinateur porté.....	100
Figure 5.2 : Spécifications du module principal.....	103
Figure 5.3 : Interconnexions du module principal.....	103
Figure 5.4 : Exemple d'emboîtement de modules PC-104+.....	104
Figure 5.5 : Pile PC-104+ utilisée dans notre prototype.....	104
Figure 5.6 : Module principal au sommet de la pile.....	105
Figure 5.7 : Niveaux d'opération du processeur TM5800 utilisé.....	106
Figure 5.8 : Lecteur RFID et marqueurs miniatures utilisés.....	107
Figure 5.9 : Accès à de l'information par le toucher via des marqueurs RFID.....	107

Figure 5.10 : Photos du dispositif tête haute utilisé lors des expériences	108
Figure 5.11 : Caméras de type Snake (gauche) et Lipstick (droite).....	109
Figure 5.12 : Batteries utilisées (gauche) et bloc d'alimentation assemblé (droite)	110
Figure 5.13 : Interconnexions du transformateur continu-continu utilisé.....	110
Figure 5.14 : Connecteurs bananes (gauche) et de distribution (droite)	111
Figure 5.15 : Prototype d'ordinateur porté.....	114
Figure 5.16 : Protectors de plastique enveloppant le transformateur	115
Figure 5.17 : Solution de refroidissement par convection forcée	118
Figure 5.18 : Maillage de sécurité pour le ventilateur	118
Figure 5.19 : Représentation de l'architecture logicielle	121
Figure 5.20 : Billet de la tâche 1 avec l'ordinateur porté présenté aux participants	124
Figure 5.21 : Diagramme de séquence pour la tâche 1 avec l'ordinateur porté.....	125
Figure 5.22 : Segmentation des marqueurs fiduciaires dans l'image.....	126
Figure 5.23 : Segmentation des pixels de couleur de peau	128
Figure 5.24 : Affichage de la prochaine heure de passage selon la position du doigt ...	129
Figure 5.25 : Billet de la tâche 2 avec l'ordinateur porté présenté aux participants	130
Figure 5.26 : Diagramme de séquence pour la tâche 2 avec l'ordinateur porté.....	132
Figure 5.27 : Présentation d'indices pour guider la prise de décisions.....	134
Figure 5.28 : Contours assimilés à de la peau.....	135
Figure 5.29 : Geste de capture permettant de sauvegarder une partie du champ visuel	135
Figure 5.30 : Billet de la tâche 3 avec l'ordinateur porté présenté aux participants	136
Figure 5.31 : Illustration d'une interaction de type <i>drag & drop</i> pour le transfert	138

Figure 5.32 : Diagramme de séquence pour la tâche 3 avec l'ordinateur porté.....	139
Figure 5.33 : Opération de versement.....	142
Figure 6.1 : Approximation des courbes d'apprentissage pour la tâche 1	157
Figure 6.2 : Exemples de gestes de capture reconnus par le système.....	172
Figure 6.3 : Exemples de gestes de capture non reconnus par le système.....	173
Figure 6.4 : Approximation des courbes d'apprentissage pour la tâche 2	174
Figure 6.5 : Approximation des courbes d'apprentissage pour la tâche 3	188
Figure 6.6 : Synesthésie artificielle via l'ordinateur porté (tâche de mémorisation).....	219
Figure 6.7 : Synesthésie artificielle via l'ordinateur porté (tâche de recherche)	219

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AHT	Analyse Hiérarchique de Tâche.
CLI	"Command-Line Interface", interface utilisateur ligne de commande.
COTS	"Commercial Off The Shelf", composants commerciales disponibles.
DOF	"Degrees 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.
GPS	"Global Positioning System", système de positionnement mondial par satellite.
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.
HTML	"HyperText Markup Language", langage hypertexte utilisé pour la création de pages web.
M.I.T.	"Massachusetts Institute of Technology".
MCT	Mémoire à Court Terme, mémoire de travail.

MLT	Mémoire à Long Terme.
NGOMSL	"Natural GOMS Language" , analyse de tâche GOMS en langage naturel.
RGB	"Red-Green-Blue" , espace de couleur basé sur les composantes de rouge, de vert et de bleu.
PHP	"PHP Hypertext Processor" , langage de programmation notamment utilisé pour la création de page web dynamique lorsque interprété sur un serveur.
PCA	"Principal Component Analysis" , analyse des composants principaux (c.-à-d. ensemble de variables orthogonales, et donc non corrélées, définissant une projection expliquant un maximum de variations dans un échantillon).
SNR	"Signal to Noise Ratio" , rapport signal sur bruit.
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	247
ANNEXE B : QUESTIONNAIRE REMPLI PAR LES PARTICIPANTS LORS DE L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE.....	249

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

En premier lieu, ce chapitre présente brièvement notre sujet d'étude. Nous introduisons ensuite l'informatique portée, le contexte de nos recherches et les caractéristiques fondamentales d'un ordinateur porté. Nous y résumons finalement la structure de la thèse afin de donner au lecteur une meilleure vue d'ensemble de nos travaux de recherche.

1.1 Sujet d'étude

Dans le cadre de leurs activités, les individus ont régulièrement besoin d'accéder à de l'information, de recueillir des données, de communiquer ou d'exécuter différentes tâches durant leurs déplacements. Afin de répondre à ces besoins, de nouvelles plateformes informatiques personnelles apparaissent ou sont en voie d'apparaître. Les ordinateurs portés sont un exemple de telles plates-formes. Ainsi que nous le verrons ultérieurement, un ordinateur porté est un système informatique qui est utile et entièrement fonctionnel tout en étant porté par l'utilisateur (généralement intégré à ses vêtements ou ses accessoires) et qui est destiné à soutenir l'utilisateur dans la réalisation de tâches réelles. De par leur rôle et leur contexte d'utilisation indéniablement différents

des ordinateurs conventionnels, les ordinateurs portés ne peuvent utiliser des périphériques d'entrée/sortie conventionnels et/ou faire appel à des paradigmes d'interaction humain-ordinateur traditionnels (CLI, WIMP, etc.). Il s'agit là d'un problème majeur qui doit nécessairement être résolu pour, à terme, aboutir à des interactions humain-ordinateur portés transparentes, minimisant les ressources devant être investies par l'utilisateur ainsi que les transitions requises entre l'espace de la tâche et l'espace du support à la tâche. Cette thèse traite de ce fait de la création d'un nouveau paradigme d'interaction spécifiquement adapté aux ordinateurs portés. Nous y présentons la conception, le développement et l'évaluation d'un paradigme d'interaction humain-ordinateur porté novateur s'appuyant sur la théorie de la cognition distribuée et celle de la cognition située et que nous avons nommé « interface diffuse ». Un tel paradigme pourrait favoriser l'utilisation d'ordinateurs portés dans diverses industries (pour des tâches d'inspection ou de maintenance par exemple) et éventuellement leur acceptation de masse. Afin de tester et valider ce nouveau paradigme d'interaction, nous privilégions une approche expérimentale qui repose sur une étude d'utilisabilité pour comparer des tâches usuelles réalisées de façon conventionnelle et à l'aide d'un ordinateur porté. Il s'agit donc en résumé de :

- concevoir et développer un prototype d'ordinateur porté;
- concevoir et développer des interfaces diffuses permettant de supporter la réalisation des tâches retenues;
- mesurer les performances techniques et humaines des interfaces développées lors de l'exécution de ces tâches;

- investiguer, grâce aux résultats obtenus, les capacités et les limites du paradigme d'interaction proposé.

1.2 Informatique portée

1.2.1 De l'informatique mobile ...

De nombreux progrès technologiques ainsi que deux tendances fondamentales, la miniaturisation et l'intégration, ont favorisé l'émergence de l'informatique mobile (Figure 1.1). Le concept d'informatique mobile réfère à la capacité d'accéder à des services ou à des applications indépendamment de la localisation physique des utilisateurs, de leurs comportements ou de leurs mouvements. L'informatique mobile se distingue principalement de l'informatique classique fixe par :

- le nomadisme, c.-à-d. la mobilité des utilisateurs et de leurs équipements;
- la rareté des ressources, aussi bien du côté du matériel (la limitation de la taille des claviers et de l'écran, de la bande passante, de l'énergie disponible en sont quelques exemples) que du côté de l'utilisateur (qui dispose d'une attention limitée ou dont les deux mains sont occupées, par exemple).

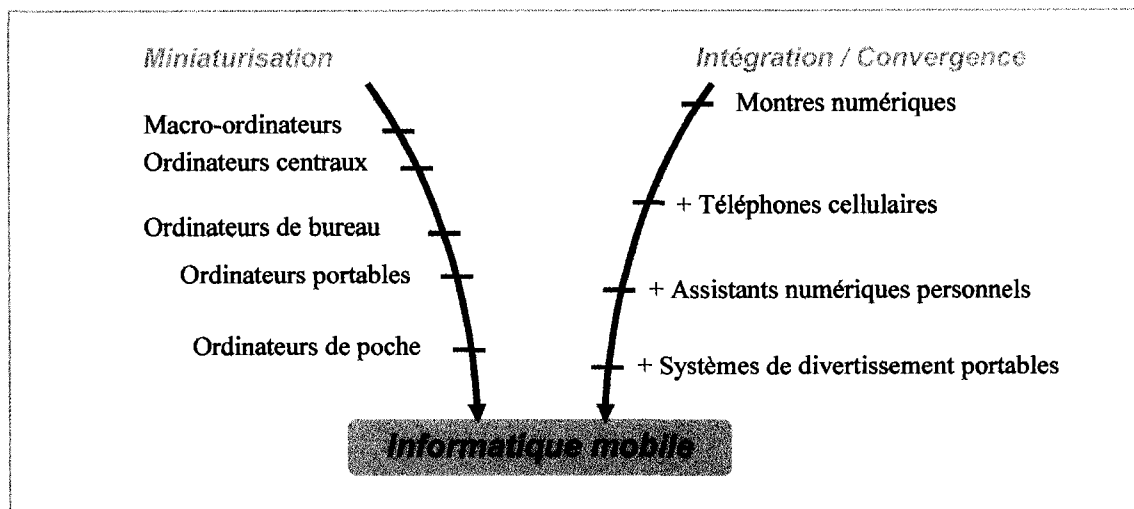


Figure 1.1 : Émergence de l'informatique mobile

La mobilité impose ainsi de nombreuses contraintes de conception concernant la taille, le poids, les capacités de traitement et d'affichage des unités mobiles, la largeur de bande sans-fil et les déconnexions intermittentes, l'autonomie des batteries, les problèmes de la dissipation de chaleur, etc. Toutefois, c'est certainement au niveau des interactions entre les utilisateurs et les appareils mobiles actuels que se situe la plus importante limitation de ces derniers. En effet, ces appareils mobiles ne diffèrent pas, ou très peu, des ordinateurs fixes conventionnels dans la mesure où l'utilisateur doit cesser ses activités pour concentrer toute son attention sur le dialogue avec la machine. Par exemple, ces appareils sont incapables d'offrir l'information dont l'utilisateur a besoin précisément ou à l'instant où il en a besoin, sans monopoliser son attention.

1.2.2 ... à l'informatique portée

L'informatique mobile n'est en fait qu'un premier pas vers un support informatique accessible de façon transparente, en tout lieu et en tout temps, tel que Weiser [86] l'imaginait dans sa vision d'une informatique ubiquitaire (*ubiquitous computing*) qui pourrait se concrétiser par une diffusion de l'informatique dans l'environnement (*pervasive computing*) et/ou éventuellement sur l'utilisateur [68] (*wearable computing*). Ce rêve de pouvoir disposer d'un ordinateur partout, pour qu'il puisse nous assister dans nos tâches quotidiennes, est très séduisant et tout à fait naturel¹. En effet, au cours des années, les ordinateurs se sont constamment rapprochés de l'utilisateur et leur incursion de plus en plus profonde dans notre espace personnel suit naturellement cette tendance (Figure 1.2).

La prochaine vague de l'informatique prend ainsi forme à travers des plates-formes portées et constamment disponibles, des ordinateurs sensibles à l'utilisateur mais aussi à son environnement. De par leur proximité avec l'utilisateur, leurs caractéristiques et leur contexte d'utilisation, la place des ordinateurs portés et le rôle qu'ils sont appelés à jouer apparaissent très différents de ceux des ordinateurs conventionnels.

¹ Entrevue pour l'article "Quand l'homme et la machine vivront en harmonie", dans les nouvelles Internet Cybersciences du magazine *Québec-Science*, Canada, 22 mai 2003.

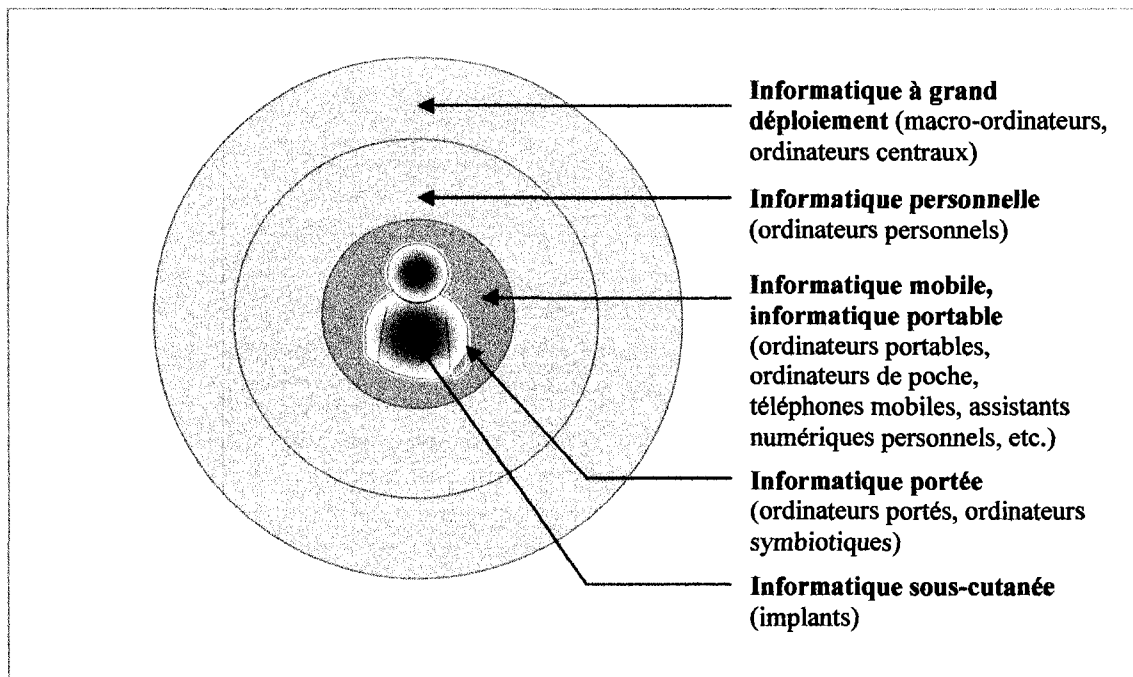


Figure 1.2 : Un rapprochement continu vers l'utilisateur

1.2.3 Ordinateur porté

Tel que nous l'avons défini [63], un ordinateur porté (*wearable computer*) est un système informatique porté en tout temps par l'utilisateur, soit sur son corps ou intégré à ses vêtements ou accessoires, qui est utile et entièrement fonctionnel tout en étant porté et qui possède quatre caractéristiques fondamentales :

- 1) il est mobile, c.-à-d. qu'il doit être léger, de petite taille, et doit pouvoir être porté par l'utilisateur sans le gêner de façon significative dans ses mouvements;
- 2) il est constant, c.-à-d. qu'il est toujours en fonction lorsque porté (constance physique), toujours allumé (constance opérationnelle) et toujours prêt à interagir avec l'utilisateur (constance dans les interactions);

- 3) il est (pro)actif, c.-à-d. qu'il est continuellement en mesure de détecter, quantifier et modéliser, en tout ou en partie, et de façon relativement autonome, le contexte dans lequel les interactions entre l'utilisateur et le système se produisent (l'état de l'utilisateur, ses actions dans le monde réel, l'environnement immédiat, etc.). Il n'est donc pas uniquement tributaire des actions explicites de l'utilisateur et peut par exemple réagir à certaines de ses actions implicites;
- 4) il permet, ou aspire à, un certain degré de transparence dans les interactions humain-ordinateur. Plus les interactions s'effacent devant la tâche à réaliser dans le monde réel, plus la transparence est grande. Les accès au système, autant en entrée qu'en sortie, devraient ainsi s'intégrer naturellement, et idéalement sans discontinuités, dans le flot des activités nécessaires à l'accomplissement de la tâche. Selon la tâche en cours et le rôle de l'ordinateur porté dans sa réalisation, cela peut signifier gérer adéquatement l'attention de l'utilisateur, répondre à des commandes naturelles, fournir une rétroaction intégrée au monde réel (intégration spatiale, temporelle, cognitive...), etc.

Ces quatre caractéristiques peuvent être assimilées à des dimensions permettant de classer les systèmes informatiques et ainsi de situer les ordinateurs portés par rapport à d'autres systèmes informatiques (Figure 1.3).

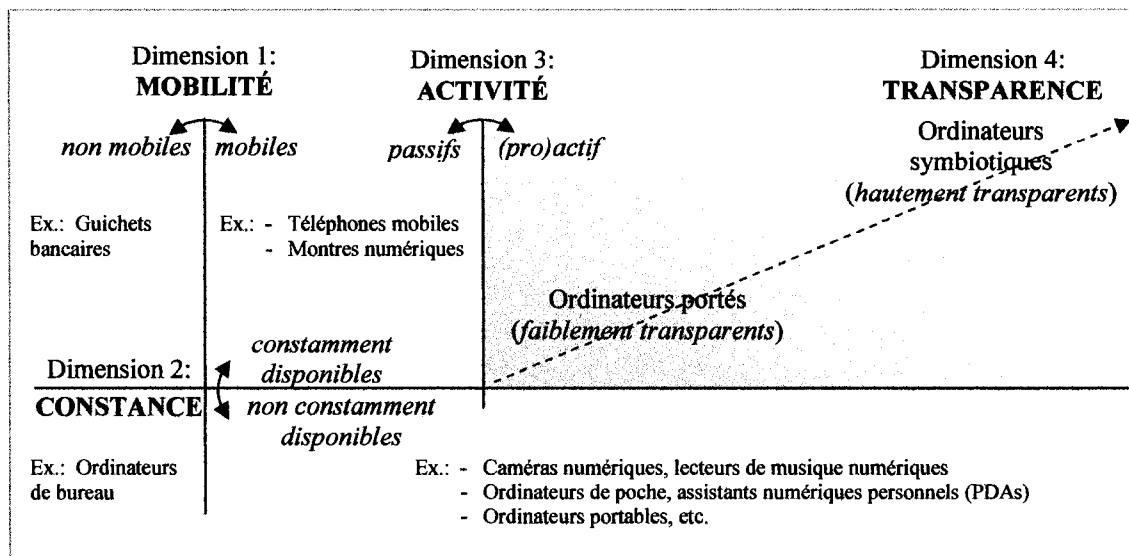


Figure 1.3 : Classification des systèmes informatiques

Un ordinateur porté est un ordinateur incontestablement personnel². Le contexte d'utilisation d'une telle machine est caractérisé par la mobilité de l'utilisateur dans un environnement où les interactions humain-ordinateur ne constituent pas la tâche primaire. De façon générale, le rôle d'un ordinateur porté est d'assister l'utilisateur dans la réalisation d'une tâche du monde réel soit directement, en fournissant une assistance informatique intégrée à la tâche, soit indirectement, en effectuant en arrière-plan une multitude d'opérations mineures ou secondaires. Un ordinateur porté peut contribuer à « augmenter l'utilisateur » au sens de Mackay [42], en lui donnant accès à des informations, mais il n'est pas limité à un tel rôle. Ainsi, afin d'aider à la réalisation

² Entrevue pour le reportage "L'intimité entre l'humain et la machine", émission *Les années lumière*, radio de Radio-Canada, 23 avril 2006.

d'une tâche spécifique, l'ordinateur porté pourrait devoir soutenir jusqu'à quatre types d'activités:

- le recueil de données;
- l'accès à des informations;
- la communication et l'échange d'informations;
- la prise de décision et/ou l'exécution.

À travers ces types d'activités, il est possible de distinguer deux familles pour les ordinateurs portés selon la nature des tâches qu'ils devront soutenir. La première famille est constituée d'ordinateurs portés centrés sur la tâche, dont le rôle est d'améliorer la capacité de l'utilisateur à effectuer, dans un temps limité et un environnement bien circonscrit, une série d'activités spécifiques et ordonnées. Il s'agit souvent de systèmes informatiques destinés à soutenir une tâche industrielle précise, comme par exemple une tâche d'inspection. La seconde famille est constituée d'ordinateurs portés centrés sur l'utilisateur, dont le rôle est de fournir à ce dernier un support informatique de tous les jours. L'ordinateur porté doit alors pouvoir soutenir différentes activités informelles et non-structurées. Ici, les interactions sont continues, les tâches sont interruptibles, sans début ni fin précise, et plusieurs activités peuvent être concurrentes. Idéalement, l'ordinateur porté devrait pouvoir assister l'utilisateur dans toutes les facettes de sa vie quotidienne. Il est nettement plus difficile de concevoir des ordinateurs portés destinés à ce rôle.

1.2.4 Vers une plus grande transparence : l'ordinateur symbiotique

Un ordinateur porté doit pouvoir être utilisé naturellement, comme un prolongement de l'utilisateur, afin de permettre à ce dernier de concentrer son attention sur ce qu'il doit faire dans le monde réel et non pas sur la façon de le faire avec l'ordinateur, sur l'information dont il a besoin et non sur la manière d'y accéder ou de la demander. Pour reprendre l'idée de Norman, un outil technologique transparent devrait s'effacer devant l'activité humaine et devenir « invisible » [52]. Malheureusement, les ordinateurs portés actuels se trouvent au bas de l'échelle de la transparence (zone foncée au début de la flèche en pointillée de la Figure 1.3) tandis que l'idéal à atteindre, les ordinateurs symbiotiques (Figure 1.4), se trouve à l'autre extrémité (zone claire à la fin de la flèche en pointillée de la Figure 1.3).

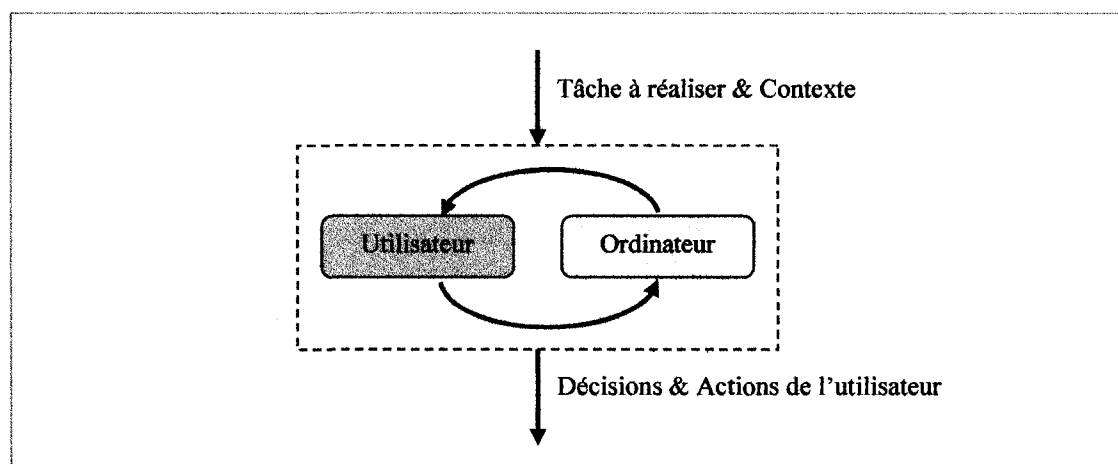


Figure 1.4 : Relation humain - ordinateur symbiotique

Ainsi, un ordinateur symbiotique est un ordinateur porté faisant preuve d'un très haut degré de transparence dans son utilisation. L'adjectif « symbiotique » (du grec sun - avec et bios - vie) fait référence à une union étroite entre des entités et à leur association, qui permet à chacun d'exploiter les avantages de l'autre. Il ne s'agit pas nécessairement d'une symbiose physique mais plutôt, comme l'a imaginé originellement Licklider [37] et l'a repris Mann dans son « Humanistic Intelligence Framework » [44], d'une symbiose mentale résultant des interactions humain-ordinateur constantes, naturelles et transparentes : d'une « intelligence qui émerge lorsqu'un être humain fait partie de la boucle de rétroaction d'un processus de traitement informatique dans lequel l'humain et l'ordinateur sont inextricablement entrelacés ». Même s'il évoque des images de cyborgs³, le terme « ordinateur symbiotique » caractérise bien la relation entre l'utilisateur et cette machine, relation où l'utilisateur bénéficierait en tout temps et de façon transparente de la rapidité de traitement et de l'énorme capacité de stockage de la machine, tandis que cette dernière compterait sur lui pour recueillir de l'information et interpréter des situations complexes ou ambiguës.

1.3 Structure de la thèse

Le premier chapitre vient de survoler notre sujet d'étude, les grandes lignes de la problématique, le nouveau paradigme d'interaction que nous proposons, les objectifs

³ Entrevue pour le reportage "Le cyborg de Polytechnique", émission de télévision *La revanche des Nerds*, Canal Z, Canada, 18 novembre 2004.

poursuivis ainsi que l'approche préconisée. Nous avons également introduit le domaine de l'informatique portée et présenté les caractéristiques fondamentales d'un ordinateur porté. Le deuxième chapitre consiste en une revue de littérature sur les interfaces humain-ordinateur porté traitant des aspects matériels et logiciels des interactions humain-ordinateur porté, des facteurs humains liés aux interfaces humain-ordinateur porté ainsi que des particularités des méthodes d'interactions et d'évaluation de ces interfaces. Le troisième chapitre décrit quant à lui la problématique liée aux interactions humain-ordinateur porté. Il justifie le besoin de concevoir un paradigme d'interaction répondant aux spécificités des ordinateurs portés, articule le nouveau concept d'interface diffuse que nous mettons de l'avant et expose les objectifs poursuivis. Le chapitre 4 détaille la méthodologie employée pour atteindre ces objectifs. Il justifie la nécessité d'une étude comparative, présente les tâches retenues pour cette étude expérimentale, les sujets recrutés, le protocole suivi ainsi que les mesures recueillies. Le chapitre 5 présente l'architecture du prototype d'ordinateur porté que nous avons conçu et développé. Il présente également, pour les tâches retenues, les trois interfaces diffuses conçues ainsi que leur implémentation. Les résultats de l'étude expérimentale sont regroupés et analysés dans le chapitre 6. Ils sont accompagnés d'une discussion critique portant sur les avantages et les inconvénients des techniques d'interactions employées à la lumière des résultats obtenus, des observations recueillies et des caractéristiques des tâches. Finalement, le chapitre 7 synthétise les nouvelles connaissances acquises sous forme de lignes directrices et de principes d'ingénierie pour la conception d'interfaces diffuses et récapitule les travaux accomplis et les principales contributions de cette thèse à

l'avancement des connaissances scientifiques et techniques. Nous y présentons aussi les futures avenues de recherche qui semblent particulièrement prometteuses.

CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES INTERFACES HUMAIN-ORDINATEUR PORTÉ

Les ordinateurs portés peuvent prendre de nombreuses formes. Selon l'application choisie, un ordinateur porté aura plus ou moins de fonctionnalités et sera formé de différentes composantes matérielles. Cependant, un tel ordinateur comprend habituellement une unité centrale de traitement miniature (le cœur de l'ordinateur), divers périphériques d'entrée (clavier, capteurs, etc.), de sortie (dispositif d'affichage visuel, écouteurs, etc.) et de stockage, une source d'énergie ainsi que les interconnexions nécessaires pour relier toutes ces composantes qui sont généralement distribuées autour de l'utilisateur.

Ainsi que l'a synthétisé Starner [72], plusieurs limitations technologiques freinent actuellement le développement des ordinateurs portés (poids et taille des composantes électroniques, densité énergétique des batteries, dissipation de la chaleur produite, etc.) et de nombreux compromis doivent être faits lors de leur conception. Cependant, il est clair que l'évolution technologique [75] va graduellement atténuer ou faire disparaître la majorité de ces limitations. Le défi majeur résidera alors dans la conception et la mise au point de l'interface humain-machine. Le corpus de connaissances actuelles dans le

domaine des interfaces devra être revu, ajusté et complété pour tenir compte des particularités des ordinateurs portés.

Nous présentons donc ici une courte revue de la littérature reliée aux principaux aspects et composantes des interactions humain-ordinateur porté afin :

- de donner un aperçu global du domaine;
- de faire ressortir les limitations des composantes actuelles et l'inadéquation des interfaces humain-ordinateur porté existantes;
- de mettre en relief l'interdépendance des disciplines intervenant lors de l'ingénierie des interactions humain-ordinateur porté.

Cette revue est divisée en cinq sections :

- 1) les aspects matériels des interactions, c.-à-d. les périphériques d'entrée et de sortie;
- 2) les aspects logiciels des interactions, c.-à-d. les techniques logicielles particulières utilisées sur de telles machines pour exploiter les périphériques d'entrée et de sortie;
- 3) les facteurs humains, c.-à-d. principalement les aspects importants de la perception et de la cognition humaine lors de la conception ou de l'évaluation d'interfaces humain-ordinateur porté;
- 4) les méthodes d'interaction, c.-à-d. les styles d'interaction ainsi que les métaphores d'interfaces employés actuellement pour les ordinateurs portés;
- 5) les méthodes d'évaluation des interactions humain-ordinateur porté.

2.1 Aspects matériels

Les périphériques d'entrée et de sortie traditionnels (ex., clavier, souris, écran) sont peu ou pas appropriés pour les ordinateurs portés en raison de leur taille, de leur mode d'utilisation ou du niveau d'attention requis pour les utiliser. De nouveaux périphériques sont donc en train d'apparaître. Nous ne mentionnerons ici que quelques exemples typiques de périphériques d'entrée et de sortie destinés à des ordinateurs portés.

2.1.1 Périphériques d'entrée de données et de pointage

Selon la tâche à effectuer, les périphériques d'entrée et de pointage doivent pouvoir permettre de saisir des données alpha-numériques, de pointer et de sélectionner des objets et de naviguer dans l'interface. Afin d'adapter des dispositifs de sélection conventionnels tels la souris ou le bâton de commande aux ordinateurs portés, ils doivent se libérer des supports de travail conventionnels. Ainsi, le positionnement d'une surface de sélection sur le corps de l'utilisateur a été étudié, par exemple dans [82], et il ressort que les emplacements optimaux se trouvent sur le devant de la cuisse et sur l'avant-bras. Cependant, le simple repositionnement d'un périphérique préexistant, qui n'est pas nécessairement adapté à l'informatique portée, n'est peut-être pas la meilleure solution pour un ordinateur porté.

Pour une entrée massive de données, un clavier est souvent indispensable. Les claviers conventionnels étant trop encombrants, les ordinateurs portés utilisent des claviers miniatures placés sur l'avant-bras ou des claviers à cordes (*chord keyboard*) incorporant parfois un dispositif de pointage, tenant dans une seule main et pour lesquels un

caractère correspond à une combinaison de touches (Figure 2.1.a). Ces claviers sont robustes, peu encombrants et permettent une vitesse de frappe adéquate (jusqu'à 70 mots/min) [40] pour un temps d'apprentissage raisonnable, même s'ils diminuent la transparence globale du système.

D'autres prototypes comme le LightGlove [26] opèrent même sans bouton ni surface de travail, en interprétant les mouvements des doigts [14] ou les gestes de l'utilisateur [78]. De tels dispositifs basés sur l'interprétation d'informations restent encore peu fiables mais montrent bien que la tendance est à la disparition des périphériques reposant sur une activation purement physique. Dans une telle optique, la reconnaissance vocale est utilisée lorsque l'utilisateur doit avoir les mains libres pour réaliser la tâche. Cependant, ainsi que le souligne Starner [74], elle se limite généralement à des commandes simples et n'est pas adaptée à des environnements bruyants ou devant être silencieux. Divers autres capteurs (ex., GPS [24], caméra [78], accéléromètres [64] ou même des capteurs biologiques [45]) permettant d'acquérir des données relatives au contexte sont également des périphériques d'entrée couramment employés pour les ordinateurs portés.

2.1.2 Périphériques de sortie

Les périphériques de sortie doivent être en mesure de fournir à l'utilisateur une rétroaction sur ses entrées et lui donner accès aux informations nécessaires à la tâche. Les périphériques de sortie les plus utilisés sont des dispositifs d'affichage visuels [76] puisque la vision est le sens qui possède la plus importante bande passante (c.-à-d. qui permet de véhiculer la plus grande quantité d'information par seconde). Il s'agit en

général d'un ou de plusieurs écrans miniatures placés à quelques centimètres de l'œil (Figure 2.1.b) et qui peuvent donner l'impression qu'un écran flotte devant l'utilisateur. Nous distinguons deux types de dispositifs visuels : les dispositifs opaques (qui bloquent en partie la vue de l'utilisateur) et les dispositifs semi-transparentes. Si nous apparentons l'affichage d'information à de la réalité mixte, ces dispositifs correspondent respectivement à des dispositifs égocentriques de classe trois et quatre de la classification de Milgram présentée dans la taxonomie de la réalité mixte [47]. Bien que très utiles, de nombreux compromis doivent être faits lors de la sélection d'un modèle particulier de tels dispositifs d'affichage car ils présentent tous de sérieuses limitations soit en termes d'étendue du champ de vision, de consommation d'énergie, de poids, de lisibilité, de luminosité ou de contraste. Une nouvelle génération de dispositifs d'affichage projetant une image directement sur la rétine de l'œil à l'aide d'un laser faible puissance est en développement [20] pour répondre à quelques unes de ces limitations.

D'autres périphériques de sortie font appel aux autres sens, tels que l'ouïe et le toucher, pour transmettre différentes informations à l'utilisateur, comme des systèmes de synthèse de la parole, utilisant des sons ou de la musique, ou produisant des vibrations [22, 83] (pour des environnements trop bruyants ou trop lumineux pour l'utilisation d'autres périphériques). Finalement, tout comme pour les interfaces d'entrée, les interfaces de sortie deviennent de plus en plus multimodales en combinant de façon synergique ou redondante plusieurs périphériques.



Figure 2.1 : Exemples de périphériques

2.2 Aspects logiciels

Afin de tendre vers des interactions humain-ordinateur porté transparentes, les logiciels et les méthodes d'interaction utilisant les périphériques d'entrée et de sortie doivent aussi être adaptés aux particularités de ce nouveau type de plate-forme informatique. Trois aspects logiciels nous semblent particulièrement importants et dignes de mention.

2.2.1 Sensibilité au contexte

Les ordinateurs portés étant des systèmes informatiques (pro)actifs, l'acquisition automatique du contexte et son utilisation devraient contribuer à simplifier les interactions humain-ordinateur porté en permettant de clarifier l'entrée pour l'ordinateur et de filtrer la sortie pour l'utilisateur [71]. Cette « sensibilité au contexte » a donc un rôle important à jouer pour réduire la complexité des interactions humain-ordinateur porté [54]. Par exemple, comme le fait valoir Schmidt [70], il est nécessaire de tenir

compte du contexte pour pouvoir commander l'ordinateur au moyen d'actions implicites et intégrées au flot des activités de la tâche. À l'opposé, l'utilisation seule d'actions explicites ne permet pas d'obtenir des interactions naturelles et ne requérant que peu d'attention. Ainsi, sans contexte, certaines informations ou possibilités d'interactions présentées à l'utilisateur ne seront pas liées à sa situation actuelle.

Acquérir des données relatives au contexte par l'intermédiaire de capteurs est aisé. Il est cependant plus ardu de transformer les données recueillies en informations cohérentes et utilisables par le système, d'isoler les éléments du contexte pertinents à la situation actuelle de l'utilisateur et d'utiliser adéquatement ces informations par la suite. Ceci implique un processus de classification dont le principe est simple mais dont l'implémentation peut rapidement devenir complexe. Un tel processus, présenté par Duda & Hart [18], implique la détection (*sensing*) à l'aide de capteurs, l'extraction des caractéristiques (*feature extraction*) à partir des données fournies par les capteurs, la modélisation (*modeling*), qui correspond à la classification du vecteur de caractéristiques à l'aide de modèles mathématiques (mixture gaussienne, modèle de Markov caché ou autres) et, finalement, l'inférence (*inference*) qui correspond à la combinaison de plusieurs sources d'information pour la prise de décision. Malgré ces difficultés, plusieurs applications utilisant un contexte restreint ont été développées avec succès [2], comme un système de localisation de l'utilisateur parmi un ensemble de lieux prédéterminés pour fournir à celui-ci des informations concernant son emplacement [12].

2.2.2 Information juste-à-temps

Un ordinateur porté doit pouvoir fournir automatiquement l'information dont l'utilisateur a besoin, à l'instant où il en a besoin. Pour ce faire, il est possible de se greffer sur le contexte d'utilisation et ses variations, pour déterminer les informations pertinentes à divulguer à l'utilisateur. Cependant, étant donné la nature probabiliste de la classification du contexte, un système reposant uniquement sur ce dernier ne peut être entièrement fiable. La divulgation d'information devrait donc être progressive : présentation d'informations fragmentaires au début, puis de plus en plus complètes à mesure que l'utilisateur manifeste un intérêt (et confirme ainsi indirectement la classification automatique). Ceci entraîne un faible coût (en termes d'attention) pour les informations présentées par erreur (faux positifs) tout en offrant la possibilité à l'utilisateur de demander plus d'information au moment opportun ou d'arrêter le flot lorsque l'information n'est plus nécessaire. Un tel principe a été investigué par Rhodes [67] et Plouznikoff [59] à l'aide de multiples agents logiciels autonomes qui agissent au nom de l'utilisateur tout en restant en compétition pour son attention.

Les « Memory Glasses » sont un autre excellent exemple d'un tel principe. Il s'agit d'un système de soutien à la tâche destiné à soutenir la mémoire de l'utilisateur à l'aide d'indices ou de rappels fournis juste-à-temps [15]. Afin que la présentation d'information ne monopolise pas l'attention de l'utilisateur, cette dernière peut même être faite à un niveau subliminal, sans que l'utilisateur en soit conscient. Même si elle améliore la performance de l'utilisateur, cette présentation subliminale est cependant

limitée à de courts mots et des recherches plus poussées sont nécessaires pour confirmer les résultats obtenus.

2.2.3 Réalité augmentée

Afin d'augmenter la transparence dans l'utilisation d'un ordinateur porté, les entrées et les sorties de ce dernier devraient idéalement être complètement intégrées à la réalité, sans qu'aucun conflit ou incohérence ne soit perçu par l'utilisateur. La réalité augmentée (*Augmented Reality*) [3], qui peut s'appliquer à n'importe quel sens de l'utilisateur, est une technique qui pourrait à terme permettre d'accomplir ceci. Pour Azuma, la réalité augmentée constitue même une interface naturelle pour les ordinateurs portés [4]. Tel que suggéré dans la taxonomie de Milgram [47], il existe bien entendu différents degrés de réalité augmentée allant de la superposition d'informations virtuelles, qui est relativement facile à réaliser sur un ordinateur porté, à son intégration tridimensionnelle, temporelle et cognitive à l'environnement réel, ce qui est plus difficile à réaliser mais devrait contribuer à améliorer grandement le niveau de transparence dans les interactions. De plus, selon la nature de la tâche à soutenir, il est possible d'augmenter l'évaluation (perception de l'utilisateur) et/ou l'exécution (actions de l'utilisateur) ainsi que le font valoir Dubois et Nigay [17].

Un exemple de réalité augmentée utilisée sur un ordinateur porté est le système générique MARS (*Mobile Augmented Reality System*) [25]. Celui-ci permet à l'utilisateur de percevoir des informations virtuelles qui semblent faire partie de l'environnement. Il a été adapté pour réaliser différentes applications telles qu'un guide

touristique, un système de documentaires situés (*Situated Documentaries*), une plateforme de jeu (ARQuake [80, 81]) et un système destiné au domaine militaire (*Battlefield Augmented Reality System*). Des travaux sur une autre forme de réalité augmentée, la réalité interposée (*mediated reality*), réalisés par Mann [43], ont aussi permis de montrer qu'il était possible de remplacer entièrement certaines portions spécifiques du monde réel, des affiches publicitaires par exemple, par de l'information virtuelle utile.

Malgré le succès de telles expériences, plusieurs problèmes majeurs liés à la nature mixte de la réalité augmentée persistent : 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. De plus, les expériences actuelles sur la réalité augmentée mobile mettent plus l'accent sur la présentation d'information, c.-à-d. l'intégration d'informations virtuelles à la réalité, que sur l'interaction de l'utilisateur avec cette information ou le monde réel.

2.3 Facteurs humains

Puisqu'ils font partie de l'espace personnel de l'utilisateur, les ordinateurs portés ont une plus grande influence sur l'utilisateur et ses actions que les ordinateurs traditionnels. Plus que jamais, le processus de développement de leur interface doit être centré sur l'utilisateur, sa tâche et le contexte, et adhérer aux principes de l'ingénierie de l'utilisabilité [50]. Les facteurs humains liés à l'ergonomie traditionnelle (ergonomie physique) sont importants et ne doivent pas être négligés [5] : contraintes de distribution

du poids de l'ordinateur porté et de ses périphériques, de placement des composantes sur le corps de l'utilisateur, de dissipation de chaleur [77], etc. Nous ne discuterons cependant ici que des facteurs liés à la perception et la cognition qui influent sur la sélection ou la conception de méthodes d'interaction humain-ordinateur porté puisqu'il s'agit là de notre domaine de recherche.

Le modèle des ressources multiples de Wickens [87, 88], qui repose sur l'existence de ressources spécialisées pour l'acquisition d'informations, leur traitement et les réponses données par l'humain, reste un modèle fini de ressources. Ainsi, lorsque l'utilisateur réalise deux tâches concurrentes nécessitant son attention (tâche principale dans le monde réel, secondée par l'utilisation de l'ordinateur porté pour soutenir cette tâche primaire), il peut se produire une compétition pour des ressources perceptuelles et cognitives. Une telle compétition résultera en une interférence entre les deux tâches, ce qui diminuera la performance pour ces dernières, entraînera un temps de réponse plus lent de la part de l'utilisateur, etc. En fait, plus les modalités perceptuelles et les processus cognitifs sollicités par les deux tâches sont identiques et plus le niveau d'attention global requis par les tâches est élevé, plus les tâches interféreront entre elles. Une telle interférence est particulièrement problématique pour les ordinateurs portés car ils doivent soutenir une tâche dans le monde réel : plus la complexité de la tâche à effectuer dans le monde réel augmente, plus l'utilisation d'un système de soutien à la tâche est justifiée. Cependant, lorsque cette complexité augmente, la capacité de l'utilisateur à utiliser un tel système diminue puisqu'il doit consacrer toute son attention

à la tâche primaire. Dans de telles conditions, apporter un soutien adéquat à la tâche est le plus difficile précisément là où il est le plus nécessaire.

Heureusement, cette interférence avec la tâche primaire peut être atténuée en réduisant les ressources perceptuelles et cognitives sollicitées par l'ordinateur porté. Il est toutefois primordial, dans cette tentative de réduction, de tenir compte des capacités et des limites perceptuelles de l'utilisateur, qui auront un impact déterminant sur le choix des périphériques de sortie ainsi que sur celui des modes de présentation de l'information : lire un texte à l'écran est par exemple plus rapide qu'en écouter une version audio et il est plus aisé pour l'utilisateur de partager son attention entre différentes sources visuelles qu'entre différentes sources sonores. Notons aussi que, dans le choix des périphériques, certains peuvent avoir un impact négatif sur la perception de l'utilisateur; ainsi même si les dispositifs d'affichage monoculaires semi-transparents sont les moins restrictifs au niveau de l'obstruction du champ de vision de l'utilisateur, ils peuvent engendrer de sérieux problèmes [36] : 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 d'accommodation (distances focales) différentes, etc. Finalement, puisque l'analyse des informations fournies par l'ordinateur porté impose une certaine charge cognitive à l'utilisateur, il semble judicieux d'accélérer leur traitement en renforçant par exemple leur cohérence (spatiale, temporelle ou autre) avec le monde réel. Il a été ainsi démontré que la présentation d'informations visuelles cohérentes avec l'orientation et la position de l'utilisateur dans le monde réel [7] donne de meilleurs résultats dans des tâches de

recherche d'information qu'un affichage fixe par rapport à la tête de l'utilisateur. Un système plus facile à utiliser et plus intuitif donne inévitablement une meilleure performance humaine.

En ce qui concerne l'entrée de données, la sensibilité au contexte constitue une partie de la solution : l'utilisation de commandes implicites [70] basées sur la reconnaissance et l'interprétation de phénomènes réels se produisant naturellement au cours de la tâche est évidemment moins coûteuse sur le plan cognitif que celle de commandes explicites de la part de l'utilisateur. De plus, pour les ordinateurs portés, les périphériques ne nécessitant pas de coordination main-oeil précise sont préférables puisqu'ils requièrent moins d'attention de la part de l'utilisateur que les pointeurs traditionnels (souris). Cependant, même quand l'utilisation du contexte permet de diminuer le besoin d'entrées explicites de l'utilisateur, des applications interactives doivent quand même présenter de l'information à l'utilisateur, ce qui entraîne invariablement des demandes perceptuelles et cognitives.

En bref, il est nécessaire d'évaluer l'impact sur l'utilisateur de chaque dispositif d'entrée/sortie et de chaque mécanisme d'interaction employé. Pour diminuer la charge perceptuelle et cognitive de l'utilisateur, et donc les interférences avec la tâche primaire, il est vital d'utiliser le contexte, de minimiser la quantité d'informations présentées simultanément à l'utilisateur (plutôt le faire en mode juste-à-temps) et de tenter d'intégrer cette information à l'environnement (comme dans la réalité augmentée).

2.4 Méthodes d'interaction

Un ordinateur porté n'est pas limité à un usage traditionnel. Ainsi, les paradigmes ou styles d'interaction humain-ordinateur que l'on retrouve dans les interfaces des ordinateurs de bureau conventionnels (langage de commandes, langage naturel, menus, manipulation directe, questions/réponses et formulaires) sont généralement inadéquats pour de telles machines. En effet, ces paradigmes reposent essentiellement sur des interactions continues avec la machine qui exigent une attention totale de la part de l'utilisateur. Pour un ordinateur porté, les interactions humain-ordinateur ne constituent pas la tâche primaire (Figure 2.2) et plusieurs tâches et stimuli provenant de l'environnement peuvent entrer en compétition pour l'attention de l'utilisateur. Ce dernier ne peut alors consacrer que des ressources limitées aux interactions avec l'ordinateur qui se doit alors de supporter des interactions pouvant être discontinues, et pouvant faire suite à des comportements informels et opportunistes de l'utilisateur.

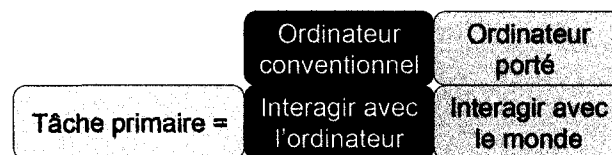


Figure 2.2 : Des tâches primaires différentes

Plusieurs efforts ont cependant été faits pour tenter d'utiliser, soit directement soit après adaptation, les méthodes d'interaction les plus courantes. Par exemple, une interface primaire de type ligne de commande (CLI) basée sur un langage de commande et des touches fonctions (interface réalisée sous Emacs) a été employée pendant quelques

années et avec beaucoup de succès sur de nombreux prototypes développés au M.I.T. Ainsi le *Remembrance Agent* (agent du souvenir) utilise une interface de type texte [65] pour soutenir la mémoire de l'utilisateur en associant des informations à des contextes particuliers. Par contre, les interfaces de manipulation directe conventionnelles (GUI) qui peuvent incorporer des Fenêtres-Icônes-Menu-Pointeurs (WIMP) n'ont pas jusqu'à présent été adaptées (en utilisant des composantes contrôlées par le contexte par exemple) avec succès aux ordinateurs portés. Deux raisons peuvent expliquer ceci. La première est liée aux ressources matérielles requises pour les interfaces de type GUI (par rapport aux CLI) ainsi qu'aux limitations des dispositifs d'affichages (résolution en particulier) et de pointage (précision et contrôlabilité du pointeur d'entrée). La seconde est liée à la nature intrinsèque de l'interface de manipulation directe qui rend les interruptions dans la tâche très coûteuses. En effet, avec une interface de type CLI, une interaction en cours peut être interrompue et reprise aisément puisque la commande ou l'historique des commandes encode explicitement l'endroit où cette interaction a été interrompue. Avec une interface de type GUI, une recherche visuelle pour la localisation du pointeur est nécessaire et l'interface n'encode que peu d'information concernant l'état de l'interaction. La reprise d'une interaction interrompue demande donc plus d'efforts. De plus, la coordination main-œil complexe et l'attention requises pour la simple manipulation du pointeur (tâche spatiale) interfèrent avec de nombreuses autres tâches visuelles ou motrices (se déplacer par exemple, qui est aussi une tâche spatiale) [66]. Il est vrai d'un autre côté que l'entrée de commandes à l'aide d'un clavier (manipulation de matériel linguistique une fois les positions des touches acquises) peut

interférer avec la parole et d'autres tâches linguistiques mais le faible niveau d'attention requis permet tout de même à l'utilisateur d'évoluer parallèlement et relativement normalement dans le monde réel. De tels phénomènes, qui peuvent facilement être expliqués par des ressources en compétition dans le modèle des ressources Wickens [87, 88], mettent en relief les problèmes perceptuels et cognitif liés à la conception d'interfaces humain-ordinateur portés. Pour toutes ces raisons et puisque l'attention de l'utilisateur est la ressource la plus rare, il n'est pas approprié, ni souvent même possible, d'utiliser une interface reposant sur la manipulation directe conventionnelle pour les ordinateurs portés.

Afin de pallier à la fois aux limitations des interfaces de manipulation directe et à la relative linéarité des interfaces basées sur la ligne de commande, un gestionnaire de fenêtres nommé Anduin [31] a été développé pour la plate-forme informatique portée MITHril [16]. Un tel gestionnaire fonctionne sans dispositif de pointage, à partir de boutons de commandes pour les entrées explicites, et permet d'accéder rapidement à des informations pertinentes ou contextuelles. Seule l'application principale est active et visible à un instant donné tandis que les autres se trouvent dans une barre de tâches. Plusieurs d'entre elles peuvent aussi réserver un espace écran restreint ou avoir accès à une zone de messages commune pour fournir des informations rapides ou contextuelles à l'utilisateur. Une telle interface présente cependant plusieurs désavantages. Le premier est que, même si les applications peuvent être sensibles au contexte, l'interface globale ne l'est pas et elle n'intègre pas ses sorties avec la réalité. De plus, puisque chaque

application est indépendante et qu'il n'y a pas de système de gestion global de l'attention, une coopération entre applications est nécessaire.

L'intégration des sorties avec la réalité passe très certainement par une forme de réalité augmentée (voir section 2.2). Les interfaces basées sur une telle technique ainsi que les méthodes d'interaction, souvent implicites, qui ont été proposées sont intéressantes mais sont généralement développées empiriquement et varient grandement d'un concepteur à l'autre et en fonction de l'activité que l'ordinateur doit soutenir. De plus, la grande majorité des interfaces en réalité augmentée présentées ne se contentent que de fournir de l'information en fonction du contexte et n'incorporent pas de partie entrée de données ni de commande de l'ordinateur : l'ordinateur porté en est alors souvent réduit à un système automatique d'accès à de l'information déclenché à partir d'indices du contexte. Par exemple un guide de musée virtuel [69] permet de superposer automatiquement une courte description à côté d'une peinture lorsque cette dernière est détectée. Un autre exemple est le système MARS lorsqu'il est utilisé pour l'assistance à la navigation [25] : le guidage de l'utilisateur se fait en réalité augmentée mais, lorsque l'utilisateur doit spécifier une destination, un système de menu accompagné d'un pointeur est utilisé ! Pour finir, mentionnons qu'il existe tout de même des systèmes de réalité augmentée pour lesquels des méthodes un peu plus adéquates sont employées : ainsi il est par exemple possible d'utiliser des gants dotés de marqueurs fiduciaires pour contrôler la sélection et le déplacement d'objets virtuels en réalité augmentée [34, 55]. Cependant, de telles méthodes se concentrent trop sur les techniques liées à la réalité augmentée et

ne tiennent pas compte du rôle particulier que l'ordinateur porté est appelé à jouer. Elles ne sont qu'une réutilisation des techniques développées pour la réalité augmentée fixe. Finalement, une nouvelle métaphore d'interfaces devra aussi être développée pour les ordinateurs portés. Celle-ci aura vraisemblablement très peu à voir avec la métaphore du bureau actuelle [11] car cette dernière paraît peu adaptée aux environnements de travail autres que le bureau. Pour l'instant, il n'existe pas de métaphore comparable pour les ordinateurs portés : les concepteurs créent et utilisent plutôt des métaphores d'une portée limitée spécifique à la tâche devant être soutenue par la machine. Il y a donc un besoin de repenser la métaphore d'interface afin de créer une plate-forme matérielle et logicielle cohérente et compatible avec le rôle général de l'ordinateur porté et les besoins des utilisateurs mobiles.

Pour résumer, il est clair que les paradigmes actuels des interfaces des ordinateurs conventionnels ne sont pas réellement adaptés à l'informatique portée et que les styles d'interaction traditionnels devraient tous être réétudiés et adaptés si possible aux ordinateurs portés. Pour ce faire, de nouveaux mécanismes d'interaction qui permettront de tendre vers des interactions aussi transparentes et naturelles que possible doivent être conçus, développés, testés et validés. La règle générale est toujours de maximiser la performance de l'utilisateur (par rapport à la tâche primaire) tout en minimisant l'attention devant être investie par l'utilisateur et en évitant autant que possible une division de son attention entre la tâche réelle et l'interaction avec l'ordinateur porté [73]. Cette gestion de l'attention, qui passe par une utilisation du contexte pour adapter l'interface utilisateur à l'environnement courant, peut se révéler particulièrement

complexe puisqu'il faut être en mesure de présenter l'information dans des modalités qui captent plus ou moins l'attention humaine pour essayer de tendre vers des interactions humain-ordinateur portés transparentes.

2.5 Évaluation de l'interface d'un ordinateur porté

Peu de recherches se sont attardées spécifiquement à l'évaluation de l'interface des ordinateurs portés. Avec de telles machines, il devient difficile d'appliquer plusieurs méthodes existantes d'évaluation de la qualité des interfaces. En effet, l'évaluateur ne peut se placer dans l'espace de travail de l'utilisateur mobile et il est difficile d'accéder à tout ce que ce dernier perçoit. De plus, pour comprendre les actions de l'utilisateur, l'évaluateur doit à la fois examiner les interactions entre l'utilisateur et l'ordinateur porté, et le contexte dans lequel elles se produisent. Les quelques méthodes d'évaluation de l'utilisabilité proposées (dans [39, 79] par exemple) reposent toutes sur la même idée : tenter d'enregistrer tout ce que perçoit l'utilisateur, capter les entrées qu'il effectue, les données acquises via les capteurs de l'ordinateur et l'état de ce dernier; la ligne temporelle produite regroupant toutes ces informations est ensuite analysée.

Une évaluation subjective est aussi possible en vérifiant si une interface donnée respecte les principes directeurs de conception d'une interface humain-ordinateur porté. Norman a déjà proposé un modèle d'interaction humain-ordinateur basé sur les sept étapes de l'action [51] qui constitue une bonne analyse des facteurs perceptuels et cognitifs influençant l'utilisabilité d'un système. Dans ce modèle, l'utilisateur et le monde

(incluant le système informatique) interagissent à travers un processus d'exécution et d'évaluation. Entre les buts et intentions de l'utilisateur et le monde qui doit être manipulé, deux gouffres surgissent : le gouffre de l'évaluation et le gouffre de l'exécution. Dans le modèle de Norman, les bonnes interfaces permettent de combler aisément ces gouffres en rendant l'évaluation et l'exécution faciles. À partir du modèle de Norman [51] modifié pour prendre en compte la division de l'attention et les effets de médiations se produisant pour l'informatique portée ainsi que d'une analyse sommaire du modèle GOMS [10] réalisée en fonction de l'informatique portée, DeVaul [15] a proposé cinq principes pour obtenir des interactions humain-ordinateur portée ne nécessitant qu'une faible attention pour la réalisation d'une tâche. En résumé il s'agit de :

- 1) éviter d'encombrer physiquement et perceptuellement l'utilisateur;
- 2) éviter les distractions inutiles dans l'interface;
- 3) concevoir des interfaces qui sont rapides à interpréter pour l'utilisateur (combler le gouffre d'évaluation);
- 4) simplifier les interfaces autant que possible sans nécessairement éliminer totalement les fonctionnalités avancées (combler le gouffre d'exécution);
- 5) éviter les pointeurs, les états cachés de l'interface, les changements non évidents dans l'interface, et ne pas prendre pour acquis que l'utilisateur porte une attention à l'interface.

Ces cinq principes pourraient servir lors de l'évaluation du degré de transparence de l'interface qui reste un important défi à relever.

2.6 Conclusion

Un ordinateur porté implique forcément de nouvelles façons de gérer de l'information [8] et une telle machine ne devrait donc pas être limitée à des rôles traditionnels ni même opérer selon les paradigmes associés aux interfaces conventionnelles (clavier, souris, GUI, WIMP, métaphore du bureau, etc.). Les stratégies actuelles d'interaction nécessitent que beaucoup trop d'attention soit dédiée à la machine et elles ne peuvent être appliquées à des ordinateurs portés. Les limites des ordinateurs portés actuels se trouvent au niveau de l'interface qui doit tenir compte du rôle de l'ordinateur porté mais surtout des limites perceptuelles et cognitives de l'utilisateur dans un contexte entièrement différent de celui des ordinateurs conventionnels.

Dès 1996, MacIntyre [41] affirmait que les dispositifs d'affichage portés et semi-transparents couplés à des ordinateurs portés avaient le potentiel d'être le « Walkman™ du 21^{ème} siècle ». Cependant, pour se réaliser, cette vision a besoin d'un nouveau paradigme d'interface et de mécanismes d'interaction appropriés pour les ordinateurs portés. Le domaine des interactions humain-ordinateur porté est ainsi en constante évolution, et il est très probable que nous arrivions sous peu à une transition aussi importante que celle qui a amené l'adoption de masse des interfaces graphiques dans les années 1980.

CHAPITRE 3 : PROBLÉMATIQUE LIÉE AUX INTERACTIONS HUMAIN-ORDINATEUR PORTÉ

La création d'une interface appropriée pour les ordinateurs portés représente un défi majeur car, afin de réduire la charge cognitive et perceptuelle de l'utilisateur, les accès doivent être aussi « transparents » que possible et requérir peu d'attention lors de la saisie de données, la présentation d'information, la communication et le soutien à la tâche. Lors de l'emploi d'un ordinateur porté, la ressource limitatrice est l'attention de l'utilisateur. Ceci contribue à rendre les paradigmes d'interaction actuels inadaptés à de telles machines. Afin d'améliorer la transparence dans les interactions humain-ordinateur porté, il devient donc essentiel de tenter de définir un nouveau paradigme d'interaction et d'introduire de nouveaux mécanismes d'interaction supportant ce paradigme⁴. Ce chapitre présente ainsi la problématique liée aux interactions humain-ordinateur porté, articule et justifie le nouveau paradigme d'interaction proposé pour les ordinateurs portés, et décrit pour finir les objectifs de recherche poursuivis.

⁴ Entrevue pour l'article "Réinventer les modèles d'interaction humain-ordinateur", magazine *L'actualité*, vol.31 no.5, Canada, édition du 1^{er} avril 2006, p.64.

3.1 Vers une nouvelle interface humain-ordinateur porté

Pour la création d'une nouvelle interface humain-ordinateur porté, trois observations importantes doivent être gardées à l'esprit :

- 1) le rôle de l'ordinateur porté est d'aider l'utilisateur dans la réalisation d'une tâche réelle qui nécessite généralement que ce dernier interagisse avec certaines entités spécifiques du monde réel;
- 2) l'utilisateur ne devrait pas avoir à faire la transition entre ce qu'il veut réaliser dans le monde réel et la manière de soutenir son activité avec l'ordinateur porté;
- 3) les interactions avec un ordinateur porté devraient idéalement se fondre dans le flot des activités de l'utilisateur, sans monopoliser son attention.

De plus, même s'il est évident que les interfaces de manipulation directe conventionnelles basées sur des pointeurs ne sont pas appropriées pour les ordinateurs portés, ces interfaces possèdent tout de même des caractéristiques intéressantes telles que la facilité d'apprentissage et les relations claires reliant les commandes et les opérations. Il serait donc très intéressant de créer un nouveau paradigme d'interface de manipulation directe possédant de telles caractéristiques mais conçu dès le départ pour les ordinateurs portés et reflétant les observations ci-dessus.

Une telle conception passe obligatoirement par une meilleure compréhension des interactions se produisant dans un monde complexe où la tâche primaire n'est plus confinée à un bureau. Au lieu de forcer l'utilisateur à utiliser des intermédiaires ou un espace artificiel pour accéder aux fonctionnalités de l'ordinateur soutenant son activité courante, il devrait être possible de rapprocher ces fonctionnalités du monde réel, voire

même de les intégrer à ce dernier. Ainsi, l'interface d'un ordinateur porté devrait naturellement être perçue par l'utilisateur comme faisant partie de son environnement immédiat. Une approche écologique dans laquelle les interactions humain-ordinateur porté sont initiées et guidées à partir d'entités réelles (appareils, objets, personnes, etc.) appartenant à l'environnement est alors toute indiquée. Ainsi, le monde réel EST l'interface à l'ordinateur porté. Les entités réelles de l'environnement constituent autant de points d'entrée, d'ancres, de l'interface et les fonctionnalités de l'ordinateur sont accessibles à travers des interactions avec ces objets réels (cf. Figure 3.1). Cette « manipulation directe du monde réel » permet de combler le gouffre existant entre le monde réel et le monde virtuel (cf. Figure 3.2) et suggère pour les interactions un modèle décentralisé et distribué qui transpire dans l'environnement de l'utilisateur. L'interface humain-ordinateur porté est diffuse.



Figure 3.1 : Les entités de l'environnement jouent le rôle de périphériques

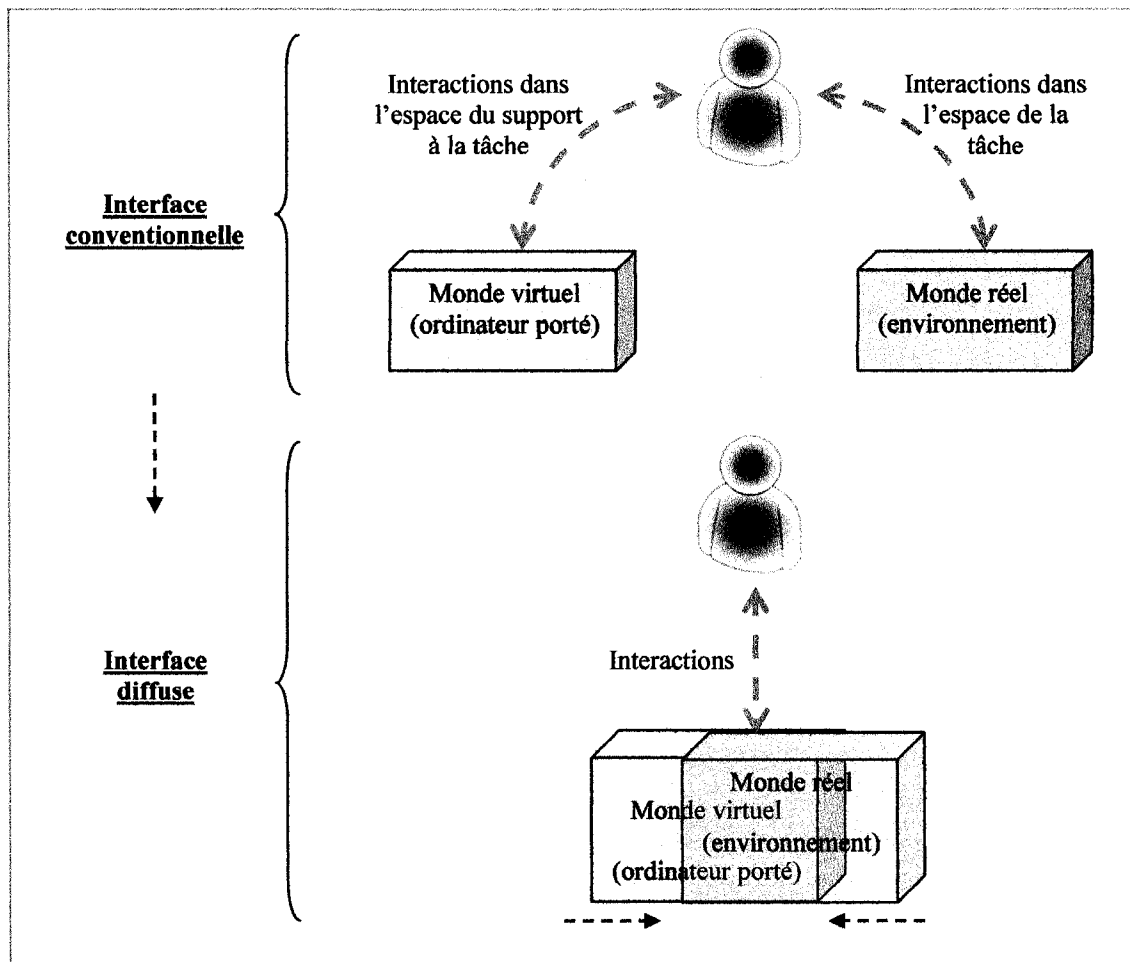


Figure 3.2 : Comblant le gouffre entre l'espace de la tâche et celui du support à la tâche

Un exemple d'interface diffuse simple est illustré ci-après (Figure 3.3). Imaginons que l'utilisateur veuille gérer son compte bancaire. Il pourrait alors sortir de son portefeuille (Interaction 1) sa carte bancaire (objet A) et la fixer du regard pour accéder à son solde. Puis, s'il décide de commander une copie papier de son relevé de compte, il lui suffirait de placer sa carte (interaction 2) sur une feuille de papier vierge (objet B).

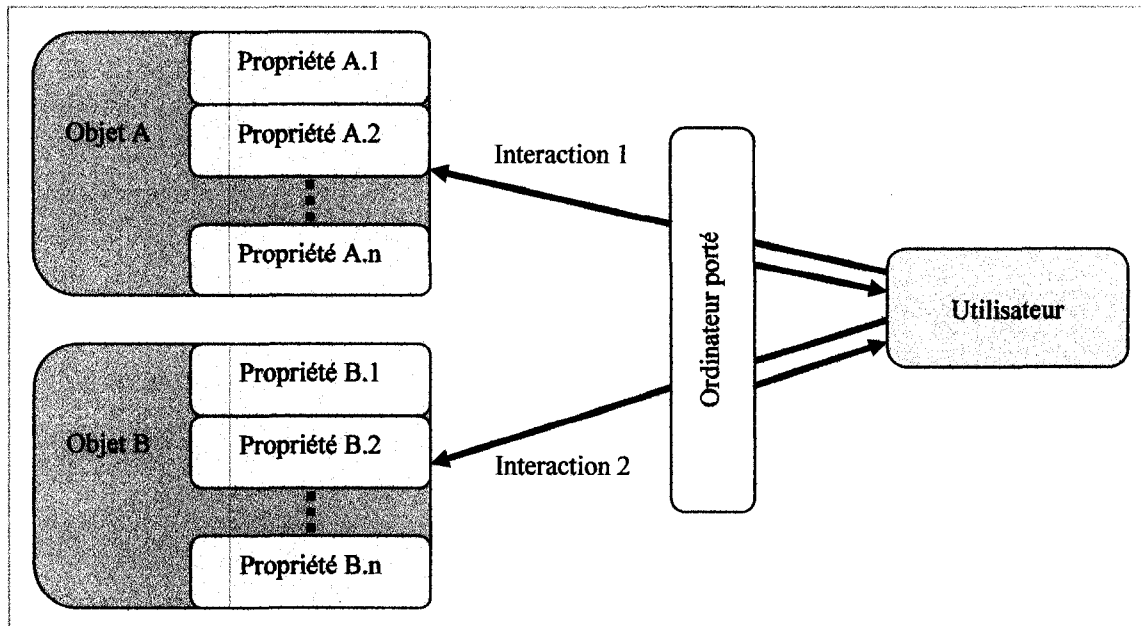


Figure 3.3 : Représentation d'une interface diffuse

Cet exemple illustre à la fois l'utilisation de gestes implicites (Interaction 1) et explicites (Interaction 2) que nous désirons tester. Il existe bien entendu de multiples façons de combiner et d'utiliser des actions implicites et explicites. Nous pourrions ainsi imaginer pointer du doigt (action explicite) un arrêt d'autobus pour le sélectionner et ensuite interagir avec cet objet par le biais de commandes vocales en lui demandant tout haut de nous donner le temps restant jusqu'au prochain passage. Nous pourrions alternativement imaginer accéder automatiquement à cet horaire lorsque l'ordinateur porté détecte que l'utilisateur fixe cet arrêt du regard (action implicite).

Un tel style d'interaction vient conceptuellement rejoindre l'idée d'interface tangible mis de l'avant par Ishii et Ullmer [28, 84] et s'inscrit directement dans le cadre des recherches actuelles sur les interfaces naturelles [1] et le traitement situé (*situated*

computing) [48]. Les interfaces tangibles (TUI) éliminent la distinction faite dans les interfaces traditionnelles entre les représentations de l'information à manipuler et les contrôles (périphériques d'entrée et de sortie) qui servent de portails pour faciliter cette manipulation. Ces interfaces donnent une présence physique à des informations virtuelles et permettent à l'utilisateur de les combiner, traiter, explorer, etc. en les manipulant physiquement d'une manière significative. Cependant, contrairement aux interfaces tangibles « pures », nous ne cherchons pas nécessairement à donner une forme physique à de l'information virtuelle mais plutôt à associer à des objets tangibles des fonctionnalités virtuelles qui pourront être activées par différentes actions de l'utilisateur. Par rapport au modèle instrumental de Beaudoin-Lafon [6], les entités réelles associées à la tâche deviennent à la fois les objets du domaine et les instruments d'interaction.

3.2 Associations entités - actions - fonctionnalités

Le nouveau paradigme que nous mettons de l'avant tente d'utiliser la richesse des objets du monde physique, leurs qualités physiques et les réactions instinctives qu'ils produisent. Au lieu de remplacer les objets physiques par des ordinateurs ou de les modifier en leur ajoutant de l'électronique (*pervasive computing*), nous voulons créer un paradigme d'interaction qui permettra aux utilisateurs d'ordinateurs portés à la fois d'interagir avec le monde réel de manière naturelle et de bénéficier des fonctionnalités ajoutées apportées par l'ordinateur porté. Il s'agit là d'une forme de réalité augmentée :

des objets ordinaires se retrouvent « augmentés » : ils préservent leurs caractéristiques conventionnelles et peuvent être utilisés normalement mais, lorsque l'utilisateur est doté d'un ordinateur porté une nouvelle dimension apparaît. On assiste alors à la naissance d'objets ayant potentiellement une double fonctionnalité : une série de fonctionnalités réelles (leurs fonctionnalités conventionnelles) et une série de fonctionnalités virtuelles (les fonctionnalités de l'ordinateur porté que cet objet rend accessibles). Idéalement, pour faciliter l'apprentissage et l'utilisation, une relation complémentaire devrait exister entre ces deux familles de fonctionnalités, entre la partie réelle de l'objet, ses aspects multi-sensoriels et tangibles, et la partie virtuelle associée, ses aspects dynamiques. Les objets physiques deviennent des conteneurs d'information virtuelle ou des points d'entrée à des fonctionnalités offertes par l'ordinateur porté (Figure 3.4).

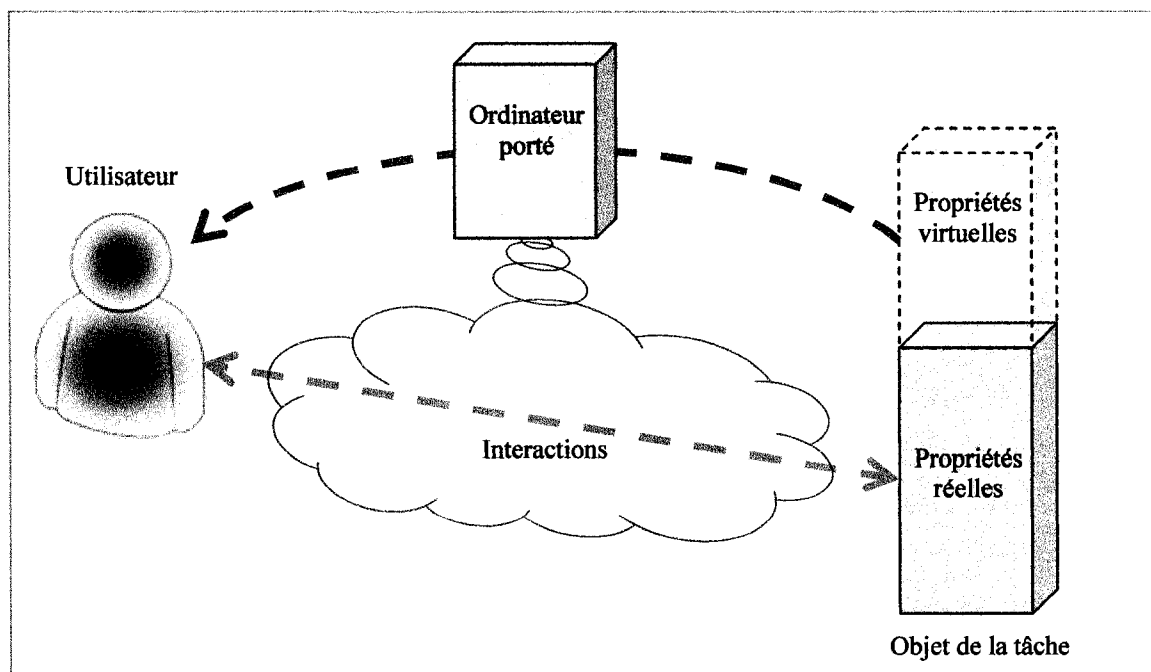


Figure 3.4 : Illustration des doubles fonctionnalités des artefacts de la tâche

Les associations entre les entités, les actions qui leur sont propres et les fonctionnalités de l'ordinateur porté doivent être choisies avec soin pour rendre leur accès intuitif, naturel et l'intégrer aux activités de l'utilisateur. De façon générale, les individus tirent souvent profit de leur perception directe de l'environnement et de la connaissance instinctive qu'ils ont du mode de fonctionnement du monde réel : en manipulant et explorant les entités de cet environnement, ils s'engagent intentionnellement et spontanément dans des activités qui rendent apparente l'information dont ils ont besoin. L'idée est donc de tirer profit de ce phénomène naturel qui utilise la capacité suggestive d'action (*affordance*) des entités réelles pour la conception de mécanismes d'interaction humain-ordinateur porté. Si la capacité suggestive d'action est forte, l'individu sait intuitivement (par le biais d'automatismes acquis, de sa culture, etc.) comment interagir. Cela présuppose bien entendu que l'utilisateur possède une motivation ou un but (réaliser une certaine activité) mais pas nécessairement un plan formel. L'utilisateur peut simplement réagir à son environnement et choisir les actions qui semblent l'amener vers son but : le comportement (l'action) émerge de l'interaction entre l'utilisateur et l'environnement, la cognition est dite située.

La choix des associations entités-actions-fonctionnalités peut aussi reposer en partie sur la théorie de la cognition distribuée (*distributed cognition*). Cette théorie proposée par Hutchins [27] cherche, pour une activité donnée, à la décrire en termes d'interactions entre des individus et des « artéfacts » (c.-à-d. des objets, des dispositifs technologiques et, de façon plus générale, toutes les entités de l'environnement intervenant dans

l'activité). Tout comme pour la cognition distribuée, nous voulons, pour une tâche donnée, analyser et comprendre les relations entre les diverses composantes d'un système fonctionnel qui est composé de plusieurs éléments ou groupes d'éléments fondamentaux : l'utilisateur, l'ordinateur porté, les objets de l'environnement utilisés pour interagir avec cet ordinateur et finalement le contexte dans lequel se produisent les interactions. Ces relations peuvent être vues comme étant des propriétés dynamiques et émergentes du système fonctionnel plutôt que des manifestations structurelles purement statiques. Pour les analyser il est donc nécessaire de suivre l'évolution temporelle de l'état du système qui est caractérisée par une propagation et une transformation de l'information à travers ce système. Cette propagation peut être décomposée sommairement à travers les étapes suivantes :

- 1) une activité liée au plan de réalisation de la tâche courante ou la capacité suggestive d'action d'un objet déclenche une intention d'action de la part de l'utilisateur;
- 2) l'utilisateur traduit cette intention en une série de manipulations sur un ou plusieurs objets;
- 3) l'ordinateur porté détecte ces manipulations;
- 4) l'ordinateur porté interprète et détermine la signification de ces manipulations à l'aide du contexte actuel;
- 5) l'objet permet à l'utilisateur d'accéder à la fonctionnalité associée ou présente à l'utilisateur l'information demandée.

Les caractéristiques des objets familiers ainsi que les relations existant entre eux devront ainsi être explorées car elles peuvent aider à leur associer les fonctionnalités virtuelles appropriées. Nos interactions intuitives avec les objets de tous les jours sont aussi importantes car elles constituent la base qui permettra d'étendre les fonctionnalités de ces objets familiers dans le domaine virtuel et ainsi permettre à l'ordinateur porté de mieux soutenir l'activité à réaliser.

3.3 Interface diffuse

La diffusion dans le monde réel de l'interface humain-ordinateur porté définit un nouveau paradigme d'interaction pour ces ordinateurs. Il en résulte une multitude d'interfaces locales associées à certaines entités d'intérêt (objets, parties d'objets ou personnes) qui servent de points d'entrée pour des interactions spécifiques avec l'ordinateur porté. Nous pourrions ainsi imaginer entrer dans une pièce dans laquelle chaque objet pourrait laisser transparaître sa propre interface dépendante du contexte et particularisée pour répondre aux besoins spécifiques de l'utilisateur. En fonction de l'ensemble de ses propriétés (primaires, secondaires, etc.) et du contexte, chaque entité à laquelle s'intéressera l'utilisateur pourrait générer une interface locale dynamique donnant accès à quelques unes des fonctionnalités de l'ordinateur porté (interagir avec l'ordinateur porté) ou, dans un monde d'informatique diffuse, à une fonctionnalité de l'objet lui-même à travers l'ordinateur porté (interagir avec le monde réel). Certains diront qu'il s'agit là en quelque sorte d'un paradigme d'interaction basé sur une

« métaphore du monde réel » puisque nous sommes amenés à interagir avec l'ordinateur porté de la même manière que nous manipulons le monde réel. Nous percevons plutôt cela comme une disparition de la métaphore d'interface qui n'a plus sa raison d'être. En effet, l'interface EST l'environnement dans lequel évolue l'utilisateur et nous n'avons donc nul besoin de développer un modèle basé sur l'environnement pour aider l'utilisateur à comprendre l'interface. Lors de la conception d'une interface diffuse, il sera toutefois nécessaire de mettre l'accent sur la simplicité de l'interaction et la qualité de l'interaction pour arriver à une interface intuitive. L'utilisateur devrait par exemple être en mesure de déterminer les fonctionnalités offertes par le système instantanément. Une telle interface est uniquement destinée à soutenir les activités de l'utilisateur dans le monde réel et il est clair que si, par exemple, de multiples données doivent être saisies ou que des interactions prolongées et continues avec l'ordinateur sont nécessaires, il sera plus acceptable de basculer vers une interface humain-ordinateur plus conventionnelle. Ce dernier cas ne sera pas traité dans le cadre de cette thèse.

Une interface humain-ordinateur porté diffuse possède donc deux caractéristiques clés :

- elle utilise une correspondance entre des entités physiques, des actions spécifiques et des fonctionnalités de l'ordinateur porté;
- elle permet de distribuer l'interaction à travers plusieurs entités de l'environnement (distribution principalement spatiale mais éventuellement aussi temporelle ou autre).

De plus, une telle interface repose sur les quatre aspects fondamentaux suivants :

- 1) des objets réels, nécessaires à l'accomplissement de la tâche;

- 2) des informations ou fonctionnalités virtuelles qui serviront à augmenter les objets réels;
- 3) une superposition des espaces réels et virtuels, c.-à-d. une absence de discontinuité entre le réel et le virtuel pour la perception et l'action;
- 4) un effacement de l'ordinateur pour laisser la place aux objets réels et à la tâche.

Les avantages d'une telle approche semblent triples. Elle permet en premier lieu de soutenir directement des tâches réelles. Deuxièmement, une telle interface n'est pas limitée par les contraintes imposées par les périphériques actuels puisque l'environnement offre un espace de travail presque sans fin. Finalement, elle permettra certainement à terme d'aller au-delà de la séquentialité traditionnelle des interfaces humain-ordinateur portés actuelles puisque, théoriquement, l'utilisateur peut tout faire en tout temps et cela contribue à soutenir les tâches hautement interruptibles propres à la seconde famille d'ordinateurs portés. Malgré tout, cette approche semble posséder aussi ses inconvénients et plusieurs questions restent entières. Tout repose particulièrement sur une association adéquate des entités, actions et fonctionnalités. Il n'est pas trivial d'établir une relation cohérente entre toutes ces composantes. L'identification correcte des entités en jeu et des actions de l'utilisateur deviendra aussi un problème majeur pour des interfaces diffuses complexes et devant soutenir de nombreuses activités. La gestion des erreurs qui se produiront comme dans tout système basé sur une interprétation des actions de l'utilisateur est aussi à mentionner. Finalement, l'évaluation d'un tel système est quelque peu problématique car les méthodes d'évaluation centrées sur la tâche ne sont pas appropriées, la tâche à réaliser n'étant pas toujours bien définie. Cette

évaluation devra donc rester centrée sur l'utilisateur et être faite dans le contexte d'utilisation, c.-à-d. dans le monde réel.

Les implications résultant de la diffusion de l'interface humain-ordinateur porté dans l'environnement pourraient être nombreuses. Par exemple, selon les comportements des utilisateurs, il sera peut être nécessaire de développer des nouveaux modèles mentaux relatifs à l'utilisation de ces objets « augmentés » et pour les tâches faisant appel à de tels objets. Ceci est paradoxal car même si la conception de l'interface diffuse a été réalisée pour l'intégrer aux activités à soutenir, cette interface pourrait entraîner à long terme une réingénierie complète de la tâche causée par l'émergence de façons imprévues d'utiliser les objets augmentés. Une autre implication pourrait être l'évolution des objets conventionnels pour mieux supporter les nouvelles fonctionnalités qui leurs sont associées. La capacité suggestive d'action est en effet une association bidirectionnelle : les objets sont conçus originellement pour convenir à certaines tâches mais leurs propriétés vont aussi influencer ce que les utilisateurs demandent de ces objets. Finalement, puisque notre environnement comporte déjà de nombreux objets différents que nous pouvons naturellement associer de manière ad hoc et dynamique, il est possible que les utilisateurs demandent plus de contrôle sur les associations de l'interface diffuse. Il pourrait donc s'avérer nécessaire d'opter, lors de la conception, pour une interface relativement ouverte permettant de laisser aux utilisateurs le soin de donner un sens à leurs propres associations, pour laisser place à l'imagination, la créativité et l'expérimentation.

En résumé, plus les tâches impliquent des objets réels, plus l'interface du support informatique aidant à la tâche doit s'immiscer dans le monde physique. Pour les ordinateurs portés cela signifie l'utilisation d'un paradigme de manipulation directe radicalement transformé pour permettre les interactions avec des entités tangibles et donner une signification physique aux fonctionnalités et processus logiciels offerts par l'ordinateur porté. Idéalement, pour être naturelles et intuitives, les interactions avec l'ordinateur porté devraient tirer profit de la capacité suggestive d'action de ces entités réelles. L'argument qui est défendu ici peut être résumé comme suit : la diffusion dans le monde réel de l'interface humain-ordinateur porté permet de tendre vers des interactions plus naturelles et plus intuitives, et donc plus transparentes. En proposant un nouveau paradigme d'interaction voulant améliorer la transparence des interactions humain-ordinateur porté, cette thèse vise à encourager une intégration mentale plus étroite entre l'utilisateur et sa machine qui permettra éventuellement d'aboutir à des ordinateurs symbiotiques, c.-à-d. des ordinateurs portés hautement transparents.

3.4 Un accès personnel au monde de l'informatique ubiquitaire

L'informatique ubiquitaire (*ubiquitous computing*) promet de mettre à profit les associations naturelles existant dans le monde réel tout en bénéficiant des avantages d'un support informatique constant. Le nouveau paradigme que nous mettons de l'avant s'inscrit parfaitement dans un tel cadre qui se manifeste par de nombreuses interactions unitaires formant un flot continu entre l'humain et les services informationnels.

Cependant, nous pensons que la réalisation de cette vision passe par l'utilisation d'un ordinateur porté qui peut en quelque sorte être considéré comme un point d'accès personnel et privé au monde de l'informatique ubiquitaire. Ainsi, un utilisateur sera capable d'interagir avec un monde réel augmenté par des fonctionnalités synthétiques provenant de l'ordinateur et des services fournis par l'environnement saturé d'informatique. Le but ultime du nouveau paradigme d'interaction que nous proposons est de tendre vers des interactions transparentes, d'intégrer parfaitement l'ordinateur porté à la vie courante (de la même façon que les montres ou même les téléphones sans fil ont été adoptés) pour que ce dernier puisse nous assister dans nos activités quotidiennes (*everyday computing*). Pour un ordinateur porté qui s'efface alors devant les activités à réaliser, il est beaucoup plus approprié de parler de « *killer existence* » que de « *killer application* » [46].

3.5 Objectifs de recherche

L'objectif principal ainsi que les objectifs spécifiques associés que nous cherchons à atteindre en accord avec la problématique définie sont présentés ci-dessous.

3.5.1 Objectif principal

L'objectif principal est de concevoir, développer et évaluer un nouveau paradigme d'interaction humain-ordinateur porté. Plus précisément, nous voulons concevoir, développer et évaluer (capacités et limites) un paradigme d'interaction basé sur une

diffusion de l'interface humain-ordinateur porté dans l'environnement ainsi que les mécanismes d'interaction qui lui sont associés. Les objets de l'environnement seront ainsi mis à contribution pour interagir avec l'ordinateur porté, soit explicitement (interaction directe avec l'ordinateur porté), soit implicitement (lors d'une manipulation se produisant naturellement durant une tâche à réaliser dans le monde réel). Comme nous l'avons mentionné à la section 3.3, cette diffusion de l'interface de l'ordinateur porté à travers des objets de l'environnement permettra, à terme, d'aboutir à des interactions humain-ordinateur porté transparentes. De par cette preuve de concept, cette thèse contribue à l'avancement des connaissances en proposant un nouveau type d'interface humain-ordinateur porté.

3.5.2 Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques ci-dessous cernent des buts précis liés à l'objectif principal. Pour chaque objectif spécifique, nous présentons, au besoin, les artéfacts qui lui sont liés, les mesures à recueillir, les outils de mesure à utiliser, etc.

Concevoir et développer une plate-forme matérielle portée

Un des objectifs spécifiques est de développer une plate-forme matérielle portée, modulaire, et respectant les ressources budgétaires allouées. Une telle plate-forme contribuera à l'atteinte de l'objectif principal. Le prototype développé devra pouvoir être porté par les utilisateurs sans gêner de façon significative leurs mouvements et devra permettre l'ajout et le retrait rapide de composantes additionnelles (capteurs par

exemple). De courtes expériences permettront de tester les bibliothèques logicielles de développement associées aux composantes matérielles retenues et les techniques de traitement de l'information associées.

Concevoir et développer des interfaces diffuses pour des tâches usuelles

Cet objectif cible le développement d'interfaces diffuses permettant à l'utilisateur d'interagir avec son ordinateur porté selon les principes énoncés plus haut. Pour ce faire, nous mettrons de l'avant une architecture logicielle générique permettant de supporter le développement de telles interfaces. Nous concevrons alors des interfaces diffuses pour différentes tâches usuelles afin d'explorer diverses techniques d'interaction. Puisque la conception d'une interface diffuse revient à définir les interactions se produisant sur le plan physique et cognitif dans le système humain - ordinateur porté - environnement, nous serons amenés pour chacune des tâches retenues à :

- 1) analyser les caractéristiques des activités de la tâche et les concepts s'y rattachant;
- 2) analyser les objets de l'environnement associés à la tâche conventionnelle et, au besoin, les objets de l'environnement véhiculant les mêmes concepts dans leurs propriétés intrinsèques;
- 3) analyser les interactions possibles entre l'utilisateur et les objets d'intérêt;
- 4) associer une fonctionnalité de l'ordinateur porté, permettant d'accomplir une activité précise, à l'objet ou la partie d'objet dont la manipulation usuelle ou

conceptuelle s'en rapproche, ou encore dont la capacité suggestive d'action est forte;

- 5) choisir des modalités d'interaction permettant, à partir d'une demande d'interaction de l'utilisateur, d'aboutir au résultat désiré; et ce tout en cherchant à minimiser la charge cognitive et perceptuelle de l'utilisateur durant la tâche;
- 6) développer l'interface diffuse permettant de réaliser la tâche à l'aide de l'ordinateur porté.

Évaluer et comparer des interfaces diffuses

En relation avec l'objectif principal, nous voulons évaluer les capacités et les limites du nouveau paradigme d'interaction proposé. Nous désirons donc d'une part évaluer les interfaces diffuses développées en comparant les tâches réalisées de façon conventionnelle et les tâches réalisées à l'aide d'une interface diffuse. Nous désirons d'autre part comparer les interfaces diffuses développées entre elles, afin d'être en mesure de mieux comprendre les différentes techniques utilisées pour la diffusion.

Pour réaliser l'évaluation des interfaces diffuses développées, il est nécessaire de recueillir des données permettant de juger de la qualité de l'interaction humain-ordinateur : la facilité d'apprentissage et d'utilisation par exemple, la vitesse d'exécution des tâches, le taux d'erreurs, le niveau d'attention requis durant leur utilisation (tel que perçu par l'utilisateur), etc. Une telle évaluation peut ainsi être réalisée par le biais d'une étude d'utilisabilité. Puisque l'utilisabilité est définie comme :

« le degré selon lequel un produit peut être utilisé par des utilisateurs pour accomplir des buts spécifiques avec efficacité, efficience et satisfaction dans un contexte d'utilisation spécifique » (norme ISO9241-11),

elle peut donc être mesurée à l'aide de ses composantes primaires, en testant et en quantifiant : l'utilité, l'efficacité, l'efficience et la satisfaction humaine. Ces paramètres, ainsi que la facilité d'apprentissage (c.-à-d. la capacité de l'utilisateur à comprendre correctement et assimiler rapidement le mode de fonctionnement de l'interface diffuse), seront évalués grâce à diverses mesures objectives (temps, erreurs, etc.) et subjectives (perception de l'utilisateur, charge physique et mentale, etc.). Même si les problèmes d'utilisabilité majeurs peuvent souvent être isolés avec un faible nombre d'utilisateurs (cinq à sept [35], selon la variabilité entre les utilisateurs [19]), un petit échantillon n'est cependant généralement pas suffisant pour obtenir des mesures représentatives (c.-à-d. statistiquement significatives). Afin de tirer des conclusions pouvant être généralisées, il est nécessaire de recruter quelques dizaines de participants pour tester les interfaces diffuses développées.

Établir des principes d'ingénierie et des lignes directrices pour guider la conception d'interfaces diffuses

À partir des mesures et des observations recueillies, il s'agit de dégager des principes d'ingénierie et des lignes directrices destinées à guider et à améliorer la conception d'interfaces humain ordinateur-porté diffuses. Cette synthèse des nouvelles

connaissances acquises pourra ainsi aider en partie les concepteurs d'interfaces diffuses à répondre à plusieurs questions fondamentales :

- Quelles entités liées à la tâche employer lors de la diffusion ?
- Quelles modalités ou techniques d'interaction privilégier ?
- Quelles associations entités-actions-fonctionnalités utiliser ?

À terme, ces connaissances permettront de diffuser adéquatement et efficacement l'interface d'un ordinateur porté dans l'environnement, en fonction des caractéristiques de la tâche à accomplir et des entités nécessaires à sa réalisation, afin que l'ordinateur porté puisse réaliser pleinement son rôle de soutien.

CHAPITRE 4 : MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Ce chapitre détaille la méthodologie employée pour atteindre les objectifs énoncés au chapitre précédent. Nous expliquons ainsi les raisons motivant notre étude comparative avant de présenter les tâches expérimentales étudiées, les sujets recrutés, le protocole suivi ainsi que les mesures et observations recueillies.

4.1 Étude comparative

4.1.1 Motivation

Nous cherchons à évaluer un nouveau paradigme d'interaction humain-ordinateur porté où l'accès à ses fonctionnalités, pour assister à la réalisation d'une tâche dans le monde réel, est basé sur la manipulation des entités associées à cette tâche. Pour ce faire, nous avons choisi d'effectuer une étude comparant des tâches réalisées d'une part de façon conventionnelle, et d'autre part à l'aide d'un ordinateur porté, via des interfaces diffuses. Les tâches réalisées de façon conventionnelle jouent ainsi le rôle d'un point de référence permettant d'interpréter les résultats obtenus pour la même tâche réalisée avec

l'ordinateur porté que nous avons conçu et développé (cf. chapitre 5). Cette étude permettra d'autant plus de comparer les interfaces diffuses utilisées entres-elles en fonction des résultats obtenus, des caractéristiques intrinsèques des tâches et des particularités des associations entités-actions-fonctionnalités implémentées pour ces interfaces.

Même si l'emploi d'une interface diffuse ne permettait présentement pas d'améliorer l'exécution d'une tâche donnée (en termes de temps d'exécution, de charge mentale perçue par l'utilisateur, d'attention requise ou autre) ou si une telle interface n'était pas optimale pour la soutenir, les mesures qualitatives, quantitatives et les observations recueillies constitueraient indiscutablement un tremplin pour des améliorations futures et pour pousser les recherches plus avant.

4.1.2 Choix des tâches

Le choix des tâches retenues pour cette étude exploratoire (gestion d'horaire, gestion bibliographique et gestion bancaire; cf. section 4.2) est stratégique. Elles ont été sélectionnées pour plusieurs raisons :

- 1) elles se prêtent bien à l'utilisation d'une interface diffuse car elles nécessitent à la fois la manipulation d'entités de l'environnement, une saisie peu importante de données et l'accès à de l'information, potentiellement directement sur le terrain;
- 2) comme nous le verrons, leurs caractéristiques intrinsèques (cf. Tableau 4.1) permettent de tester des interfaces humain-ordinateur porté faisant appel à divers mécanismes de diffusion et modes opératoires (cf. Tableau 6.51), et pour

lesquels différentes ressources physiques et mentales de l'utilisateur sont sollicitées;

- 3) ce sont des tâches simples, familières et facilement compréhensibles par tous les utilisateurs;
- 4) elles ne nécessitent pas de matériel spécialisé et sont aisément reproductibles dans un environnement contrôlé de laboratoire (particulièrement pour contrôler l'illumination ambiante).

Nous aurions bien entendu pu envisager, en sacrifiant l'un des points ci-haut, de nombreuses autres tâches se prêtant tout aussi bien à l'utilisation d'un ordinateur porté : aide à la navigation, gestion des contacts, aide à la maintenance, guidage lors de tâches d'inspection, etc.

4.1.3 Analyse des tâches

Pour l'analyse des tâches conventionnelles retenues, nous privilégions l'utilisation du NGOMSL (*Natural GOMS Language*) [32, 33] puisque ces tâches sont toutes fortement hiérarchiques, séquentielles et orientées vers des buts précis. Cette évolution de la méthode traditionnelle d'analyse de tâche GOMS (*Goals, Operators, Methods, and Selection rules*) [10] est flexible, facilement compréhensible et fait appel à un langage descriptif naturel structuré pour décrire la tâche. Dans ce langage de description, le modèle de la tâche s'appuie en partie sur le modèle humain de traitement de l'information (*Model Human Processor*) et sur la CCT (*Cognitive Complexity Theory*) pour décrire les processus cognitifs associés. Un modèle NGOMSL est composé d'une

série de descriptions des méthodes nécessaires à l'accomplissement des buts spécifiés. Chaque méthode comporte une série d'étapes composées d'opérateurs (c.-à-d. d'actions) que l'utilisateur doit réaliser et peut faire appel à des sous-buts (la structure est hiérarchique). Il est possible de distinguer trois types d'opérateurs : des opérateurs mentaux (opérations mémorielles ou décisionnelles), externes (c.-à-d. actions perceptuelles ou motrices) et primitifs (c.-à-d. liés aux périphériques ou aux entités matérielles manipulés). Les règles de sélection interviennent quant à elles au besoin, lorsqu'il y a plusieurs méthodes envisageables pour accomplir un but. Un modèle NGOMSL peut également être utilisé pour prédire le temps d'apprentissage et le temps d'exécution (pour des utilisateurs experts) de la tâche en fonction des procédures à apprendre ou à accomplir pour réaliser cette tâche. Cependant, il est à noter que les analyses de type GOMS ne tiennent généralement pas compte des erreurs pouvant se produire au cours de la tâche, ni des caractéristiques propres à chaque utilisateur (imprédictibilité partielle, déficiences potentielles, connaissances à priori, etc.).

4.1.4 Développement des interfaces diffuses

Chacune des tâches retenues définit tacitement les entités devant être manipulées ainsi que les activités que l'utilisateur réalisera pour accomplir la tâche. Chaque tâche détermine donc directement le milieu dans lequel l'interface de l'ordinateur porté peut être diffusée. Il est ainsi possible de concevoir à partir de la tâche conventionnelle un scénario d'utilisation faisant appel à l'ordinateur porté pour soutenir et/ou réaliser cette même tâche. Un tel scénario fournit un cadre de référence permettant de définir les

spécifications techniques de l'interface diffuse à développer. Cependant, il est important de noter qu'il existe plusieurs façons de diffuser les interactions avec l'ordinateur porté à travers les entités de la tâche. Autrement dit, il est souvent possible de développer une multitude d'interfaces diffuses permettant d'accomplir une tâche donnée selon les modalités et les entités de l'environnement exploitables. Des interfaces diffuses peuvent en effet différer en ce qui a trait aux modalités d'entrées ou de sorties utilisées pour chacun des mécanismes d'interaction employés, au nombre, à la nature ou aux propriétés intrinsèques des objets de l'environnement utilisés, à leurs liens, etc. Par exemple, la sélection d'une entité peut s'effectuer de nombreuses façons selon la tâche à réaliser : pointer du doigt, saisir un objet, ou tout simplement le regarder pendant un certain laps de temps. L'interaction qui s'ensuit peut aussi être réalisée à l'aide de nombreuses modalités (gestes, commandes vocales, etc.). Les associations entités-actions-fonctionnalités et le scénario d'utilisation en découlant ne constituent qu'UNE façon possible de diffuser l'interface de l'ordinateur porté et il serait possible de créer de nombreuses variantes pour chacune de ces associations, particulièrement si les contraintes environnementales imposées sont faibles.

Dans le cadre de notre preuve de concept, nous nous sommes donc limités à l'évaluation à grande échelle d'une interface diffuse pour chaque tâche (Figure 4.1). Il s'agit en fait de mettre l'emphase sur la vérification de la faisabilité du nouveau paradigme d'interaction envisagé et sur son évaluation; les trois tâches investiguées permettent d'explorer un éventail adéquat de mécanismes de diffusion et de tester plusieurs types

d'intégration au flot des activités nécessaire à l'accomplissement de la tâche (ex., utilisation d'actions explicites ou greffe sur des actions implicites).

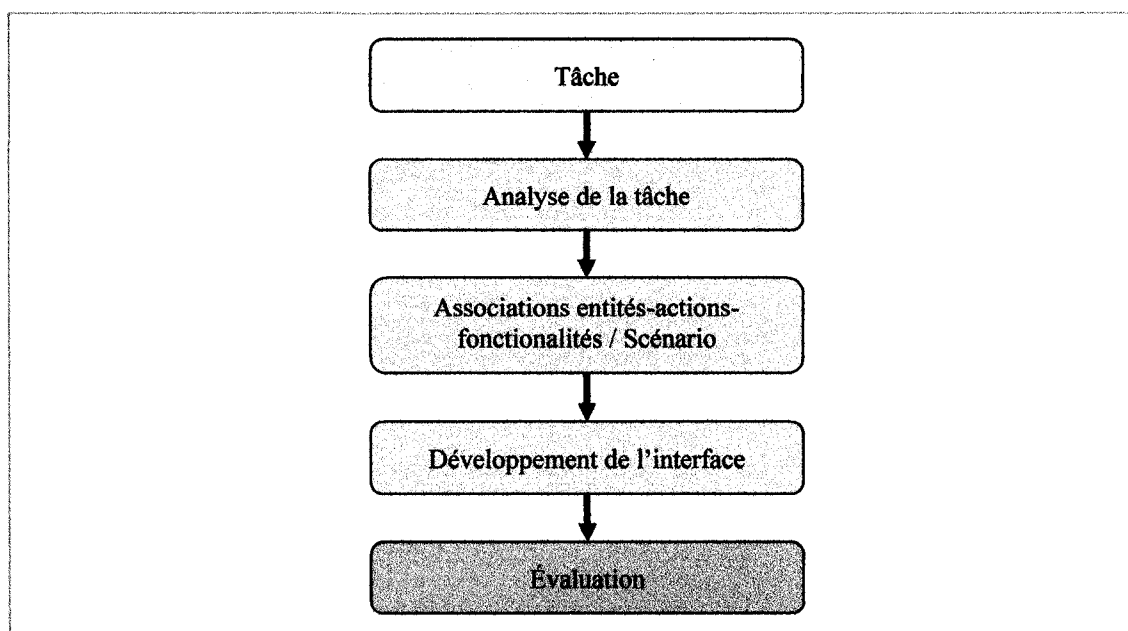


Figure 4.1 : Conception, développement et évaluation d'une interface diffuse

Chaque interface diffuse a été développée à partir de l'analyse de la tâche conventionnelle et des caractéristiques intrinsèques de cette dernière, et raffinée au cours du cycle de développement du scénario d'utilisation initial. Une telle approche permet de se concentrer sur les besoins de l'utilisateur plutôt que sur des aspects techniques ou les capacités des technologies disponibles. Pour chaque tâche, des procédés permettant de suggérer à l'utilisateur les entités actives de l'environnement (c.-à-d. reconnues par l'ordinateur porté) et des mécanismes pour interagir (explicitement ou implicitement) avec une entité d'intérêt ont ainsi été développés. Les choix de conception que nous avons faits sont détaillés dans le chapitre 5.

4.2 Tâches expérimentales

Nous détaillons ci-après les tâches retenues pour notre étude comparative. Pour chacune des tâches, nous présentons ainsi la tâche réalisée de façon conventionnelle, l'analyse de la tâche et les caractéristiques principales de la tâche qui expliquent sa sélection pour notre étude.

4.2.1 Tâche 1 : Gestion d'horaire

Description de la tâche conventionnelle

La tâche 1 consiste à obtenir, à partir d'un feuillet horaire résumant les détails d'un circuit d'autobus, les heures de prochain passage prévues à un arrêt en fonction de paramètres prédéterminés (jour, heure, emplacement spécifique et direction de déplacement souhaitée). La Figure 4.2 présente le feuillet horaire utilisé pour la tâche conventionnelle. Le billet décrivant la mise en situation et les buts à accomplir pour réaliser la tâche, tel que soumis aux participants de l'étude (cf. section 4.4), est présenté à la Figure 4.3.

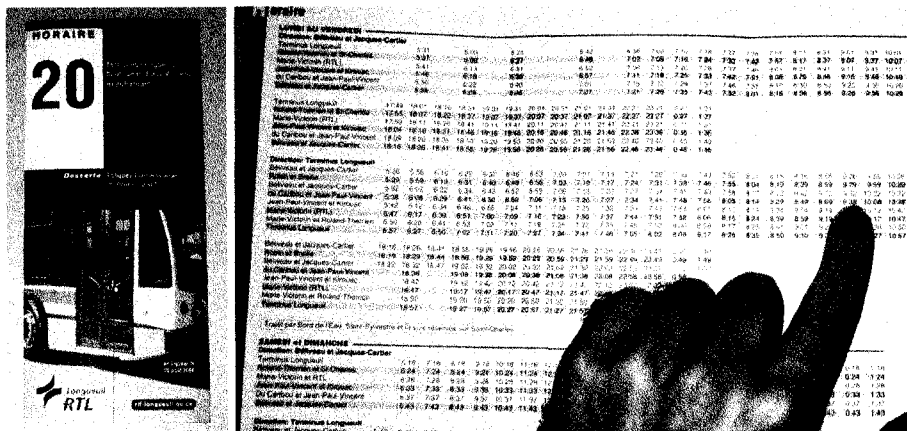


Figure 4.2 : Feuillet horaire utilisé pour la tâche conventionnelle

Tâche: Gestion d'horaire (C)

Nous sommes mardi, 21h00, à l'intersection des rues Jean-Paul Vincent et Kirouac.

En utilisant le feuillet horaire ci-joint, veuillez nous dire :

- à quelle heure passe le prochain autobus en direction du terminus Longueuil ?
- à quelle heure passe le prochain autobus en direction opposée ?

Figure 4.3 : Billet de la tâche 1 conventionnelle présenté aux participants

Analyse de la tâche

La Figure 4.4 présente la décomposition hiérarchique (AHT) de haut niveau de la tâche 1 réalisée de façon conventionnelle. Le modèle NGOMSL détaillant la tâche est présenté ensuite sur plusieurs pages (Figure 4.5).

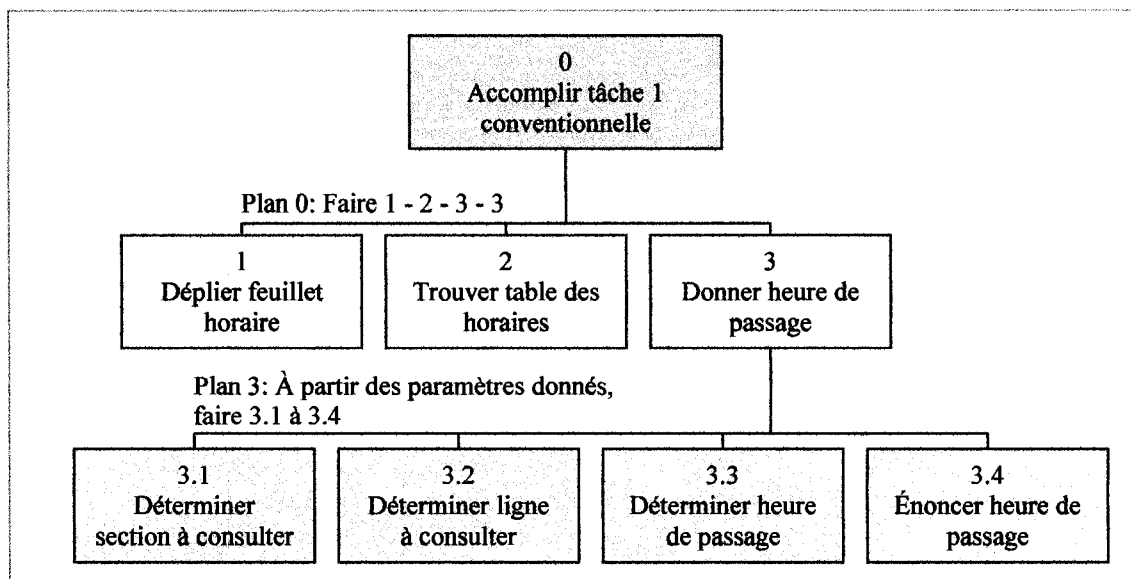


Figure 4.4 : AHT pour la tâche 1 conventionnelle

Méthode pour le but : Accomplir la tâche 1 de façon conventionnelle

- Étape 1. Déplier le feuillet horaire.
- Étape 2. Trouver la table des horaires dans le feuillet horaire.
- Étape 3. **Accomplir le but** : Donner la première heure de passage demandée.
- Étape 4. **Accomplir le but** : Donner la seconde heure de passage demandée.
- Étape 5. Retourner avec le but accompli.

Méthode pour le but : Donner une heure de passage

- Étape 1. **Accomplir le but** : Déterminer la section de la table des horaires à consulter.
- Étape 2. **Accomplir le but** : Déterminer la ligne de la section à consulter.
- Étape 3. **Accomplir le but** : Déterminer l'heure de passage sur la ligne à consulter.
- Étape 4. Énoncer à haute voix l'heure de passage trouvée.
- Étape 5. Retourner avec le but accompli.

Méthode pour le but : Déterminer la section de la table des horaires à consulter

- Étape 1. Récupérer dans la MCT la journée souhaitée.
- Étape 2. Lire les titres de section jusqu'à trouver la section correspondante.
- Étape 3. Retirer de la MCT la journée souhaitée
- Étape 4. Récupérer dans la MCT la direction souhaitée.
- Étape 5. Lire les sous-titres de la section retenue jusqu'à trouver la sous-section correspondante.
- Étape 6. Retirer de la MCT la direction souhaitée.
- Étape 7. Retourner avec le but accompli.

Méthode pour le but : Déterminer la ligne de la section à consulter

- Étape 1. Récupérer dans la MCT l'intersection souhaitée.
- Étape 2. Pointer du doigt le début de la section à consulter (avant la première intersection).

Figure 4.5 : Modèle NGOMSL pour la tâche 1 conventionnelle

- Étape 3. Descendre le doigt pour pointer l'intersection suivante.
- Étape 4. Décider : Si l'intersection pointée n'est pas l'intersection souhaitée alors Aller à l'étape 3.
- Étape 5. Retirer de la MCT l'intersection souhaitée.
- Étape 6. Retourner avec le but accompli.

Méthode pour le but : Déterminer l'heure de passage sur la ligne à consulter

- Étape 1. Récupérer dans la MCT l'heure actuelle.
- Étape 2. Pointer du doigt le début de la ligne à consulter (avant la première heure de passage).
- Étape 3. Déplacer le doigt vers la droite pour pointer l'heure de passage suivante.
- Étape 4. Décider : Si il n'y a pas d'heure de passage suivante (fin de la ligne) alors
Accomplir le but : Sauter à la suite de l'horaire.
- Étape 5. Décider : Si l'heure de passage pointée ne dépasse pas l'heure actuelle alors Aller à l'étape 3.
- Étape 6. Vérifier l'heure de passage trouvée en la comparant avec l'heure de passage précédente.
- Étape 7. Retirer de la MCT l'heure actuelle.
- Étape 8. Stocker dans la MCT l'heure de passage trouvée.
- Étape 9. Retourner avec le but accompli.

Méthode pour le but : Sauter à la suite de l'horaire

- Étape 1. Sauter au bloc suivant dans la section courante.
- Étape 2. **Accomplir le but : Déterminer la ligne de la section à consulter.**
- Étape 3. Pointer du doigt la première heure de passage sur la ligne.
- Étape 4. Retourner avec le but accompli.

Figure 4.5 : Modèle NGOMSL pour la tâche 1 conventionnelle (suite et fin)

Caractéristiques de la tâche

La tâche 1 est certainement la tâche qui est conceptuellement la plus simple des trois. Cependant, même s'il s'agit d'une tâche usuelle qui ne requiert pas de connaissances spécialisées, le modèle de la tâche n'est pas trivial. Nous pouvons constater à partir de l'analyse de la tâche que celle-ci ne nécessite la manipulation que d'un seul artéfact (le feuillet horaire) mais fait appel cependant à plusieurs sous-entités de ce même artéfact. Cette tâche fait également intervenir des comportements des plus intéressants de la part des utilisateurs. En effet, l'agencement structuré de la table des horaires (c.-à-d. lignes et colonnes) suggère et guide fortement les actions potentielles des utilisateurs. Ces

derniers sont ainsi instinctivement amenés à pointer, suivre et explorer du doigt des structures horizontales et verticales pour trouver l'information recherchée : pointage et descente de la liste des intersections, suivi du doigt pour trouver la prochaine heure de passage, etc. Il s'agit là de comportements naturels qui peuvent directement être mis à contribution lors de la création d'une interface diffuse pour un ordinateur porté.

Finalement, la tâche 1 implique uniquement de l'accès à de l'information et ne comporte aucun recueil de données ni de prise de décisions complexes. L'utilisateur doit en effet simplement trouver de l'information dans une base de données « physique » préexistante (le feuillet horaire) pour un besoin immédiat, sans devoir la préserver pour un usage futur (en la prenant en note par exemple).

4.2.2 Tâche 2 : Recherche bibliographique

Description de la tâche conventionnelle

La tâche 2 vise à simuler en partie une tâche de recherche d'information sur le terrain. Elle consiste à trouver, parmi un ensemble de livres préalablement placés dans un ordre prédéterminé, un livre comportant un chapitre traitant d'un sujet spécifique, puis à prendre en note une courte portion de ce chapitre (uniquement la première ligne pour ne pas alourdir la tâche). La Figure 4.6 présente les sept livres utilisés pour la tâche. Le billet décrivant la mise en situation et les buts à accomplir pour réaliser la tâche, tel que soumis aux participants de l'étude (cf. section 4.4), est présenté à la Figure 4.7.

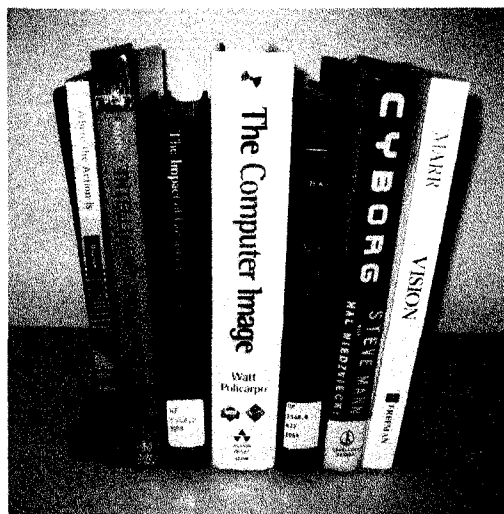


Figure 4.6 : Série de livres utilisés pour la tâche 2

Tâche: Gestion bibliographique (C)

Vous êtes à la bibliothèque et vous recherchez un livre traitant en partie de “L’impact des technologies de l’information sur le contrôle organisationnel”.

Veillez :

- trouver, sortir et nous montrer le livre comportant un chapitre sur ce sujet;
- prendre en note sur papier la première ligne de ce chapitre.

Figure 4.7 : Billet de la tâche 2 conventionnelle présenté aux participants

Analyse de la tâche

La Figure 4.8 présente la décomposition hiérarchique (AHT) de haut niveau de la tâche 2 réalisée de façon conventionnelle. Le modèle NGOMSL détaillant la tâche est présenté ensuite sur plusieurs pages (Figure 4.9).

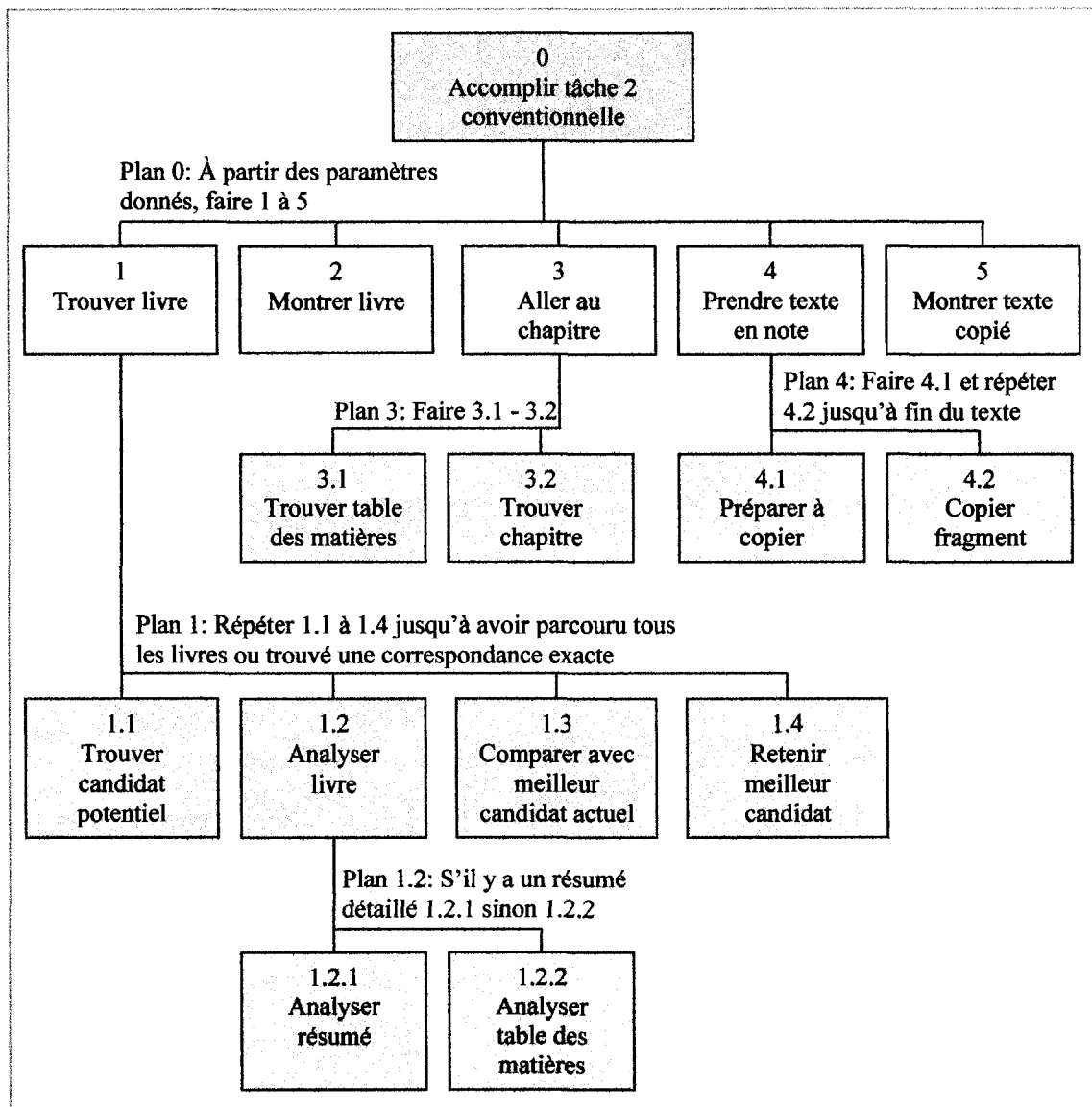


Figure 4.8 : AHT pour la tâche 2 conventionnelle

Méthode pour le but : Accomplir la tâche 2 de façon conventionnelle

- Étape 1. Récupérer dans la MCT le sujet recherché.
- Étape 2. **Accomplir le but** : Trouver le livre traitant du sujet recherché.
- Étape 3. Énoncer qu'il s'agit du livre recherché.
- Étape 4. **Accomplir le but** : Aller au chapitre correspondant au sujet recherché.
- Étape 5. Retirer de la MCT le sujet recherché.
- Étape 6. Récupérer dans la MCT les spécifications du texte à copier.
- Étape 7. **Accomplir le but** : Prendre le texte en note.

Figure 4.9 : Modèle NGOMSL pour la tâche 2 conventionnelle

Étape 8. Retirer de la MCT les spécifications du texte à copier.

Étape 9. Présenter le texte copié.

Étape 10. Retourner avec le but accompli.

Méthode pour le but : Trouver un livre

Étape 1. Se préparer à l'exploration ordonnée des livres (stocker dans la MCT qu'il n'y a aucun meilleur candidat trouvé).

Étape 2. **Accomplir le but** : Trouver un candidat potentiel.

Étape 3. Décider : Si aucun candidat potentiel n'a été trouvé alors Aller à l'étape 10.

Étape 4. Saisir le candidat potentiel.

Étape 5. Inspecter le candidat potentiel.

Étape 6. **Accomplir le but** : Analyser ce livre.

Étape 7. Récupérer dans la MCT le meilleur candidat trouvé.

Étape 8. Décider : Si le livre semble plus approprié que le meilleur candidat trouvé alors stocker dans la MCT qu'il s'agit là du nouveau meilleur candidat.

Étape 9. Décider : Si la correspondance du candidat avec le sujet recherché est quasi-exacte alors Aller à l'étape 10.

S'il reste encore des livres à explorer alors Aller à l'étape 2.

Étape 10. Considérer le meilleur candidat trouvé comme étant le livre recherché.

Étape 11. Retourner avec le but accompli.

Méthode pour le but : Trouver un candidat potentiel

Étape 1. Récupérer dans la MCT le sujet recherché.

Étape 2. Décider : S'il reste encore des livres à explorer alors Lire le titre du prochain livre non exploré.
Sinon Retourner avec le but accompli.

Étape 3. Décider : Si le titre n'est pas conceptuellement lié au sujet recherché alors Aller à l'étape 2.

Étape 4. Retourner avec le but accompli.

Règles de sélection pour le but : Analyser un livre

Si le livre semble comporter un résumé détaillé alors Accomplir le but : Analyser à l'aide du résumé.

Si le livre ne semble pas comporter de résumé détaillé alors Accomplir le but : Analyser à l'aide de la table des matières.

Retourner avec le but accompli.

Méthode pour le but : Analyser à l'aide du résumé

Étape 1. Récupérer dans la MCT le sujet recherché.

Étape 2. Lire le résumé à l'endos du livre.

Étape 3. Déterminer si le livre traite du sujet recherché à partir du résumé.

Étape 4. Décider : Si l'analyse du résumé n'est pas concluante alors **Accomplir le but** : Analyser à l'aide de la table des matières.

Étape 5. Retourner avec le but accompli

Méthode pour le but : Analyser à l'aide de la table des matières

Étape 1. Récupérer dans la MCT le sujet recherché.

Étape 2. **Accomplir le but** : Trouver la table des matières.

Étape 3. Lire la table des matières.

Figure 4.9 : Modèle NGOMSL pour la tâche 2 conventionnelle (suite)

Étape 4. Déterminer si le livre traite du sujet recherché à partir de la table des matières.

Étape 5. Retourner avec le but accompli.

Méthode pour le but : Trouver la table des matières

Étape 1. Ouvrir le livre à la première page.

Étape 2. Tourner les pages de façon incrémentale jusqu'à trouver la table des matières.

Étape 3. Retourner avec le but accompli.

Méthode pour le but : Aller à un chapitre (ou à un sous-chapitre)

Étape 1. Décider : Si le livre n'est pas déjà ouvert à la table des matières alors **Accomplir le but** : Trouver la table des matières.

Étape 2. Lire la table des matières jusqu'à trouver le titre du chapitre recherché.

Étape 3. Trouver le numéro de page correspondant.

Étape 4. Tourner les pages jusqu'au numéro de page en question.

Étape 5. Retourner avec le but accompli.

Méthode pour le but : Prendre un texte en note

Étape 1. Préparer la feuille de papier pour la copie.

Étape 2. Saisir et positionner le stylo.

Étape 3. Se positionner au début du texte à prendre en note.

Étape 4. **Accomplir le but** : Copier le fragment suivant (c.-à-d. un ou plusieurs mots)

Étape 5. Décider : S'il reste des fragments à copier alors Aller à l'étape 5.

Étape 6. Vérifier que le texte spécifié est bien copié.

Étape 7. Retourner avec le but accompli.

Méthode pour le but : Copier un fragment

Étape 1. Stocker dans la MCT le fragment à copier.

Étape 2. Retranscrire le fragment.

Étape 3. Retirer le fragment de la MCT.

Étape 4. Retourner avec le but accompli.

Figure 4.9 : Modèle NGOMSL pour la tâche 2 conventionnelle (suite et fin)

Caractéristiques de la tâche

Nous pouvons clairement distinguer deux parties à la tâche 2 : la recherche de l'entité d'intérêt et la prise en notes du passage prescrit. L'analyse de la tâche montre que la première partie nécessite la manipulation de plusieurs artefacts appartenant tous à la même famille (les différents livres) mais qui ne sont pas conjointement utilisés pour la réalisation de la tâche. La seconde partie fait quant à elle intervenir l'artefact primaire de la tâche (le livre recherché) ainsi que, de façon simultanée, les artefacts servant à la

retranscription du passage demandé. Notons aussi que les deux parties de la tâche nécessitent l'utilisation de sous-entités des artefacts manipulés (résumé ou table des matières d'un livre par exemple).

Comparativement à la tâche 1, la tâche 2 fait intervenir, pour la première partie, des comportements beaucoup moins prédictibles. Les techniques de tri et de sélection employées (et les comportements associés) ainsi que les critères de décision utilisés peuvent en effet varier grandement d'un sujet à l'autre. Seule la disposition des livres tente de diriger l'action mais il s'agit là d'un guide qui est structurellement faible. Malgré tout, certains comportements prévalents et/ou nécessaires (l'inspection et l'analyse d'un candidat potentiel par exemple) peuvent tout de même être utilisés lors de la conception de l'interface diffuse pour un ordinateur porté destiné à soutenir la tâche. Finalement, notons que la tâche 2 implique à la fois la prise de décisions pour l'acquisition d'informations et la saisie de données. Ces prises de décisions, qui peuvent sembler instinctives mais qui ne sont pas triviales, pourraient ainsi être supportées par l'ordinateur porté. Il en va de même pour la prise en notes qui peut être assimilée à un stockage d'information à moyen/long terme.

4.2.3 Tâche 3 : Gestion bancaire

Description de la tâche conventionnelle

La tâche 3 réalisée de façon conventionnelle consiste à effectuer, à l'aide d'une reproduction du site web d'une grande banque canadienne (Banque de Montréal), des

opérations bancaires usuelles : obtention de soldes et paiement d'une facture. Le billet décrivant la mise en situation et les buts à accomplir pour réaliser la tâche, tel que soumis aux participants de l'étude (cf. section 4.4), est présenté à la Figure 4.10. Une séquence de captures d'écran du site web reproduit illustrant les principales étapes de la tâche est présentée dans les pages qui suivent (cf. Figure 4.11).

Tâche: Gestion bancaire (C)

Voici votre carte bancaire (carte marquée « Airmiles » pour les besoins de cette simulation).
Au besoin, le mot de passe pour accéder à votre compte en ligne est : abcdef


Voici aussi votre carte de crédit Mastercard (carte marquée « Dividendes » pour les besoins de cette simulation).

Veillez accéder aux services bancaires en ligne et :

- énoncer votre solde bancaire (compte chèques);
- énoncer votre solde de carte de crédit;
- payer au complet votre facture de carte de crédit grâce à votre compte chèque;
- énoncer votre nouveau solde bancaire;
- énoncer votre nouveau solde de carte de crédit.


Figure 4.10 : Billet de la tâche 3 conventionnelle présenté aux participants

carte du site | contactez-nous | localisez-nous | english | ??

Ouverture de session Services bancaires en ligne 

Profitez d'un rabais exclusif de 20 % sur tous les vols AIR MILES

Carte MasterCard Mosaic BMO



Seulement avec l'option de récompense AIR MILESSM Or

Pour en savoir plus >

Finances personnelles

Des solutions financières adaptées à tous vos besoins en matière de services bancaires, de crédit, de placement, de retraite et d'assurance.

Lien direct...

Services bancaires aux entreprises

Produits et solutions financières pour vous aider dans la gestion de votre entreprise

Lien direct...

Services aux grandes entreprises et institutions

Mobilisation de fonds, investissements et services de consultation et de recherche pour les grandes entreprises, les sociétés d'État et les institutions

Lien direct...

Recherche **ALLER**

Nouveautés

- Remboursement des frais de découvert, en savoir plus...
- Nouvelles émissions en baladodiffusion proposent des trucs et conseils d'experts aux entrepreneurs canadiens
- BMO Groupe financier se joint au Conseil canadien des fournisseurs autochtones et de minorités visibles

Pour en savoir plus >

À propos...

- Information d'entreprise
- Relations avec les investisseurs
- Ouverture
- Carrières
- Résolution de Différends
- Responsabilités sociales

Ouverture de session

Services bancaires en ligne

Inscription | Démonstration


BMO Ligne d'action
BMO Nesbitt Burns
BMO Fonds d'investissement
BMO Banque privée Harris
BMO MasterCard Mosaic

Nouveau pour les étudiants : une seule carte, doublement avantageuse

Présentez une demande >


confidentialité | légal | sécurité

Vous protéger, c'est le protéger.



Souscrivez >


Ce qui monte ne redescend pas toujours.



Pour en savoir plus >



bmo.com | carte du site | contactez-nous | localisez-nous | english | 中文

Finances personnelles Ouverture de session Services bancaires en ligne 

Accueil | Programme de fidélité | Carte | Produits et services | Informations | Services bancaires en ligne

Services bancaires en ligne

Ouverture de session

Visite guidée en ligne


Foire aux questions et conseils

Inscription aux services bancaires en ligne

Conseils pour assurer votre sécurité

Exigences techniques

Ouverture de session – Services bancaires en ligne [Sign In](#)

Carte bancaire: 9300 6388641  [Besoin d'aide?](#)

Enregistrer ma carte bancaire

Fonction d'ouverture de session à sécurité accrue – Nouvelles

Comme nous l'avons déjà annoncé, nous renforçons la sécurité de nos services bancaires en ligne. À cette fin, nous devons modifier la procédure d'ouverture de session. À compter du 23 septembre 2007, vous devrez dorénavant entrer le numéro de votre carte Maxi-Service sur la première page et votre mot de passe sur la deuxième. Au cours des prochains mois, nous vous inviterons à vous inscrire à la fonction d'ouverture de session à sécurité accrue. Les clients qui se sont déjà inscrits à la fonction d'ouverture de session à sécurité accrue le 16 juillet 2007 demeurant n'auront pas à s'inscrire de nouveau.

Renseignements importants au sujet de la fraude

BMO Banque de Montréal ne vous demandera jamais de divulguer vos renseignements personnels, tels vos mots de passe, vos numéros de compte ou vos questions d'identification et leurs réponses par courrier électronique, par téléphone ou par télécopieur. Nous vous encourageons à prendre le temps d'apprendre comment protéger vos comptes contre les fraudes par courrier électronique et comment signaler la réception de courriels frauduleux.

Une nouvelle façon d'accumuler des milles de récompense AIR MILES

Il y a une nouvelle façon d'accumuler des milles de récompense AIR MILES chez BMO Banque de Montréal. Après avoir ouvert une session, cliquez sur « Communiquez avec nous » à partir du « Centre de communications » pour nous indiquer votre numéro d'adhérent. Nous lierons tous les produits admissibles de votre sommaire financier à votre compte AIR MILES.

BMO Ligne d'action | BMO Nesbitt Burns | BMO Banque privée Harris | Information d'entreprise | Relations avec les investisseurs | Carrières | Finances personnelles | Services bancaires aux entreprises | Légal | Sécurité | Confidentialité

Outils et renseignements

- L'ouverture de session à sécurité accrue
- Quand faut-il éviter de sauvegarder votre numéro de carte bancaire
- Inscription
- Visite guidée
- Nouvelles

Renseignements importants sur la sécurité

Figure 4.11 : Réalisation de la tâche 3 conventionnelle via le site web reproduit

communiquiez avec nous | aide | quitter

TEST UTILISABILITÉ Ouverture de session Services bancaires

Coup d'œil financier [Les services](#) [Aide](#) [Ouvrez votre compte](#) [Recherchez un produit](#) [Ouvrez un compte](#) [Recherchez un produit](#) [Ouvrez un compte](#) [Recherchez un produit](#)

Mon sommaire [Détails des transactions](#) [Téléchargement des transactions](#) [Personnaliser le sommaire](#) [BMO Relevé unique](#)

Mon sommaire Dernière session : 11 Apr. 2008 à 10:50 EDT

Compte	N° de compte	Date	Solde/Valeur du portefeuille
Comptes de banque Demande d'ouverture de compte			
Chèques	0001 1234-567	11 Apr. 2008	234.82 \$ CA
Épargne	0001 1234-568	11 Apr. 2008	13.82 \$ CA
Autre 1 US	0001 1234-569	11 Apr. 2008	5.88 \$ US
Total - comptes de banque			248.44 \$ CA 5.88 \$ US

Placements [Information sur les placements](#)
Votre profil ne comporte aucun placement. Pour ajouter un placement existant à votre sommaire, sélectionnez [Personnaliser le sommaire](#).

Prêt personnel [Demande de prêt personnel](#)
Votre profil ne comporte aucun prêt personnel. Pour ajouter un prêt personnel existant à votre sommaire, sélectionnez [Personnaliser le sommaire](#).

Prêt hypothécaire [Demande de prêt hypothécaire](#)
Votre profil ne comporte aucun prêt hypothécaire. Pour ajouter un prêt hypothécaire existant à votre sommaire, sélectionnez [Personnaliser le sommaire](#).

Cartes de crédit	N° de carte	Date	Montant
Cartes de crédit Demande de carte MasterCard Mosaik			
Carte MasterCard	5191987654321098	11 Apr. 2008	20.00 \$ CA
Total - cartes de crédit			20.00 \$ CA

Raccourcis

- ▶ Commande de chèques
- ▶ Chèques de voyage et devises
- ▶ Acheter un CPO
- ▶ Avance de fonds
- ▶ Consulter les factures en ligne

Outils et renseignements

- ▶ Taux d'intérêt
- ▶ Carte MasterCard[®] Mosaik[®]
- ▶ Calculateur REER
- ▶ Choisir mon programme bancaire
- ▶ Programme de récompense AIR MILES[®]



communiquiez avec nous | aide | quitter

TEST UTILISABILITÉ Ouverture de session Services bancaires

Coup d'œil financier [Les services](#) [Aide](#) [Ouvrez votre compte](#) [Recherchez un produit](#) [Ouvrez un compte](#) [Recherchez un produit](#) [Ouvrez un compte](#) [Recherchez un produit](#)

Régler une facture [Règlements de factures](#) [Factures](#) [Solde](#) [Recherchez un produit](#) [Ouvrez un compte](#) [Recherchez un produit](#) [Ouvrez un compte](#) [Recherchez un produit](#)

Régler une facture [postal - Consulter les factures](#) [Modifier les fournisseurs](#) [Recherche d'un règlement de facture](#) [Afficher/supprimer des règlements postdatés](#) [Historique des règlements](#)

Régler une facture **Raccourcis**

→ Étape 1 de 2: Veuillez entrer les renseignements demandés --vous pouvez régler jusqu'à 3 factures à la fois

Facture 1

Régler :

Débiter :

Montant : \$ Date du règlement : 11 novembre 2007

Facture 2

Régler :

Débiter :

Montant : \$ Date du règlement : 11 novembre 2007

Facture 3

Régler :

Débiter :


Montant : \$ Date du règlement : 11 novembre 2007

Outils et renseignements

- ▶ Ajouter un fournisseur
- ▶ Virement de fonds par courriel /iMevac
- ▶ Avance de fonds
- ▶ Consulter les factures en ligne
- ▶ Choisir mon programme bancaire
- ▶ Carte MasterCard[®] Mosaik[®]
- ▶ Programme de récompense AIR MILES[®]
- ▶ Protection de découvert


Figure 4.11 : Réalisation de la tâche 3 conventionnelle via le site web reproduit (suite)

communiquiez avec nous | aide | quitter

TEST UTILISABILITÉ Ouverture de session Services bancaires  **ALLER**

Règlements de factures


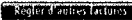

Régler une facture | postal - Consulter les factures | Modifier les fournisseurs | Recherche d'un règlement de facture | Afficher/supprimer des règlements postdatés | Historique des règlements

Régler une facture 

→ Étape 3 de 3 : Voici les résultats de vos demandes de règlement de factures de la session (demandes pour le jour même ou pour une date ultérieure)


Confirmation - Les règlements de factures suivants ont été effectués au cours de cette session. Pour plus de détails concernant les règlements de factures postdatés, veuillez consulter la rubrique **Renseignements importants**.

Régler	Montant	Débit	Date du règlement	N° référence
BMO MASTERCARD 5191987654321098	20,00 \$	Chèques 0001 1234-567	11 nov. 2007	016538

Total - règlements effectués 20,00 \$
Total - règlements postdatés établis 0,00 \$
Solde - Chèques 0001 1234-567 214,82 \$

Vous payez vos factures en ligne? Pourquoi ne pas les consulter de cette façon aussi?
Recevez vos factures en ligne grâce à l'option « Consulter les factures » de postal



- postal est le service gratuit de livraison de courrier en ligne de Postes Canada
- accédez à plus de 200 factures
- recevez, payez, imprimez et sauvegardez vos factures sur une période allant jusqu'à 7 ans
- vous recevez un avis en ligne chaque fois qu'une facture ou un relevé vous est livré

Raccourcis

- ▶ Ajouter un fournisseur
- ▶ Virement de fonds par courriel Interac
- ▶ Avance de fonds
- ▶ Consulter les factures en ligne

Outils et renseignements

- ▶ Choisir mon programme bancaire
- ▶ Carte MasterCard[®] Mosaik[®]
- ▶ Programme de récompense AIR MILES[®]
- ▶ Protection de découvert



communiquiez avec nous | aide | quitter

BMO  Banque de Montréal Ouverture de session Services bancaires  **ALLER**

Coup d'œil Financier

Mon sommaire | Détails des transactions | Téléchargement des transactions | Personnaliser le sommaire | BMO Relevé unique

Mon sommaire 

Compte

Compte	N° de compte	Date	Solde/valeur de portefeuille
Comptes de banque Demande d'ouverture de compte			
Chèques	0001 1234-567	11 Apr. 2008	214,82 \$ CA
Épargne	0001 1234-568	11 Apr. 2008	13,82 \$ CA
Autre 1 US	0001 1234-569	11 Apr. 2008	5,88 \$ US
Total - comptes de banque			228,44 \$ CA

Placements [Information sur les placements](#)
Votre profil ne comporte aucun placement. Pour ajouter un placement existant à votre sommaire, sélectionnez **Personnaliser le sommaire**.

Prêt personnel [Demande de prêt personnel](#)
Votre profil ne comporte aucun prêt personnel. Pour ajouter un prêt personnel existant à votre sommaire, sélectionnez **Personnaliser le sommaire**.

Prêt hypothécaires [Demande de prêt hypothécaire](#)
Votre profil ne comporte aucun prêt hypothécaire. Pour ajouter un prêt hypothécaire existant à votre sommaire, sélectionnez **Personnaliser le sommaire**.

Cartes de crédit [Demande de carte MasterCard Mosaik[®]](#)

Carte MasterCard	5191987654321098	11 Apr. 2008	0,00 \$ CA
Total - cartes de crédit			0,00 \$ CA

Dernière session :
11 Apr. 2008 à 10:50 EDT

Raccourcis

- ▶ Commande de chèques
- ▶ Chèques de voyage et devises
- ▶ Acheter un CPG
- ▶ Avance de fonds
- ▶ Consulter les factures en ligne

Outils et renseignements

- ▶ Taux d'intérêt
- ▶ Carte MasterCard[®] Mosaik[®]
- ▶ Calculateur REER
- ▶ Choisir mon programme bancaire
- ▶ Programme de récompense AIR MILES[®]

Figure 4.11 : Réalisation de la tâche 3 conventionnelle via le site web reproduit (suite et fin)

Le site web clone a directement été développé à partir du code HTML et des éléments graphiques du site d'origine. Sans aucunement toucher à l'aspect présentation du site (arborescence des menus, options disponibles, disposition de l'interface, etc.), nous avons modifié de façon extensive le code HTML pour venir y greffer des modules en langage PHP permettant de recréer la logique interne du site, c.-à-d. les fonctionnalités (bien entendu fictives) nécessaires à la réalisation de la tâche. Nous avons également développé en PHP et intégré au site reproduit un système automatique de collecte de traces. Ce système, transparent pour l'utilisateur, permet, via une base de données relationnelle (MySQL), de sauvegarder les détails des interactions de l'utilisateur avec le site et éventuellement de les analyser ultérieurement (cf. Figure 4.12 et Figure 4.13). Mentionnons aussi que, pour les besoins de l'étude, le site a été déployé sur un serveur web à accès restreint.

IP	User Agent	Time	Visited URL	Visit Length
132.207.191.142	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 18:57:05	letude.usability/bmo/steps.php?line=610	35 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 18:45:39	letude.usability/bmo/steps4.php?line=610	26 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 18:45:25	letude.usability/bmo/steps7.php?paypal=MASTERCARD&accountfrom=0&amount1=20	14 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 18:45:20	letude.usability/bmo/steps6.php?paypal=MASTERCARD&accountfrom=0&amount1=20	05 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 18:44:27	letude.usability/bmo/steps5.php?line=266	53 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 18:44:18	letude.usability/bmo/steps4.php	08 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 18:44:16	letude.usability/bmo/steps3.php	02 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 18:43:15	letude.usability/bmo/steps2.php?line=667	01 m 01 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 18:43:08	letude.usability/bmo/steps.php	07 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 18:42:57	letude.usability/bmo/steps2.php?line=112	11 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 18:42:38	letude.usability/bmo/steps1.php	19 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 18:42:36	letude.usability/bmo/steps.php?line=342	02 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 18:42:13	letude.usability/bmo/steps1.php	23 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 18:42:11	letude.usability/bmo/steps.php?line=170	02 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 18:42:04	letude.usability/bmo/steps1.php	07 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 18:41:49	letude.usability/bmo/steps1.php?line=275&shop	13 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 18:41:37	letude.usability/bmo/steps1.php	12 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 18:28:07	letude.usability/bmo/	13 m 30 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 17:59:02	letude.usability/bmo/	29 m 05 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 17:45:46	letude.usability/bmo/steps4.php?line=610	13 m 16 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 17:45:36	letude.usability/bmo/steps7.php?paypal=MASTERCARD&accountfrom=0&amount1=20	10 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 17:45:27	letude.usability/bmo/steps6.php?paypal=MASTERCARD&accountfrom=0&amount1=20	08 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 17:45:00	letude.usability/bmo/steps5.php?line=266	27 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 17:44:45	letude.usability/bmo/steps4.php	15 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 17:44:35	letude.usability/bmo/steps3.php	02 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 17:44:33	letude.usability/bmo/steps2.php	08 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 17:44:31	letude.usability/bmo/steps1.php	02 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 17:43:24	letude.usability/bmo/steps4.php	01 m 09 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 17:42:58	letude.usability/bmo/steps2.php?line=112	10 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 17:42:50	letude.usability/bmo/steps1.php	16 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 16:41:17	letude.usability/bmo/	08 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 16:41:05	letude.usability/bmo/	01 m 01 m 33 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 14:53:43	letude.usability/bmo/steps.php?paypal=MASTERCARD&accountfrom=0&amount1=20	12 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 14:53:40	letude.usability/bmo/steps6.php?paypal=MASTERCARD&accountfrom=0&amount1=20	01 m 47 m 22 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 14:52:28	letude.usability/bmo/steps5.php?line=266	03 s
	Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; fr; rv:1.8.1.10) Gecko/20071115 Firefox/2.0.0.10	28 Nov, 14:52:28	letude.usability/bmo/steps4.php	12 s

Figure 4.12 : Exemple de traces recueillies automatiquement

30 Nov, 12:45:19	/etude/usabilitybmo/step6.php?payto1=MASTERCARD&accountfrom1=0&amount1=149.7	06 s
30 Nov, 12:45:09	/etude/usabilitybmo/step5.php?line=266	10 s
30 Nov, 12:44:55	/etude/usabilitybmo/step4.php	14 s

Figure 4.13 : Exemple de traces recueillies automatiquement (détails)

Analyse de la tâche

La Figure 4.14 présente la décomposition hiérarchique (AHT) de haut niveau de la tâche 3 réalisée de façon conventionnelle. Le modèle NGOMSL détaillant la tâche est présenté ensuite sur plusieurs pages (Figure 4.15).

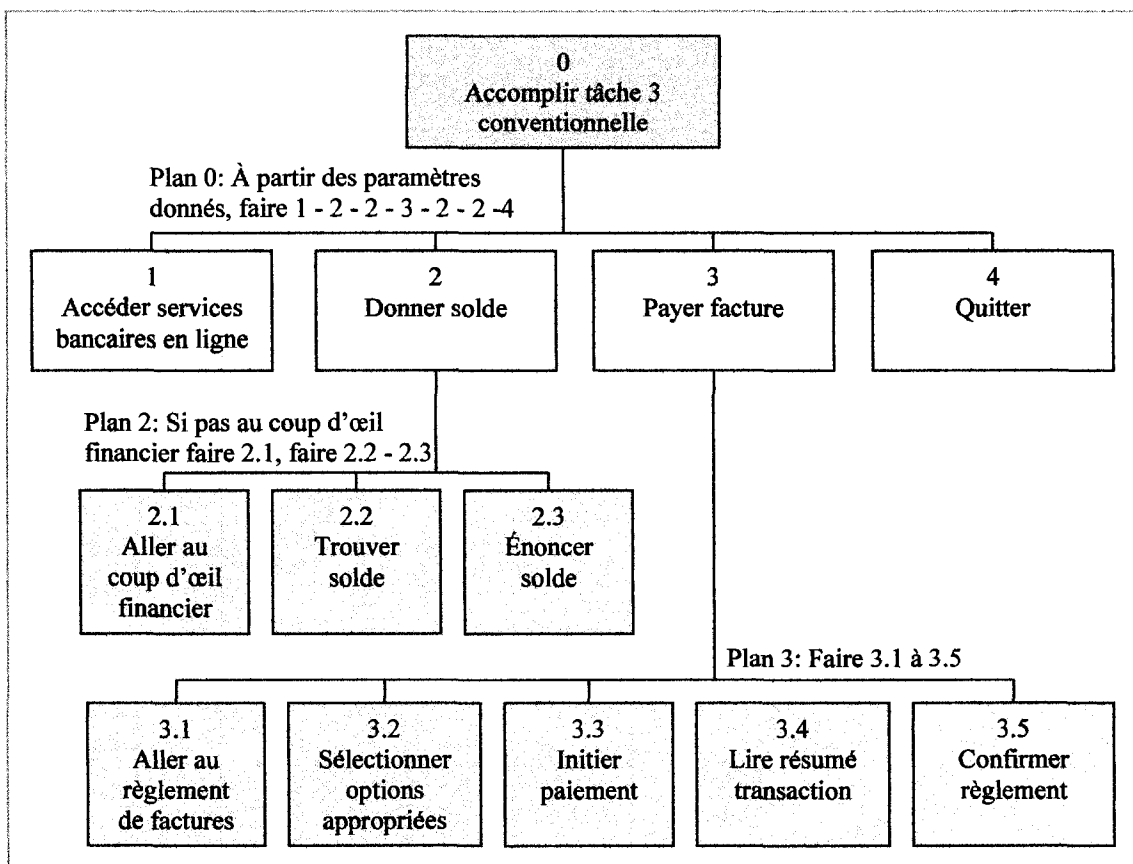


Figure 4.14 : AHT pour la tâche 3 conventionnelle

Méthode pour le but : Accomplir la tâche 3 de façon conventionnelle

- Étape 1. **Accomplir le but** : Accéder aux services bancaires en ligne.
- Étape 2. **Accomplir le but** : Donner le solde du compte chèque.
- Étape 3. **Accomplir le but** : Donner le solde du compte de carte de crédit.
- Étape 4. Stocker dans la MCT le solde du compte de crédit.
- Étape 5. **Accomplir le but** : Payer la facture de carte de crédit à l'aide du compte chèque.
- Étape 6. Retirer de la MCT le solde du compte de crédit.
- Étape 7. **Accomplir le but** : Donner le solde du compte chèque.
- Étape 8. **Accomplir le but** : Donner le solde du compte de carte de crédit.
- Étape 9. Cliquer sur le bouton « Quitter ».
- Étape 10. Retourner avec le but accompli.

Méthode pour le but : Accéder aux services bancaires en ligne

- Étape 1. **Accomplir le but** : Sélectionner l'option « Services bancaires en ligne » dans le menu déroulant intitulé « Ouverture de session ».
- Étape 2. **Accomplir le but** : Cliquer sur le bouton « Aller ».
- Étape 3. Récupérer dans la MCT le numéro de la carte bancaire.
- Étape 4. Décider : Si le numéro de la carte n'est pas déjà mémorisé dans le champ intitulé « Carte bancaire » alors **Accomplir le but** : Entrer le numéro figurant sur la carte bancaire dans le champ intitulé « Carte bancaire ».
- Étape 5. Retirer de la MCT le numéro de la carte bancaire.
- Étape 6. **Accomplir le but** : Cliquer sur le bouton « Aller ».
- Étape 7. Récupérer dans la MCT le mot de passe.
- Étape 8. Décider : Si le mot de passe n'est pas déjà mémorisé dans le champ intitulé « Password » alors **Accomplir le but** : Entrer le mot de passe dans le champ intitulé « Password ».
- Étape 9. Retirer de la MCT le mot de passe.
- Étape 10. **Accomplir le but** : Cliquer sur le bouton « Aller ».
- Étape 11. Retourner avec le but accompli.

Méthode pour le but : Donner un solde

- Étape 1. Décider : Si la page actuelle n'est pas le sommaire alors **Accomplir le but** : Cliquer sur le lien « Coup d'œil financier » du menu principal.
- Étape 2. Récupérer dans la MCT le nom du solde à rechercher.
- Étape 3. Trouver le solde demandé sur la page.
- Étape 4. Énoncer à haute voix le solde.
- Étape 5. Retirer de la MCT le nom du solde à rechercher.
- Étape 6. Retourner avec le but accompli.

Méthode pour le but : Payer une facture

- Étape 1. **Accomplir le but** : Cliquer sur le lien « Règlement de factures » du menu principal.
- Étape 2. **Accomplir le but** : Sélectionner l'option « BMO MASTERCARD » dans le menu déroulant intitulé « Régler ».
- Étape 3. **Accomplir le but** : Sélectionner l'option « Chèques » dans le menu déroulant intitulé « Débiter ».
- Étape 4. Récupérer dans la MCT le solde du compte de crédit.
- Étape 5. **Accomplir le but** : Entrer le solde du compte de crédit dans le champ intitulé « Montant ».

Figure 4.15 : Modèle NGOMSL pour la tâche 3 conventionnelle

- Étape 6. **Accomplir le but** : Cliquer sur le bouton « Continuer ».
- Étape 7. Lire le résumé du règlement.
- Étape 8. Vérifier que les paramètres du règlement sont exacts.
- Étape 9. Retirer de la MCT le solde du compte de crédit.
- Étape 10. **Accomplir le but** : Cliquer sur le bouton « Confirmer le règlement ».
- Étape 11. Retourner avec le but accompli.

Méthode pour le but : Sélectionner une option dans un menu déroulant

- Étape 1. Récupérer dans la MCT l'étiquette du menu déroulant.
- Étape 2. Trouver sur la page le menu déroulant associé à l'étiquette.
- Étape 3. Retirer de la MCT l'étiquette du menu déroulant.
- Étape 4. Récupérer dans la MCT le nom de l'option à sélectionner.
- Étape 5. Décider : Si l'option à sélectionner est déjà sélectionnée alors aller à l'étape 9.
- Étape 6. **Accomplir le but** : Cliquer sur le menu déroulant.
- Étape 7. **Accomplir le but** : Cliquer sur le nom de l'option à sélectionner.
- Étape 8. Vérifier que l'option désirée est bien sélectionnée.
- Étape 9. Retirer de la MCT le nom de l'option à sélectionner.
- Étape 10. Retourner avec le but accompli.

Méthode pour le but : Cliquer sur une entité

- Étape 1. Récupérer dans la MCT les spécifications de l'entité (c.-à-d. nom ou emplacement).
- Étape 2. Trouver l'entité sur la page.
- Étape 3. Déplacer le pointeur de la souris au dessus l'entité.
- Étape 4. Presser le bouton gauche de la souris.
- Étape 5. Vérifier que le clic a bien eu lieu.
- Étape 6. Retirer de la MCT les spécifications de l'entité.
- Étape 7. Retourner avec le but accompli.

Méthode pour le but : Entrer une donnée dans un champ

- Étape 1. Récupérer dans la MCT l'étiquette du champ.
- Étape 2. Trouver sur la page le champ associé à l'étiquette.
- Étape 3. Retirer de la MCT l'étiquette du champ.
- Étape 4. **Accomplir le but** : Cliquer sur le champ associé à l'étiquette.
- Étape 5. Récupérer dans la MCT les données à entrer.
- Étape 6. Taper les données au clavier.
- Étape 7. Vérifier que les données ont bien été entrées dans le champ.
- Étape 8. Retirer de la MCT les données à entrer.
- Étape 9. Retourner avec le but accompli.

Figure 4.15 : Modèle NGOMSL pour la tâche 3 conventionnelle (suite et fin)

Caractéristiques de la tâche

Un des intérêts de la tâche 3 est qu'elle fait intervenir un ordinateur de bureau, des périphériques traditionnels (clavier et souris) et des techniques d'interaction humain-ordinateur conventionnelles (pointer-cliquer). Cette particularité permettra, pour une

tâche simple, de comparer indirectement une interface graphique traditionnelle (interface web) et une interface diffuse.

Nous pouvons également constater à partir de l'analyse de la tâche que cette dernière est pauvre en entités de l'environnement autres que l'ordinateur de bureau et ses périphériques. Elle nécessite cependant la possession et la brève manipulation de plusieurs artefacts (les deux cartes) qui sont fondamentalement liés à la tâche à réaliser. Ces deux artefacts, et les comportements qui leurs sont associés, pourront ainsi être exploités conjointement pour supporter l'accès aux soldes demandés et l'exécution de la transaction prescrite.

Finalement, la tâche 3 implique, à travers l'artéfact informatique de la tâche, l'acquisition d'informations (les soldes) ainsi qu'une manipulation de ces informations (la transaction) pouvant être assimilée à une forme légère de saisie de données. La tâche ne requiert cependant pas à première vue de prise de décisions complexes.

4.2.4 Résumé synthétique

Le Tableau 4.1 présente un résumé synthétique des caractéristiques des tâches conventionnelles retenues. Ainsi que nous pouvons le constater, ces trois tâches sont clairement complémentaires les unes des autres. Elles diffèrent en effet quant aux types d'activités nécessaires à la réalisation de la tâche, ce qui permet d'investiguer 3 des 4 types d'activités pouvant être soutenus par un ordinateur porté (cf. section 1.2.3). Elles diffèrent de plus en ce qui à trait au nombre, au type et aux propriétés des artefacts de la tâche, ce qui permet d'investiguer diverses techniques de diffusion (cf. section 5.3).

Tableau 4.1 : Caractéristiques des tâches conventionnelles

Catégorie	Caractéristique	Tâche 1 (gestion d'horaire)	Tâche 2 (recherche biblio.)	Tâche 3 (gestion bancaire)
Activités principales nécessaires à la réalisation de la tâche	Acquisition d'information	✓		✓
	Saisie de données		✓	✓
	Prises de décision		✓	
Artéfacts de la tâche	Artéfact unique	✓		
	Artéfacts multiples		✓	✓
	Artéfact informatique			✓
	Guide structurant la tâche	Fort	Faible	Faible

4.3 Sujets

Il est important de souligner pour commencer que les expériences ont dûment été approuvées par le *Comité d'éthique de la recherche avec des sujets humains* de l'École Polytechnique de Montréal (cf. certificat de conformité à l'annexe A).

Par l'intermédiaire d'annonces dans les journaux étudiants du campus de l'Université de Montréal ainsi que des listes de diffusion par courriel de l'École Polytechnique de Montréal, nous avons recruté 37 volontaires, majoritairement des étudiants en génie de 1^{er} cycle (c.-à-d. baccalauréat). Sur les 37 sujets recrutés, seulement 34 se sont présentés pour participer aux expériences. Ces 34 sujets ont été rémunérés (20.00\$) pour leur participation à une séance d'expériences. Il est important de mentionner qu'aucun des sujets ne présentait de handicap majeur. Les tableaux et figures qui suivent résument le

profil des sujets recrutés, profil obtenu à partir des questionnaires remplis par les participants (voir annexe B et section 4.5).

Tableau 4.2 : Sexe des sujets

	Total (N)	Hommes	Femmes
Nombre	34	24	10

Tableau 4.3 : Age des sujets

	N	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
Age	34	19	34	22.38	3.035

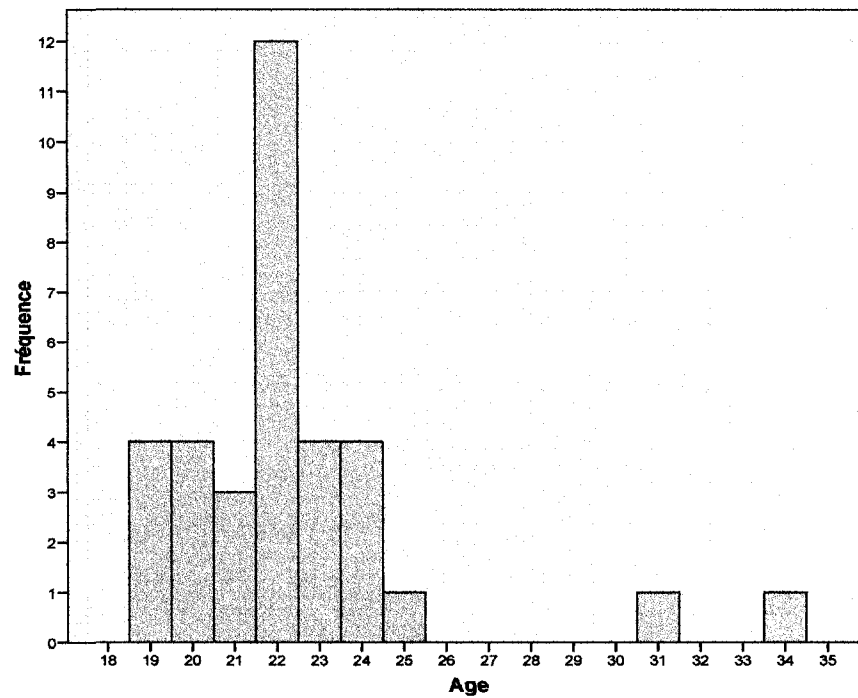


Figure 4.16 : Distribution de l'âge des sujets

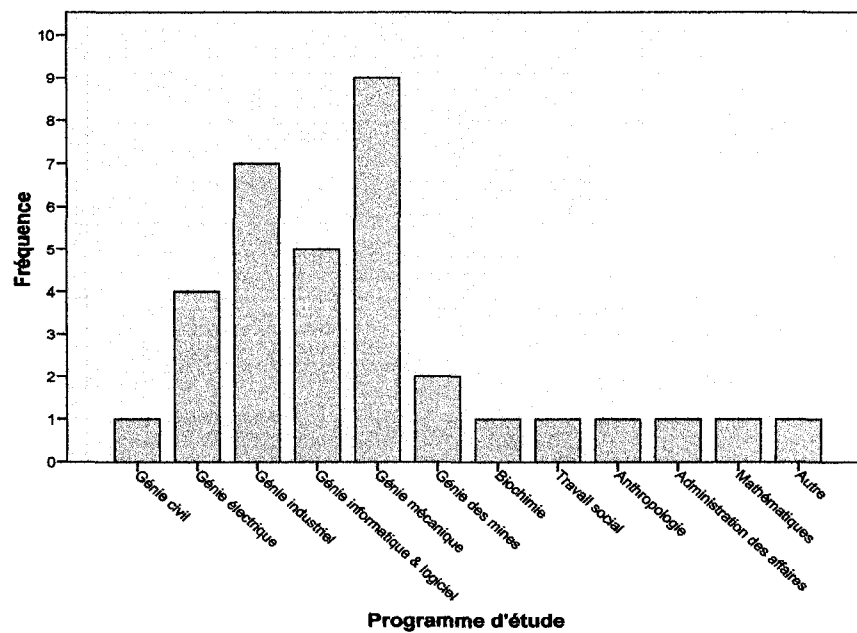


Figure 4.17 : Programme d'étude des sujets

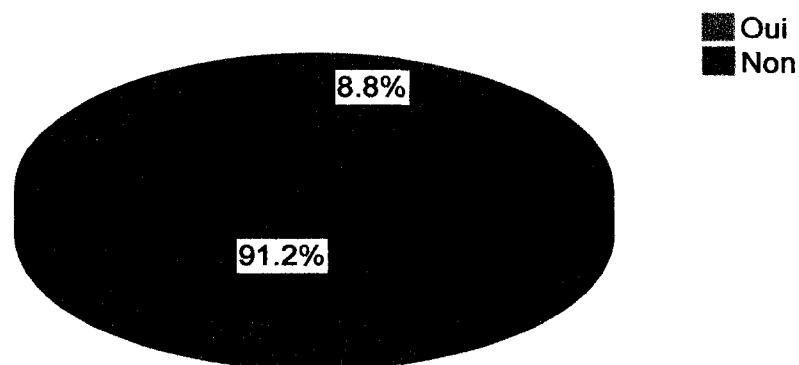


Figure 4.18 : Sujets ayant déjà suivi un cours sur les interfaces humain-ordinateur

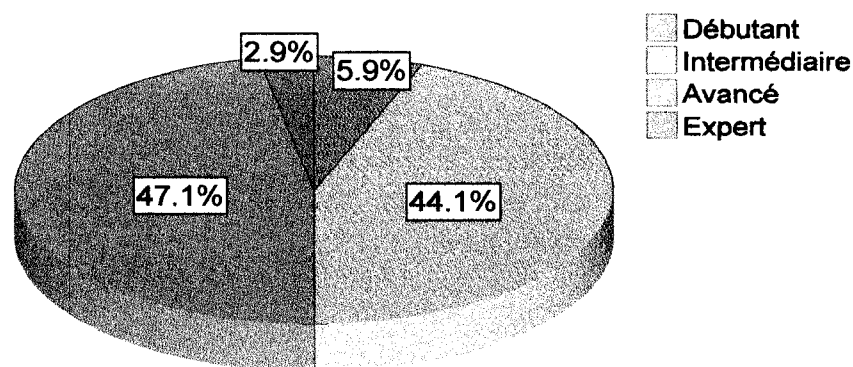


Figure 4.19 : Niveau de familiarité des sujets avec l'informatique

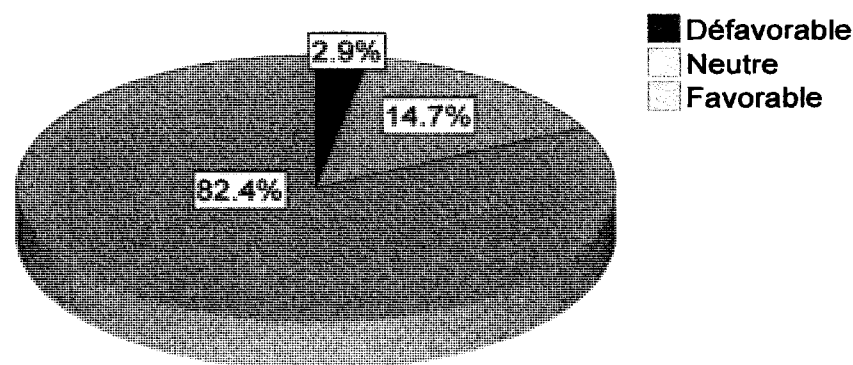


Figure 4.20 : Attitude des sujets face aux nouvelles technologies

Il ressort que la très large majorité des sujets se considèrent familiers avec les technologies informatiques (ordinateurs de bureau, ordinateurs portables, etc.) et ont une attitude favorable face aux nouvelles technologies. Mentionnons qu'aucun des sujets n'avait d'expérience avec un ordinateur porté ou de connaissances poussées dans le domaine des interactions humain-ordinateur, ce qui aurait pu influencer le déroulement

des expériences ou biaiser les résultats (par exemple à cause de leurs attentes ou leurs préconceptions vis-à-vis le fonctionnement d'une interface humain-ordinateur).

4.4 Protocole expérimental

Chaque sujet a été invité à participer à une séance d'une heure dans un laboratoire d'utilisabilité spécialement aménagé pour l'occasion. Les 30 premiers participants ont évalué notre nouveau type d'interface humain-ordinateur porté, reposant sur la manipulation d'objets de la tâche pour interagir avec l'ordinateur porté et assister à la réalisation de tâches. Le déroulement de chaque séance, identique pour tous ces participants, peut être résumé en quelques étapes :

- Étape 1. Arrivée et mise en confiance du sujet.
- Étape 2. Explication sommaire au participant du sujet de nos recherches : ordinateurs portés, interfaces diffuses et concepts de base sous-jacents (associations entités-actions-fonctionnalités par exemple).
- Étape 3. Explication au participant de la nature confidentielle et anonyme des données recueillies, ainsi que des avantages, inconvénients et des risques potentiels de sa participation. Signature du formulaire de consentement.
- Étape 4. Recueil pré-expérimental d'informations générales permettant d'établir le profil du participant : première partie du questionnaire (annexe B).
- Étape 5. Réalisations des six expériences (trois tâches fois deux façons de les réaliser). Pour chaque expérience, le participant lit en premier lieu la

description de la tâche qui lui est fournie sur papier. Dans le cas d'une tâche réalisée à l'aide de l'ordinateur porté, le fonctionnement de l'interface diffuse lui est expliqué en premier (une courte période d'environ cinq minutes est allouée pour l'ajustement du dispositif d'affichage ainsi que la familiarisation du participant avec l'ordinateur porté). Après avoir demandé et obtenu, au besoin, tous les éclaircissements nécessaires au sujet de la tâche à accomplir auprès des responsables de l'expérience, le participant réalise la tâche prescrite en verbalisant ses pensées et ses actions.

Étape 6. Débriefing post-expérimental par l'intermédiaire des sections restantes du questionnaire (annexe B) en insistant auprès du participant pour l'encourager à donner sa première et juste opinion pour chaque question.

Afin d'équilibrer les effets de fatigue et d'apprentissage, les 6 expériences (étape 5 ci-haut) ont été réalisées dans un ordre aléatoire. Ainsi, pour chaque participant, l'ordre des trois tâches à réaliser était déterminé au hasard et, pour chaque tâche, l'ordre dans les façons de la réaliser (c.-à-d. de manière conventionnelle ou à l'aide de l'ordinateur porté) était également aléatoire. Le Tableau 4.4 présente l'ordre des expériences en fonction des numéros attribués aux sujets; TxC représentant la tâche x réalisée de façon conventionnelle et TxP représentant la tâche x réalisée à l'aide de l'ordinateur porté. Les comptes résumant les ordres des expériences et des tâches sont respectivement présentés au Tableau 4.5 et au Tableau 4.6.

Tableau 4.4 : Ordre des expériences

Numéro du sujet	Ordre					
	1 ^{er}	2 ^{ème}	3 ^{ème}	4 ^{ème}	5 ^{ème}	6 ^{ème}
1	T3C	T3P	T1P	T1C	T2C	T2P
2	T1P	T1C	T2P	T2C	T3C	T3P
3	T3C	T3P	T1P	T1C	T2P	T2C
4	T3C	T3P	T2C	T2P	T1C	T1P
5	T1P	T1C	T3C	T3P	T2P	T2C
6	T3C	T3P	T2P	T2C	T1C	T1P
7	T2P	T2C	T3C	T3P	T1P	T1C
8	T3P	T3C	T2C	T2P	T1P	T1C
9	T2P	T2C	T1C	T1P	T3C	T3P
10	T3P	T3C	T1P	T1C	T2P	T2C
11	T1C	T1P	T3P	T3C	T2C	T2P
12	T3P	T3C	T2C	T2P	T1C	T1P
13	T2C	T2P	T1P	T1C	T3C	T3P
14	T3C	T3P	T2C	T2P	T1P	T1C
15	T2C	T2P	T3C	T3P	T1P	T1C
16	T3C	T3P	T2P	T2C	T1P	T1C
18	T1P	T1C	T2P	T2C	T3P	T3C
19	T2P	T2C	T3P	T3C	T1C	T1P
20	T2P	T2C	T3C	T3P	T1C	T1P
21	T2C	T2P	T3P	T3C	T1C	T1P
22	T3P	T3C	T1C	T1P	T2C	T2P
23	T1C	T1P	T2P	T2C	T3P	T3C
25	T1C	T1P	T2P	T2C	T3P	T3C
26	T1P	T1C	T2P	T2C	T3C	T3P
27	T3P	T3C	T1C	T1P	T2C	T2P
28	T2C	T2P	T1C	T1P	T3P	T3C
29	T1C	T1P	T3P	T3C	T2C	T2P
30	T2P	T2C	T1C	T1P	T3C	T3P
31	T2P	T2C	T1P	T1C	T3C	T3P
32	T1P	T1C	T2C	T2P	T3C	T3P

Tableau 4.5 : Comptes pour les ordres des expériences

Expérience	Réalisée en						Nombre de fois réalisée avant l'expérience associée (C ↔ P)
	1 ^{er}	2 ^{ième}	3 ^{ième}	4 ^{ième}	5 ^{ième}	6 ^{ième}	
T1C	4	5	5	5	6	5	15
T1P	5	4	5	5	5	6	15
T2C	4	6	5	7	5	3	14
T2P	6	4	7	5	3	5	16
T3C	6	5	4	4	7	4	17
T3P	5	6	4	4	4	7	13

Tableau 4.6 : Comptes pour les ordres de tâches

Tâche	Réalisée en		
	1 ^{er}	2 ^{ième}	3 ^{ième}
Tâche 1	9	10	11
Tâche 2	10	12	8
Tâche 3	11	8	11

Étant donné le fort taux de participation, les sujets restants ont permis de recueillir des mesures complémentaires (temps d'exécution) visant à obtenir une approximation des courbes d'apprentissage pour ces mêmes tâches. Pour ces participants, chaque expérience de l'étape 5 a été itérée cinq fois de suite, tandis que l'étape 6 a été omise afin de ne pas dépasser l'heure allouée pour la séance d'expériences.

4.5 Mesures et observations recueillies

Durant les expériences, deux types de mesures ont été recueillis : des mesures quantitatives (c.-à-d. objectives) et des mesures qualitatives (c.-à-d. subjectives). Nous

avons également recueilli des observations relatives à l'exécution des tâches par les sujets.

4.5.1 Mesures objectives

Nous avons chronométré le temps requis pour compléter chaque tâche. Nous avons également comptabilisé le nombre d'abandons de la tâche, ainsi que le nombre d'erreurs commises par les utilisateurs (pour une tâche donnée, nous supposons que toutes les erreurs comptabilisées ont le même poids), et calculé la précision des gestes de l'utilisateur lors de certaines interactions avec l'ordinateur porté.

Temps

Les temps requis pour compléter correctement la tâche ont été recueillis grâce à des fichiers de traces sur l'ordinateur porté et l'ordinateur conventionnel, et un chronomètre pour les tâches n'y faisant pas appel.

Erreurs

Une erreur se résume en une déviation significative du plan de réalisation optimale de la tâche ou un résultat erroné fourni par le participant. Ainsi, ce que représente une erreur varie en fonction de la tâche à accomplir :

- pour la tâche 1, réalisée aussi bien de façon conventionnelle qu'avec l'ordinateur porté, les erreurs représentent le suivi du doigt d'une mauvaise ligne par le participant ou bien l'énoncé d'un temps de passage à l'arrêt incorrect;

- pour la tâche 2, réalisée aussi bien de façon conventionnelle qu'avec l'ordinateur porté, nous avons décomposé le nombre d'erreurs en deux; le premier compte représente le nombre de fois qu'un participant a présenté un livre erroné tandis que le second représente une capture incorrecte du passage demandé (c.-à-d. copie d'un texte trop court ou trop long lors de la réalisation de la tâche de façon conventionnelle, ou capture d'un passage incomplet via l'ordinateur porté);
- pour la tâche 3, réalisée aussi bien de façon conventionnelle qu'avec l'ordinateur porté, les erreurs représentent une interaction avec une entité incorrecte (clic sur une option incorrecte pour la tâche conventionnelle ou utilisation d'une entité incorrecte lors de l'utilisation de l'ordinateur porté), l'énoncé d'un montant incorrect ou encore le transfert d'un montant erroné.

Précision des gestes

Des mesures quantifiant la précision des gestes appris par les utilisateurs ont été recueillies pour la tâche 2 réalisée à l'aide de l'ordinateur porté. Suite aux expériences, nous avons ainsi analysé les images capturées par les utilisateurs (images provenant de la caméra greffée sur le dispositif d'affichage tête haute porté par l'utilisateur) et contenant l'entité d'intérêt (c.-à-d. le passage dans son intégralité). En fonction de l'entité d'intérêt de centre $(x_{c_{entité}}, y_{c_{entité}})$ dans l'image (en pixels), et du quadrilatère de centre $(x_{c_{quadrilatère}}, y_{c_{quadrilatère}})$ et d'aire $aire_{quadrilatère}$ délimité par le geste de l'utilisateur (tel qu'identifié par l'ordinateur porté), nous avons défini la précision du geste comme suit :

$$Précision\ du\ geste = \frac{\sqrt{(xc_{entité} - xc_{quadrilatère})^2 + (yc_{entité} - yc_{quadrilatère})^2}}{aire_{quadrilatère}} \times 1000$$

Une telle mesure compare la distance entre le centre de l'entité d'intérêt et le centre du geste par rapport à l'aire de la zone délimitée par le geste (les unités sont ainsi des pixels⁻¹). Elle permet de juger indirectement de la facilité que les utilisateurs ont à réaliser le geste artificiel introduit dans la tâche.

4.5.2 Mesures subjectives

Ces mesures ont été recueillies par l'intermédiaire du questionnaire rempli par les participants (annexe B). Le questionnaire comporte six sections distinctes servant à obtenir des informations générales sur les participants, à évaluer leurs attitudes face aux tâches réalisées et aux interfaces diffuses utilisées et à recueillir diverses mesures psychométriques :

Section 1 : Informations générales sur le participant (voir 4.3).

Section 2 : Évaluation de la tâche 1.

Section 3 : Évaluation de la tâche 2 (identique à la section 2 du questionnaire).

Section 4 : Évaluation de la tâche 3 (identique à la section 2 du questionnaire).

Section 5 : Évaluation comparative des interfaces diffuses utilisées.

Section 6 : Attitudes face à l'informatique portée et commentaires du participant.

Échelles de Likert

Les sections 2, 3, 4 et 6 du questionnaire font principalement appel à des échelles de Likert [38] conventionnelles. Elles comportent ainsi des énoncés de type Likert qui permettent de quantifier de façon ordinale l'opinion du participant face à un énoncé déclaratif : 1=fortement en désaccord, 2=en désaccord, 3=ni en accord ni en désaccord, 4=d'accord, 5=fortement d'accord. Synthétisées, les réponses à ces énoncés élémentaires forment des mesures composites permettant d'évaluer les variables latentes sous-jacentes caractérisant l'interface diffuse utilisée.

Il est bon de rappeler que les échelles de Likert présentent quelques limitations. Elles peuvent ainsi toujours être sujettes à plusieurs causes de distorsion, les répondants pouvant par exemple avoir tendance à :

- éviter d'utiliser les réponses extrêmes (biais de la tendance centrale);
- être d'accord avec les énoncés tels que présentés (biais d'acquiescence);
- essayer de se représenter sous un jour favorable (biais de désirabilité sociale).

Afin de tenter de compenser ces biais, ou au moins les mitiger, et particulièrement le biais d'acquiescence, certains des énoncés du questionnaire ont été formulés de façon négative. De tels énoncés sont cependant peu nombreux puisque leur évaluation par les sujets est moins directe (et donc plus difficile) et qu'il n'existe parfois pas de formulation négative acceptable reflétant adéquatement le concept à tester (ex., intuitivité). Lors de la conception du questionnaire nous avons également contrebalancé en partie le biais d'acquiescence en disposant à gauche l'extrémité « fortement en désaccord » de l'échelle de Likert et à droite l'extrémité « fortement d'accord ». Les

humains démontrent en effet de façon générale un biais pour le côté gauche de l'espace et ils ont ainsi tendance à choisir plus fréquemment des réponses se trouvant de ce côté de l'échelle de Likert [49] (dans notre cas donc les réponses les plus négatives). Finalement, notons que nous avons expressément rappelé aux participants de bien évaluer les énoncés et de donner leur honnête opinion pour chacun d'entre eux (cf. section 4.4, étape 6).

Mesures composites

Les mesures composites utilisées permettent de caractériser différents aspects importants d'une interface diffuse :

- les quatre composantes principales de l'utilisabilité d'une interface humain-machine (**l'utilité**, **l'efficacité**, **l'efficience** et la **satisfaction** des utilisateurs; voir norme ISO9241-11), en plus de quantifier cette **utilisabilité**;
- **la facilité d'apprentissage** de l'interface diffuse utilisée;
- **l'acceptabilité de la technologie** en général.

Le Tableau 4.7 présente les construits utilisés pour chaque mesure composite, Q_x représentant la réponse du participant à l'énoncé Q_x du questionnaire (cf. annexe B). Afin d'augmenter la précision des mesures composites, plus une mesure et le concept s'y rattachant sont difficiles à quantifier objectivement, plus les énoncés s'y rapportant sont nombreux dans le questionnaire. Ceci est d'autant plus important lorsque aucune mesure objective rattachée à ce concept n'est recueillie. L'utilisabilité est une méta-mesure construite à partir de ses quatre composantes principales et pouvant servir, à titre

indicatif, à évaluer globalement une interface (notez que même si nous avons ici accordé, sans discrimination, un poids identique aux quatre mesures composites, ces poids pourraient être ajustés pour mieux refléter l'utilisabilité globale d'une interface employée lors d'une tâche plus complexe ou réalisée dans un contexte particulier). L'analyse de la validité des construits utilisés est présentée à la section 6.1.2.

Tableau 4.7 : Mesures composites

Mesure	Construit
Utilité	= Moyenne (Q10, Q16, Q19, Q25)
Efficacité	= Moyenne (Q11, Q13)
Efficience	= Moyenne (Q12, Q17 reversée, Q18 reversée, Q20, Q26)
Satisfaction	= Moyenne (Q8, Q14, Q15, Q22)
Utilisabilité	= Moyenne (Utilité, Efficacité, Efficience, Satisfaction)
Facilité d'apprentissage	= Moyenne (Q9, Q23, Q24, Q27, Q28)
Acceptabilité de la technologie	= Moyenne (Q44, Q45, Q46, Q47, Q48)

Autres mesures

Finalement, le questionnaire sert également à évaluer la charge physique et mentale des utilisateurs lors de la réalisation de la tâche (par le biais d'une auto-évaluation par le participant, comme c'est le cas par exemple pour le NASA-TLX [23]) et à recueillir des mesures nominales comparant les trois interfaces diffuses utilisées (section 5 du questionnaire) pour des fins de validation croisée.

4.5.3 Courbes d'apprentissage

Lorsque plusieurs tâches sont réalisées de façon itérative, les temps d'exécution peuvent, par le biais de la loi de la pratique (*Power Law of Practice*) investiguée entre autre par Snoddy (1926), être utilisés pour obtenir une approximation des courbes d'apprentissage

pour les tâches réalisées à la fois de façon conventionnelle et avec l'ordinateur porté. Cette loi, d'équation $T_n = T_1 n^{-\alpha}$, ou encore $\ln T_n = \ln T_1 - \alpha \ln n$, s'applique aussi bien à des tâches répétitives cognitives ou sensori-motrices qu'à des tâches répétitives plus complexes. T_n représente le temps d'exécution en secondes de la tâche à l'itération n tandis que le coefficient d'apprentissage α est un paramètre déterminé empiriquement selon la tâche. Sur une échelle log-log, le temps d'exécution de la tâche diminue ainsi linéairement avec la pratique. Afin d'améliorer la précision pour la première itération de la tâche, les données provenant de tous les temps mesurés seront utilisées (c.-à-d. 34 mesures). Pour les itérations subséquentes, le nombre d'observations disponibles sera bien évidemment moins important (c.-à-d. quatre mesures). Les courbes peuvent servir à titre indicatif, pour comparer les coefficients d'apprentissage entre les tâches.

4.5.4 Évaluation holistique

Afin d'enrichir les mesures quantitatives et qualitatives recueillies, des observations, sous forme de notes, ont été récoltées par les observateurs (c.-à-d. le responsable de l'expérience et son assistant) à la fois :

- pendant les expériences (observations directe du participant et observation du point de vue de la caméra portée par le participant, point de vue ayant été cloné sur un écran conventionnel placé à une station d'observation se trouvant derrière le participant);

- et suite à l'analyse subséquente des fichiers vidéo documentant la réalisation des tâches par les participants à partir d'un point de vue externe (caméra numérique fixe montée sur mini trépied).

Ces observations complémentaires permettent ainsi de dégager des comportements ou mode opératoires particuliers adoptés par certains utilisateurs et ainsi de mieux expliquer les performances de l'échantillon.

CHAPITRE 5 : CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT D'UN PROTOTYPE D'ORDINATEUR PORTÉ ET DES INTERFACES DIFFUSES ASSOCIÉES

Ce chapitre présente en premier lieu le prototype d'ordinateur porté que nous avons développé pour tester le concept d'interface diffuse. Nous décrivons ensuite l'architecture logicielle générique permettant de supporter nos recherches ainsi que les interfaces diffuses développées pour chacune des tâches présentées au chapitre précédent.

5.1 Prototype d'ordinateur porté

La conception d'un ordinateur porté peut se révéler un processus complexe qui nécessite de nombreux compromis tant en ce qui a trait à la sélection des composantes élémentaires qu'à leur intégration dans un support vestimentaire approprié : poids versus capacité énergétique, puissance de calcul versus chaleur dissipée, etc. Idéalement nous désirons aboutir à une plate-forme portée qui :

- est en mesure de supporter l'utilisateur lors de la réalisation de tâches réelles;
- est fonctionnelle dans toutes les conditions environnementales où l'utilisateur l'emploie;
- ne met pas en danger la sécurité de l'utilisateur (par exemple de par un poids excessif ou encore une occlusion importante de sa vision);
- minimise les contraintes, physiques entre autres, découlant de son utilisation (ex., gêne des mouvements de l'utilisateur);
- n'affecte pas de façon significative la réalisation d'activités concurrentes et/ou non supportées par l'ordinateur porté;
- est confortable dans toutes les situations d'utilisation;
- possède une grande autonomie sur batteries (typiquement une journée).

La plate-forme portée doit de ce fait être aussi petite et légère que possible, avoir une faible consommation énergétique, avoir une puissance de calcul adéquate pour traiter en temps réel les données provenant des divers capteurs selon l'application choisie et être globalement facile d'utilisation. De plus, puisqu'il s'agit d'une plate-forme destinée à des activités de recherche, il est important de mettre l'accent sur la modularité et l'extensibilité tout en respectant les contraintes budgétaires imposées par les subventions reçues.

Le prototype que nous avons conçu et développé a été raffiné graduellement au fil des ans, à la fois en fonction de nos tests préliminaires, des besoins de recherche, de nos expérimentations et de l'expérience acquise lors de son utilisation. Ce prototype a été porté plusieurs centaines d'heures durant plus de trois ans et il a même retenu l'attention

des médias⁵ et du public⁶. Nous présentons dans les sections qui suivent son architecture matérielle et nous abordons les aspects les plus intéressants du processus de conception et de développement, qui a nécessité des activités multiples et variées allant de la soudure de composants électroniques à l'adaptation du support textile utilisé.

5.1.1 Architecture matérielle

La plate-forme informatique portée utilisée a été conçue à partir de technologies existantes et développée à l'aide de composants matérielles COTS. Cette plate-forme portée est bâtie autour d'un module principal PC-104+, un standard très répandu en termes de systèmes embarqués (cf. site Internet du Consortium PC/104 : www.pc104.org). L'architecture matérielle de notre prototype [62] est illustrée à la Figure 5.1. Ses spécifications techniques principales dans sa configuration de base sont quant à elles résumées plus loin dans le Tableau 5.1. L'ordinateur porté est ainsi composé typiquement d'un module principal connecté à une source d'énergie, de périphériques d'entrée et de capteurs, de périphériques de sortie et de périphériques de stockage. Selon les besoins de recherche, la tâche à soutenir et l'interface diffuse implémentée, plusieurs modules d'extension et autres composants peuvent venir s'y greffer (carte réseau sans-fil, récepteur GPS, capteurs additionnels, etc.), l'architecture étant modulaire.

⁵ Entrevue pour le reportage "L'ordinateur porté", émission Z=MC2, Canal Z, Canada, 16 mars 2006.

⁶ Campagne de recrutement 2005 de l'École Polytechnique de Montréal.

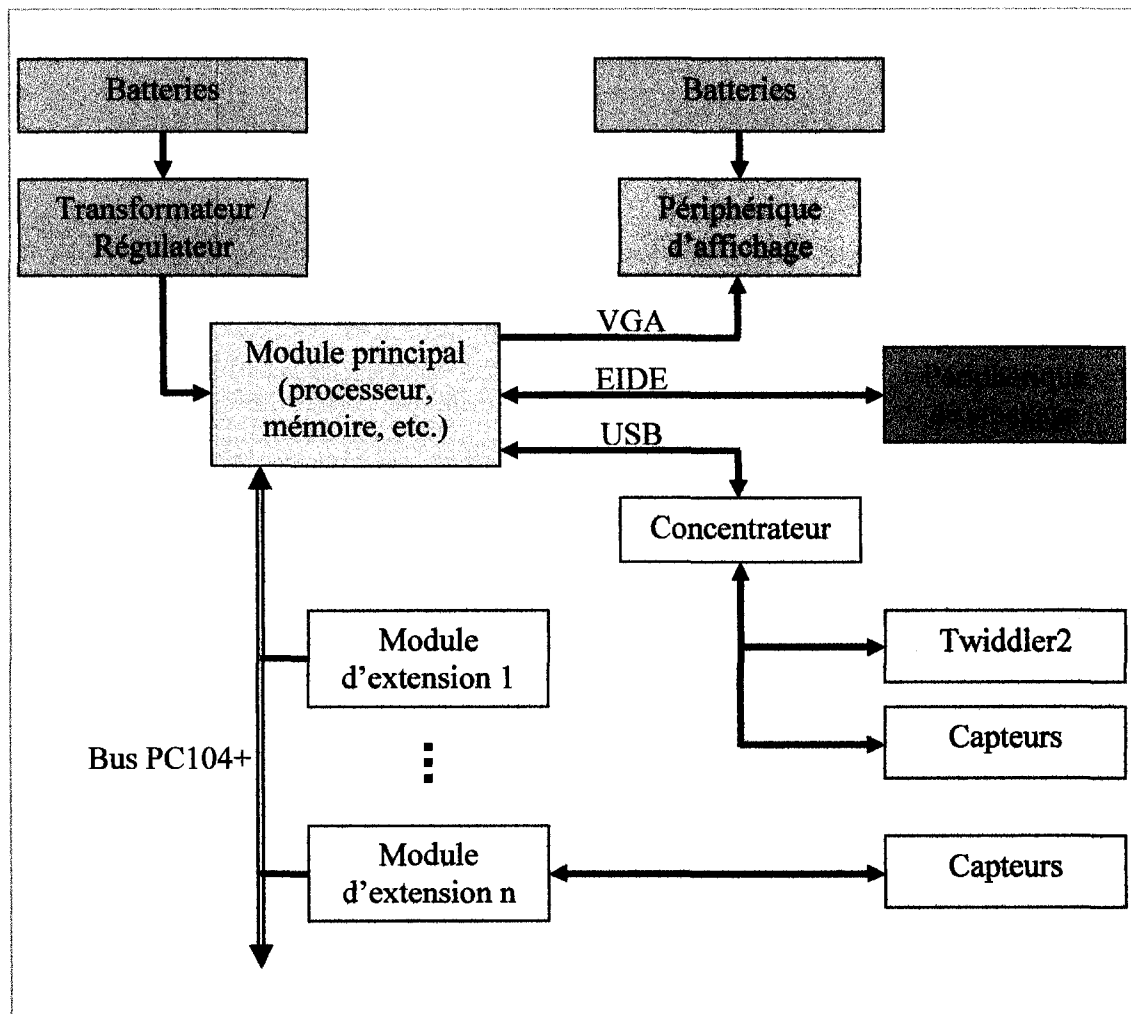


Figure 5.1 : Survol de l'architecture matérielle de l'ordinateur porté

Tableau 5.1 : Spécifications techniques de l'ordinateur porté (configuration de base)

Catégorie	Détail des composantes	Caractéristiques principales
Plate-forme centrale	Module d'ordinateur embarqué IB104+	Processeur : Transmeta Crusoe TM5800 1GHz Mémoire vive : 256 MB SDRAM Bus : PC-104+ pour modules d'extension Carte vidéo : VGA C&T69000 2MB Dimensions : 95 x 90 mm
Stockage	Disque dur mobile Hitachi 2.5"	Capacité : 40 GB Vitesse : 5400 RPM Cache : 8MB
Connectivité	Mini concentrateur USB IOGear	4 ports USB v1.1 « Self powered »
Dispositif d'affichage tête haute	Micro dispositif d'affichage Microoptical SV6 (monté sur lunettes)	Type : Monoculaire opaque Résolution : 640x480 pixels @ 60Hz Couleurs : 18 bits (262144 couleurs) Champ de vision : 16° horizontale, 20° diagonale Foyer : Ajustable de 0.5 m à 4 m Poids : 35g Source d'énergie : Batterie indépendante NP-F550 (1500 mAh @ 7.2 V = 10.8 Wh) Autonomie : 5 heures
Périphérique d'entrée pour les interactions en mode continu	Twiddler 2 USB (clavier & dispositif de pointage intégrés)	Clavier : unidextre cordique, 16 touches Dispositif de pointage : IBM Trackpoint Poids : 165 g Vitesse d'entrée : 25 à 70 mots/min pour un expert
Source d'énergie	2 batteries Lenmar LN-950 (montées en série)	Chaque batterie : Capacité : 5550 mAh @ 7.2 V = 40 Wh Dimensions : 7cm x 5.6 cm x 3.8.cm
	Transformateur continu-continu Parvus	Capacité : 20 W Entrée : 14.4 V provenant des batteries en série Sortie : +5 V & +12 V régulés Efficacité : environ 85% Dimensions : 95 x 90 mm
Refroidissement	Ventilateur Vantec Stealth (refroidissement actif à air forcé du module principal)	Dimensions : 80 x 80 x 25 mm Air déplacé : 27 cfm @ 2050 rpm Bruit : 21dBA (quasi-silencieux)
Support vestimentaire	Campco Safari Travel Vest noire modifiée	Matériau : 100 % coton Capacité : 20 cavités extérieures & intérieures Poids : 1.14 kg
Caractéristiques globales	Poids total sans batteries	Environ 2.0 kg
	Poids total avec batteries	Environ 2.5 kg
	Autonomie totale	3 à 6 heures selon l'utilisation

5.1.2 Plate-forme centrale

La norme PC-104+ définit à la fois les dimensions et les bus de données (PCI et ISA) pour des modules électroniques pouvant être empilés comme des blocs de construction. De tels modules peuvent ainsi être assemblés pour constituer des ordinateurs industriels, embarqués ou tout-terrains destinés à opérer dans des environnements inhospitaliers ou parfois extrêmes. La flexibilité, la robustesse et la disponibilité commerciale de ces modules en ont fait des candidats attrayants pour la conception de notre ordinateur porté. Mentionnons cependant que le nombre de modules empilés influence directement la facilité d'intégration vestimentaire puisqu'une pile dépassant deux ou trois modules devient rapidement trop encombrante. Les dimensions du module principal utilisé, tirées des spécifications fournies par le manufacturier, sont présentées à la Figure 5.2 tandis que les interconnexions de ce module sont présentées à la Figure 5.3. La Figure 5.4 illustre un exemple d'emboîtement de modules PC-104+. La pile utilisée au cœur de notre prototype est présentée ensuite (Figure 5.5 et Figure 5.6).

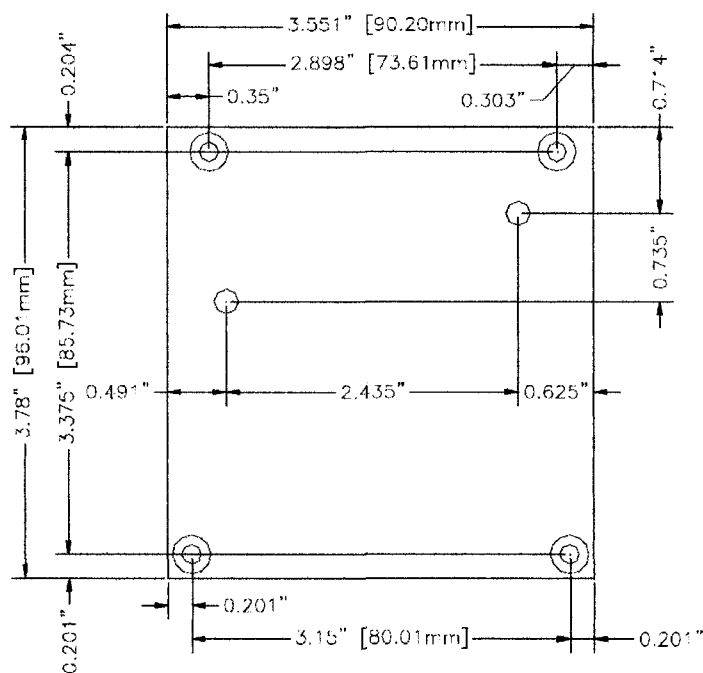
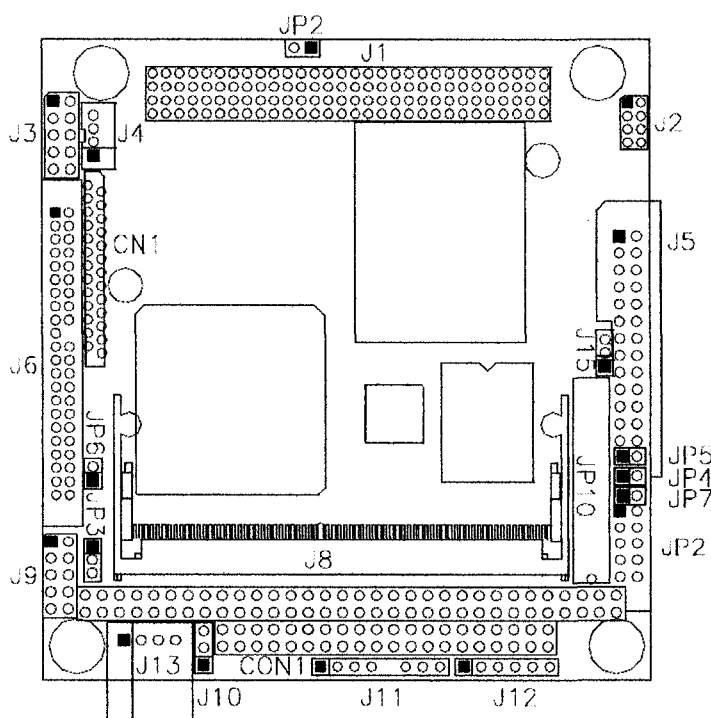


Figure 5.2 : Spécifications du module principal



Connecteurs principaux

CON1A:	PC/104
CON1B:	PC/104
CN1:	Lecteur disquette
JP2:	VGA
J2:	Réseau LAN
JP3:	Effacer CMOS
J4:	USB
JP4:	Haut-parleur
JP5:	Réinitialisation
JP6:	Batterie externe
J5:	Port parallèle
J6:	IDE
JP7:	LED allumage
J9:	COM1
J3:	COM2
JP10:	LCD
J10:	Alimentation
J11:	N.D.
J12:	Clavier/souris
J13:	Alimentation
J15:	Sélection alimentation

Figure 5.3 : Interconnexions du module principal

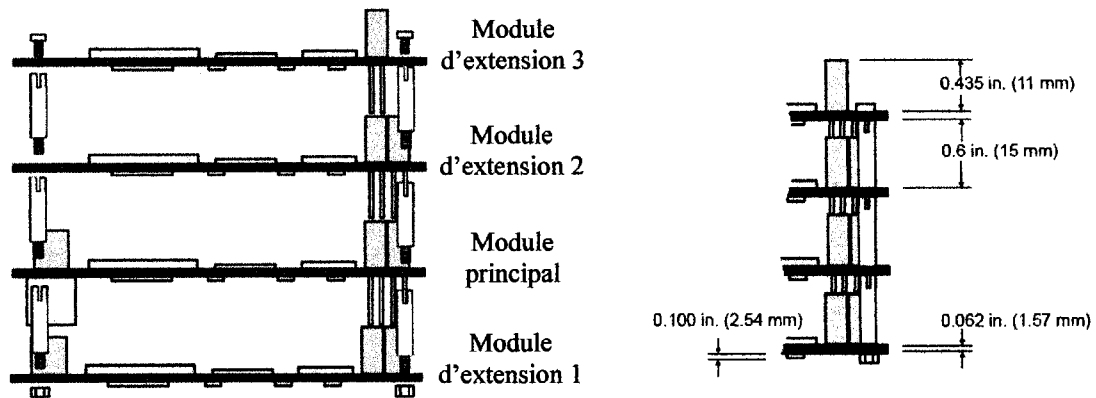


Figure 5.4 : Exemple d'emboîtement de modules PC-104+

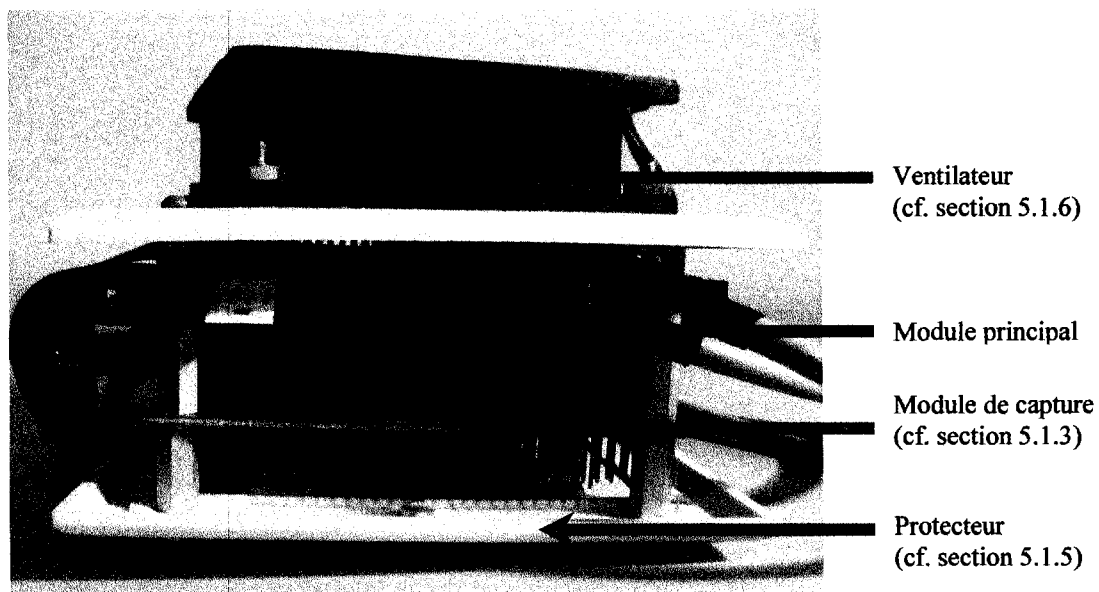


Figure 5.5 : Pile PC-104+ utilisée dans notre prototype



Figure 5.6 : Module principal au sommet de la pile

Le module principal retenu est équipé d'un processeur TM5800 de Transmeta. Il s'agit là d'un microprocesseur haute vitesse et faible puissance basé sur une architecture VLIW (*Very Large Instruction Word*). Un tel processeur est capable d'exécuter plusieurs instructions en parallèle grâce à une recompilation/optimisation dynamique du code x86 natif. Ce type de processeur a été sélectionné car il est notamment bien adapté aux opérations répétitives telles que le traitement de signal. De plus, il ne consomme généralement que quelques Watts, moins de deux en zone typique d'opération (cf. Figure 5.7 tirée des spécifications fournies par le manufacturier). Afin d'économiser de l'énergie et de dissiper moins de chaleur, le processeur ajuste en effet dynamiquement sa tension et sa fréquence d'horloge en fonction des calculs à réaliser (technologie *LongRun*). Ceci est particulièrement approprié par exemple pour du traitement d'images

en temps réel, contrairement à d'autres technologies comme ACPI (*Advanced Configuration and Power Interface*) où le processeur alterne rapidement entre un état actif et arrêté.

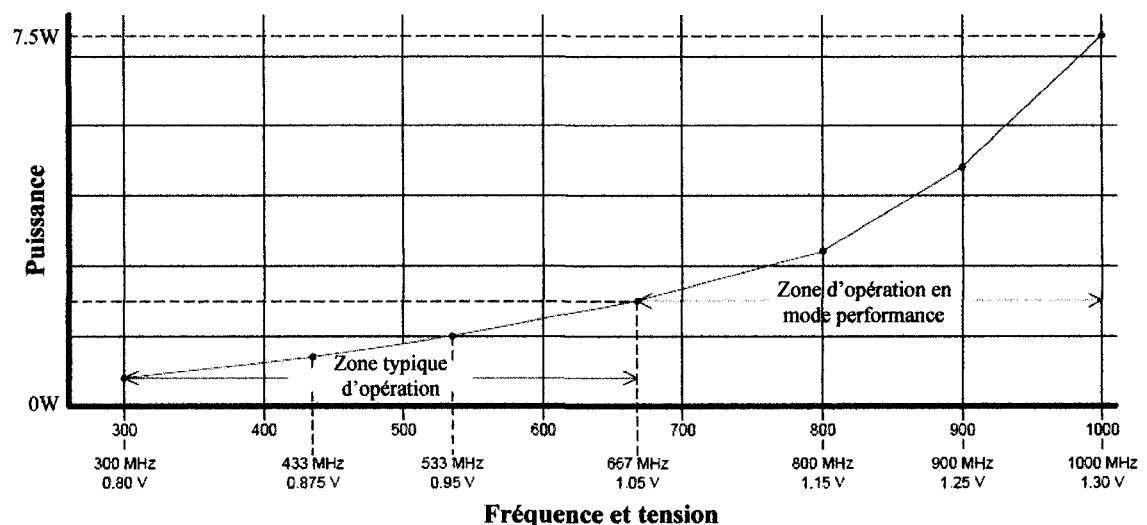


Figure 5.7 : Niveaux d'opération du processeur TM5800 utilisé

5.1.3 Capteurs

Dans le cadre de nos recherches, la détection du contexte et des actions de l'utilisateur est principalement réalisée par l'intermédiaire de deux types de capteurs : RFID et vidéo. La combinaison de marqueurs RFID passifs, préalablement placés dans l'environnement, et de lecteurs RFID USB Phidgets (www.phidgets.com), incorporés par exemple dans un gant porté par l'utilisateur, permet de détecter le contact ou la proximité avec des objets ou des parties d'objets d'intérêt. Même si la technologie RFID est très efficace pour distinguer plusieurs entités d'intérêt, elle est quelque peu invasive

et limitative puisque chacune des entités d'intérêt doit être modifiée pour incorporer un marqueur RFID. La Figure 5.8 présente le module électronique utilisé (habituellement incorporé dans un gant) et les marqueurs miniatures associés tandis que la Figure 5.9 illustre un exemple d'accès à de l'information (présentée via le système d'affichage tête haute) causé par la proximité du gant et d'un des marqueurs positionné dans l'environnement (dans cet exemple, sous des points d'intérêt d'une carte).

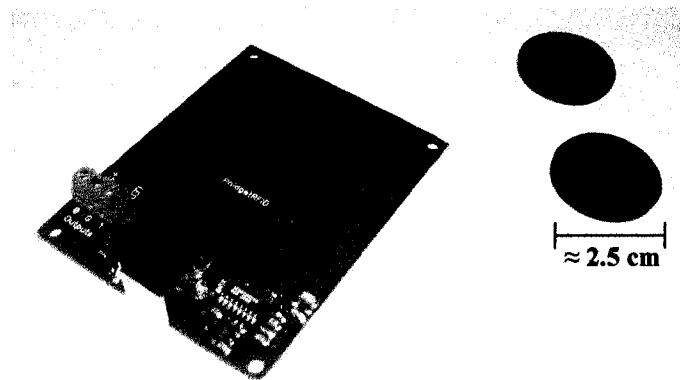


Figure 5.8 : Lecteur RFID et marqueurs miniatures utilisés

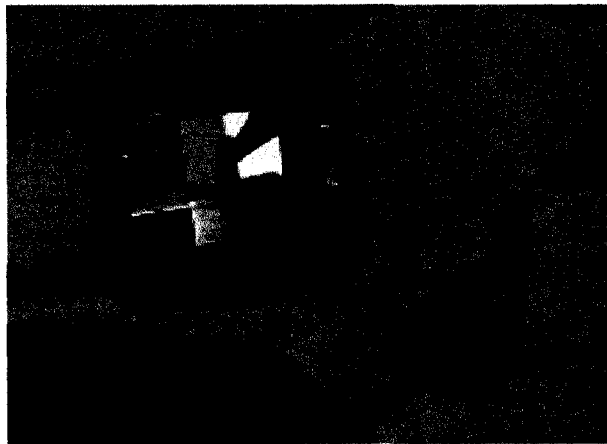


Figure 5.9 : Accès à de l'information par le toucher via des marqueurs RFID

Pour les expériences qui suivent, nous avons ainsi privilégié l'emploi d'une caméra CCD couleur miniature (résolution de capture utilisée de 320x240 pixels) montée sur les lunettes de l'utilisateur et couplée à une carte d'acquisition d'images PC-104+ Picasso de Arvo. Cette caméra permet de capturer le point de vue de l'utilisateur et de reconnaître les objets, ou parties d'objets, présents dans son champ de vision et les interactions avec ces entités. L'information contextuelle capturée provient ainsi automatiquement de l'endroit où l'attention de l'utilisateur est dirigée. La Figure 5.10 montre le dispositif utilisé dont le poids total est d'environ 100g : nous pouvons y distinguer la caméra en position « cyclope » ainsi que le système d'affichage tête haute MicroOptical SV6.

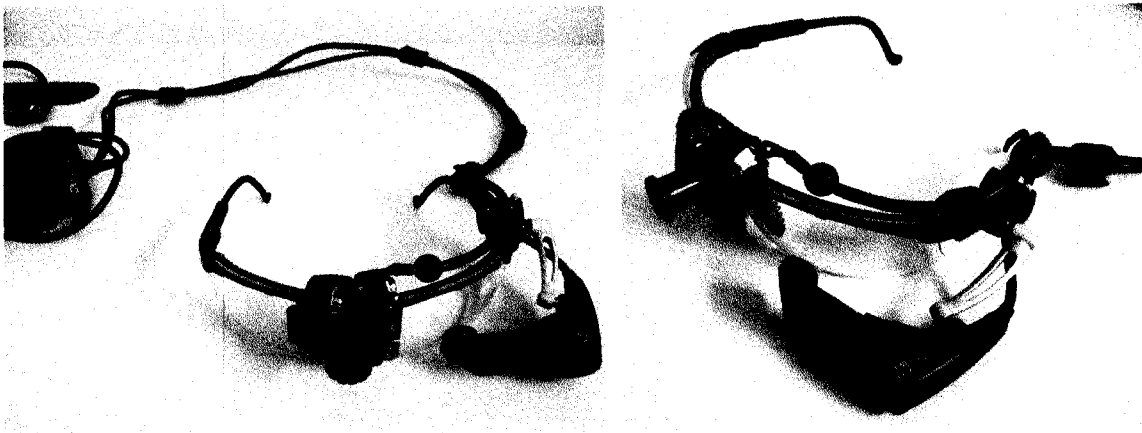


Figure 5.10 : Photos du dispositif tête haute utilisé lors des expériences

Nous avons également expérimenté avec des caméras encore plus petites (format *Snake* et *Lipstick*) pouvant être montées sur une branche de lunette (généralement la branche opposée au dispositif l'affichage). De telles caméras (cf. Figure 5.11) sont peu

encombrantes mais la qualité de l'image est médiocre à cause du capteur de type CMOS et de la lentille de petite dimension.



Figure 5.11 : Caméras de type Snake (gauche) et Lipstick (droite)

5.1.4 Alimentation

L'utilisation mobile de l'ordinateur porté nécessite la conception d'un bloc d'alimentation à la fois léger, de petite taille et permettant une autonomie adéquate. Le bloc d'alimentation développé utilise des batteries de type Lithium-Ion communément employées dans des caméscopes (caméras vidéo portatives). La technologie Lithium-Ion a été sélectionnée à cause de la rapidité de recharge (quelques heures) et de la haute densité énergétique qu'elle offre : pour un poids unitaire de 300g, une de nos batteries fournit un total de 40 Wh (5550 mAh à 7.2 V), ce qui se traduit en une énergie massique d'environ 133 Wh/kg. Notre bloc d'alimentation (cf. Figure 5.12) comporte deux batteries montées en série qui permettent de fournir environ 14.4V au transformateur continu-continu générant les tensions utiles (5V et 12V) requises par les composants de l'ordinateur porté. Ce transformateur (cf. Figure 5.13) est capable de fournir environ 4A

sur sa sortie 5V ainsi que 200mA sur sa sortie 12V, ce qui est amplement suffisant pour alimenter la plate-forme centrale et tous les périphériques utilisés.

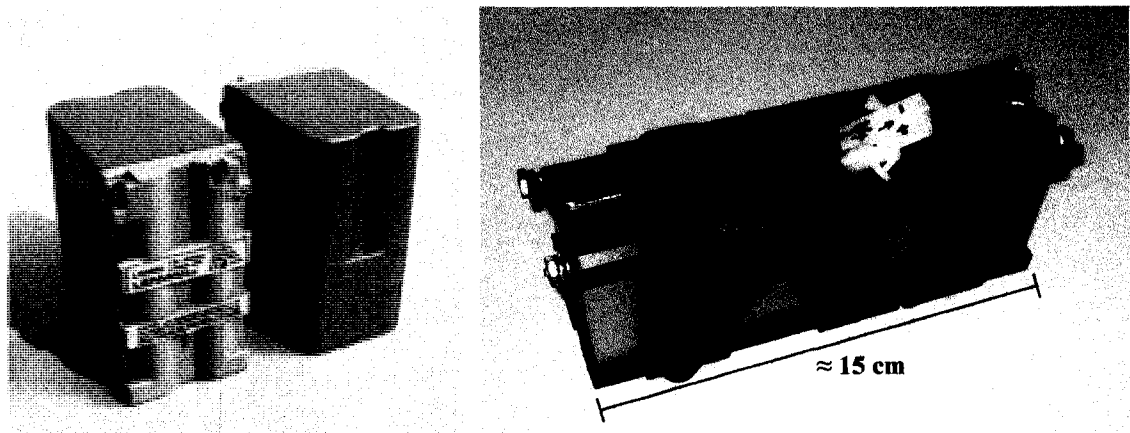


Figure 5.12 : Batteries utilisées (gauche) et bloc d'alimentation assemblé (droite)

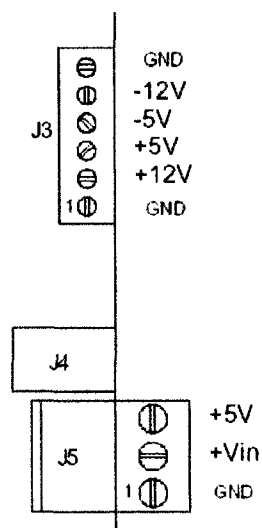


Figure 5.13 : Interconnexions du transformateur continu-continu utilisé

Nous avons conçu et assemblé le bloc d'alimentation à l'aide de panneaux enveloppants en polymère auxquels nous avons intégré des connecteurs de type bananes (cf. Figure

5.14), les fils d'alimentation étant soudés à ces connecteurs. Nous avons également assemblé nos propres connecteurs pour la distribution des tensions utiles aux composantes de l'ordinateur porté (cf. Figure 5.14). Finalement, il est à noter que le réseau de distribution de l'alimentation a été conçu de façon à minimiser les baisses éventuelles dans les tensions utiles générées : pour la stabilité du système, il est préférable de privilégier une baisse de tension sur les fils transportant le 14.4V plutôt que sur ceux transportant le 5V. La baisse de tension sera en effet plus importante, pour une longueur de fil équivalente, sur des conducteurs 18 AWG transportant du 5V que sur des conducteurs 16 AWG (c.-à-d. de plus gros diamètre) transportant du 14.4V. Nous avons donc disposé le transformateur continu-continu près du module principal tandis que le bloc d'alimentation est beaucoup plus éloigné (cf. section 5.1.5).

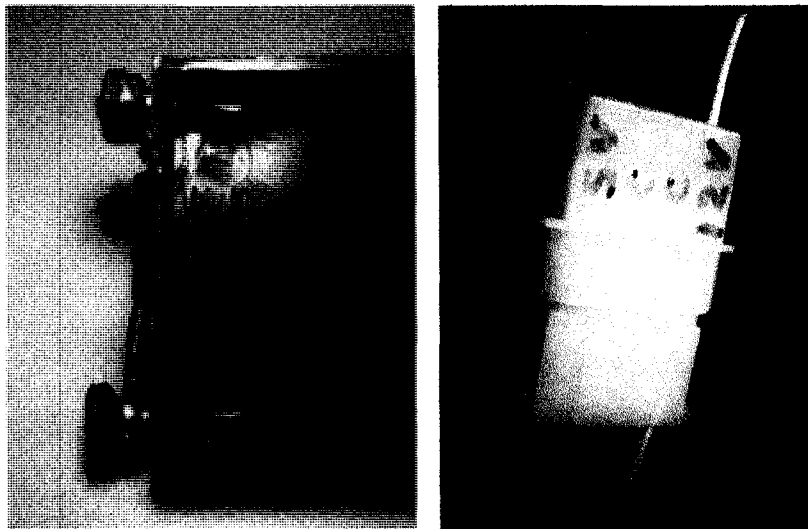


Figure 5.14 : Connecteurs bananes (gauche) et de distribution (droite)

Afin de diminuer la consommation énergétique de notre plate-forme et augmenter son autonomie, nous avons investigué l'utilisation d'un périphérique de stockage SSD (*Solid State Drive*) de 4GB de type CompactFlash. Même si un tel périphérique a de plus l'avantage d'être robuste, nous n'avons pas retenu cette technologie puisque les performances étaient pauvres comparativement à un disque dur mobile traditionnel, particulièrement pour des opérations d'écriture soutenues (ex., la sauvegarde de données telles que des images).

5.1.5 Intégration vestimentaire

Le processus d'intégration de la plate-forme dans le support vestimentaire peut à première vue sembler simple. Il doit cependant tenir compte de nombreux aspects de la morphologie et de l'anatomie humaine. Lors de l'intégration nous avons ainsi porté particulièrement attention :

- à la sensibilité de certaines parties du corps et leur tolérance à la pression en fonction des tissus sous-jacents (partie charnue, os, etc.);
- à la posture humaine, qui peut être influencée par la répartition du poids de l'ordinateur porté (cette répartition peut par exemple avoir une incidence sur le niveau de fatigue de l'utilisateur);
- à la liberté de mouvement qui peut être affectée par des éléments incorrectement intégrés au support vestimentaire (ces éléments augmentent alors l'énergie requise pour le mouvement ainsi que la perception de restriction ressentie par l'utilisateur);

- à l'aspect thermique puisque la chaleur dégagée par les composantes électroniques peut influencer la température du corps de l'utilisateur et qu'il est important chez l'humain que le tronc reste à une température relativement constante.

Nous avons cherché de ce fait à disposer les diverses composantes de l'ordinateur porté près du centre de gravité de l'utilisateur et à les répartir sur son tronc en épousant autant que possible la forme de son corps. À cette fin nous avons eu recours à une veste de type safari-photo conçue pour transporter des poids modérés. Excluant le système d'affichage tête haute et quelques capteurs, toutes les composantes sont intégrées dans cette veste (cf. Figure 5.15) qui permet à l'utilisateur de porter la plate-forme comme un vêtement. Afin de distribuer le poids des composantes sur le tronc de l'utilisateur, la portion droite de la veste est utilisée pour le système d'alimentation tandis que la portion gauche intègre le reste des composantes. Les composantes principales sont réparties sur la partie avant du tronc de façon à ne pas gêner de façon significative les mouvements de l'utilisateur qui peut alors s'asseoir ou se déplacer comme à l'habitude et utiliser sans restriction ses articulations. Lors de l'intégration dans la veste, des panneaux de plastique (cf. Figure 5.16) sont utilisés pour protéger les composantes essentielles (transformateur et pile PC-104+) tout en favorisant la circulation d'air autour de ces composantes. Les câbles nécessaires (alimentation et données) sont essentiellement routés à l'intérieur même de la veste et autour du corps de l'utilisateur (via le dos lorsque nécessaire). Le routage des câbles d'alimentation et de données a cependant été réalisé de façon indépendante afin de minimiser les interférences potentielles.

Finalement, il est à noter que le support vestimentaire sélectionné est entièrement fait de coton. Le coton, qui est un polymère naturel composé principalement de cellulose, a été retenu puisqu'il s'agit de l'un des meilleurs matériaux anti-statique. Il est relativement neutre (c.-à-d. qu'il n'a ni tendance à donner ni à attirer d'électrons) et ne cause presque jamais de décharges électrostatiques. Il s'agit également d'un matériau dissipant bien la chaleur du corps de l'utilisateur.

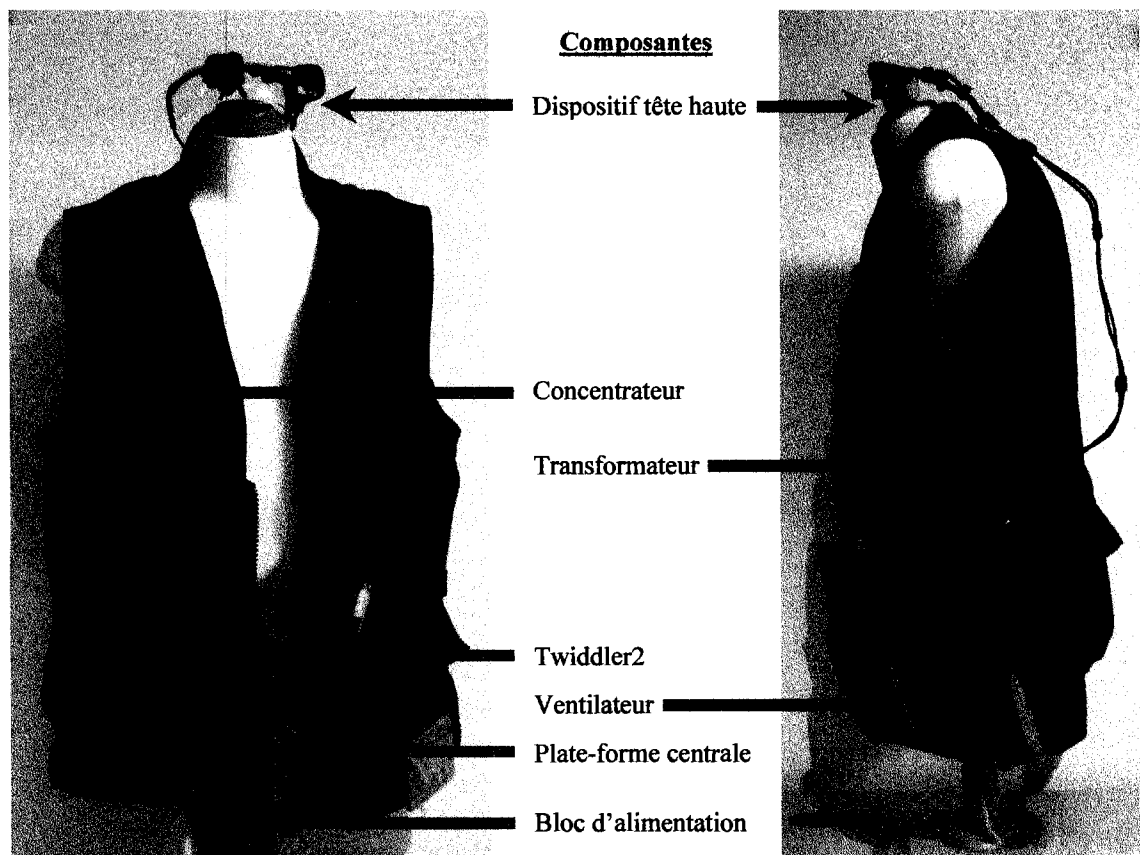


Figure 5.15 : Prototype d'ordinateur porté

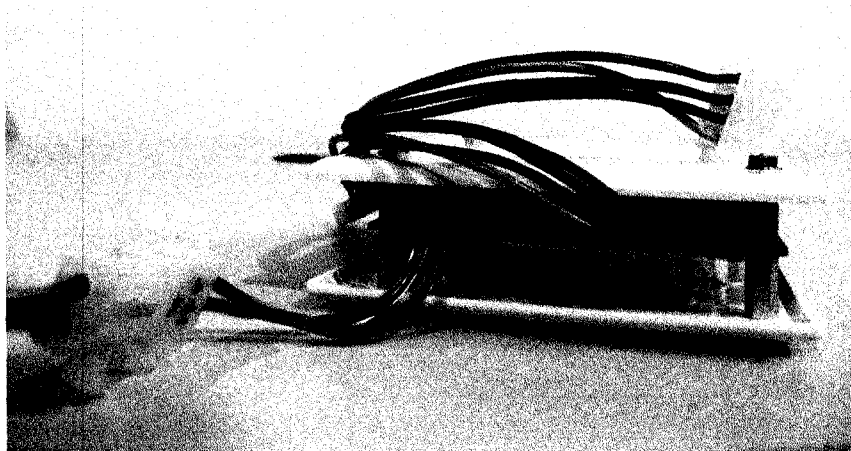


Figure 5.16 : Protectors de plastique enveloppant le transformateur

5.1.6 Dissipation de chaleur

Toutes les composantes électroniques utilisées génèrent de la chaleur. En intégrant ces composantes dans la veste, un environnement fermé est créé dans lequel la dissipation naturelle de chaleur, essentiellement par conduction et à moindre échelle par convection et radiation, peut ne pas suffire à prévenir la surchauffe de certaines composantes. Nous avons pu constater cela par nous-mêmes lorsqu'un module principal PC-104+ Cool RoadRunner III de Lippert basé sur un processeur Pentium III ULV 933MHz a subi une défaillance due à une surchauffe lors de nos expériences d'intégration préliminaires. Pour contrer de telles défaillances, nous nous sommes penchés sur le problème de la dissipation de chaleur, et particulièrement celle générée par la plate-forme centrale (c.-à-d. la pile PC-104+).

Même si la température de jonction (c.-à-d. la température interne du semi-conducteur) maximale T_j pour le processeur utilisé est de 80°C, la température de service (*operating*

temperature) du module principal spécifiée par le manufacturier est de 0 à 60°C tandis que celle du module de capture est inférieure, de 0 à 55°C. Cela signifie que la température de l'environnement dans lequel les modules sont placés doit absolument demeurer dans cette dernière fourchette pour qu'ils fonctionnent correctement et ne surchauffent pas. L'enveloppe thermique (*Thermal Design Power* ou TDP), c.-à-d. la puissance maximale qu'un système de refroidissement doit être en mesure de dissiper, est déjà de 7.5W uniquement pour le processeur. Incluant le processeur, le module principal a une TDP de 15W et le module de capture une TDP de 4.9W, pour un total d'environ 20W. Afin de dissiper adéquatement cette chaleur, nous avons en premier lieu conçu la pile PC-104+ et intégré le module principal de façon à ce que le dissipateur de chaleur (*heatsink*) de ce module soit face à l'extérieur de la veste et non face à l'utilisateur. En second lieu, nous avons choisi d'utiliser une solution de refroidissement par convection forcée par un ventilateur pour générer un écoulement d'air permettant d'extraire la chaleur dégagée par la plate-forme centrale et de la transférer à l'environnement externe (cf. Figure 5.17). Les paramètres du ventilateur dépendent de la quantité d'air requise qui peut être déterminée via l'équation de transfert de chaleur :

$$Q = m C_s \Delta T$$

où Q représente la quantité de chaleur transférée par unité de temps (en W), m représente le débit massique (en kg/s), C_s représente la chaleur spécifique (c.-à-d. la chaleur requise pour élever 1kg de 1°K, en J/kg/°K) et ΔT représente l'écart de température (en °K) entre le milieu interne (dans la veste) et le milieu externe (l'environnement). En

incorporant les facteurs de conversion ainsi que la chaleur spécifique et la densité de l'air, nous obtenons l'équation suivante :

$$F = \frac{1.76 Q}{\Delta T}$$

où F représente la quantité d'air requise (en cfm, c.-à-d. en $\text{ft}^3/\text{min.}$), Q représente la quantité de chaleur maximale à dissiper par seconde (en W) et ΔT représente l'écart maximal de température (en $^{\circ}\text{C}$) entre le milieu interne et le milieu externe. En supposant que le milieu externe est à une température de 25°C et que la température maximale permise pour le milieu interne est de 45°C (pour assurer le confort de l'utilisateur et conserver une marge de sécurité), le débit d'air minimal requis est alors de 1.76 cfm. Ce nombre théorique ne prend cependant pas en compte la résistance au flot d'air causée par des obstructions telles que le maillage de sécurité que nous avons installé sur la partie externe du ventilateur (cf. Figure 5.18) pour éviter des rencontres douloureuses entre les doigts de l'utilisateur et les pales du ventilateur. Ces obstructions affectent le débit d'air et peuvent facilement le diminuer de moitié. Nous avons donc surdimensionné le ventilateur d'un facteur dépassant dix pour être sûrs de compenser l'effet de ces obstructions et nous assurer que le module principal soit adéquatement refroidi en tout temps. Finalement, nous avons monté le ventilateur pour qu'il expulse de l'air interne (et non qu'il fasse entrer de l'air externe) puisque cette configuration permet un meilleur flot d'air en évitant la contre-pression causée par le dissipateur de chaleur du module principal.

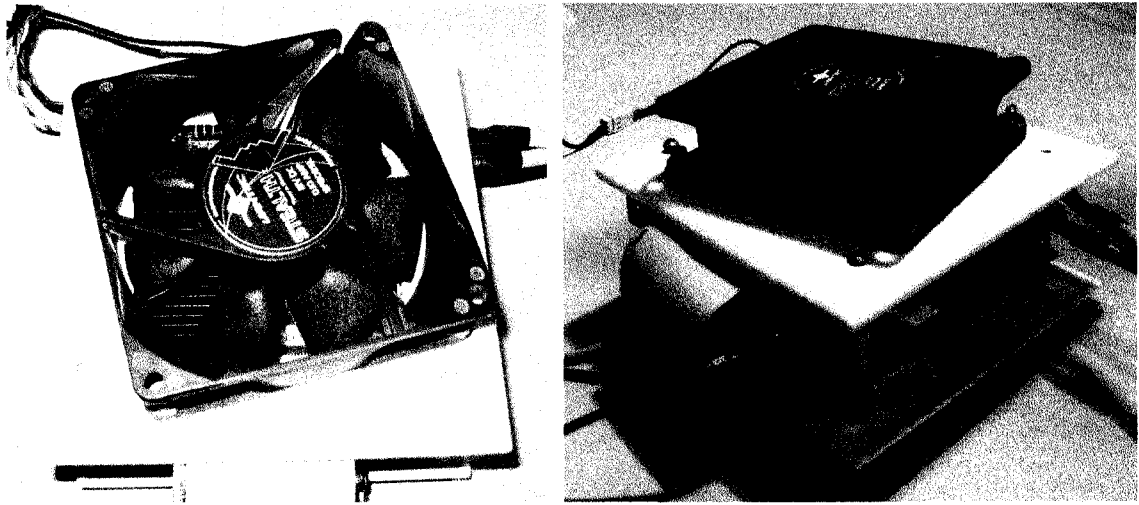


Figure 5.17 : Solution de refroidissement par convection forcée

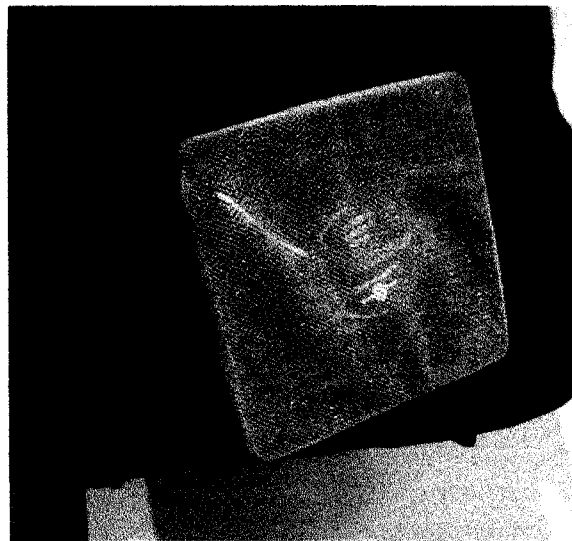


Figure 5.18 : Maillage de sécurité pour le ventilateur

5.2 Architecture logicielle générique

L'architecture logicielle que nous avons développée [60] pour étudier le nouveau paradigme d'interaction humain-ordinateur porté proposé est étroitement liée au principe

sous-jacent évoqué plus tôt où l'utilisateur interagit avec son ordinateur porté à travers les entités associées à la tâche. Pour ce faire, l'ordinateur porté doit incorporer des mécanismes lui permettant d'être sensible au contexte et de gérer adéquatement l'attention humaine. Les applications s'exécutant sur l'ordinateur porté peuvent ainsi faire appel à deux classes de services : l'une interprétant l'environnement dans lequel évolue l'utilisateur (sensibilité au contexte) et l'autre lui présentant l'information (gestion d'attention). La Figure 5.19 illustre le flot de l'information au cours des interactions humain-ordinateur porté. Du côté de l'ordinateur porté, nous distinguons quatre couches : 1) une couche Capteur, 2) une couche Interprétation, 3) une couche Application et 4) une couche Présentation. Les couches Capteur, Interprétation et Présentation contiennent des services utilitaires accessibles par toutes les applications clientes s'exécutant dans la couche Application.

5.2.1 Couche Capteur

La couche Capteur gère, comme son nom l'indique, tous les capteurs de l'ordinateur porté. Elle capte et fournit les données brutes récoltées à la couche Interprétation. Cette couche fait appel aux bibliothèques logicielles fournies par les manufacturiers des capteurs utilisés (Picasso/Arvoo SDK, Phidgets SDK, etc.).

5.2.2 Couche Interprétation

Le rôle de la couche Interprétation est double. Elle permet, d'une part, de transformer les données brutes (extraction de caractéristiques) et, d'autre part, de synthétiser cette

information à un plus haut niveau. Cette couche fait en partie appel aux primitives de la bibliothèque logicielle OpenCV de Intel pour le traitement d'images et la vision par ordinateur (pour par exemple détecter, segmenter et suivre en temps réel les mains de l'utilisateur et/ou pour détecter la présence d'objets spécifiques dans l'image). Les informations relatives au contexte sont rendues disponibles à toutes les applications clientes qui en font la demande. Une application bancaire pourrait par exemple vouloir savoir si une carte de crédit est présente devant l'utilisateur, une application de gestion de rendez-vous pourrait être intéressée par une horloge dans le champ de vision de l'utilisateur, etc.

5.2.3 Couche Application

Chaque application a un rôle bien défini et contient la logique permettant de supporter une tâche spécifique. Plusieurs applications clientes pourraient être actives en même temps afin de supporter diverses tâches en parallèle. Cependant, dans le cadre des expériences présentées plus loin, nous nous limitons à une seule application cliente.

5.2.4 Couche Présentation

Lorsqu'une application cliente doit transmettre de l'information à l'utilisateur, elle le fait en invoquant les services disponibles dans la couche Présentation. Cette dernière permet de gérer l'attention de l'utilisateur en prenant en compte la pertinence de l'information à transmettre comparée à l'importance de l'information actuellement présentée (s'il y en a). Elle décide quelle information doit être transmise à l'utilisateur selon a) la priorité de

chaque application cliente, b) la priorité attachée à l'information devant être relayée et c) du moyen devant être utilisé (médium et localisation souhaitée) pour la véhiculer. Nous tentons ici de prévenir toute surcharge au niveau de l'attention de l'utilisateur puisqu'il s'agit là d'une ressource limitée.

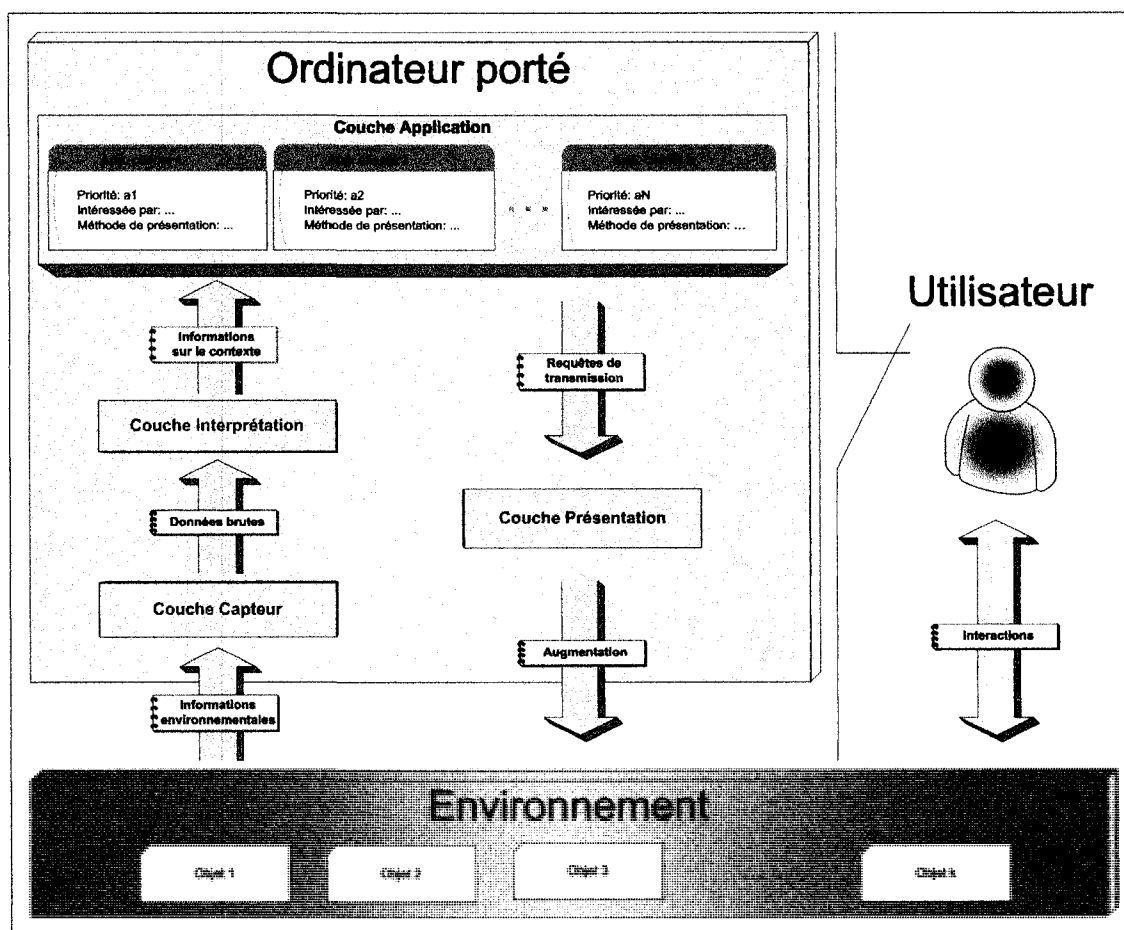


Figure 5.19 : Représentation de l'architecture logicielle

Cette architecture, implémentée en C++, permet ainsi de 1) faire l'acquisition de données à partir des capteurs, 2) les interpréter pour obtenir un contexte spécifique à la tâche, 3) partager cette information avec les applications clientes enregistrées et 4)

laisser les applications clientes réagir en fonction d'une logique propre. Comme l'illustre la Figure 5.19, il s'agit bien d'une interface diffuse puisque aucune interaction directe n'a lieu entre l'utilisateur et son ordinateur porté; tout dialogue passe par l'environnement et les artéfacts de la tâche.

5.3 Interfaces diffuses

Le nouveau paradigme d'interaction que nous proposons [60] repose sur une diffusion de l'interface humain-ordinateur dans l'environnement de l'utilisateur : le monde réel est utilisé comme interface primaire à l'ordinateur porté. Au lieu de forcer l'utilisateur à dialoguer avec l'ordinateur porté à travers des intermédiaires ou des espaces artificiels, les fonctionnalités de l'ordinateur porté deviennent accessibles à travers des interactions avec les objets de l'environnement.

5.3.1 Présentation d'information

Afin de favoriser le traitement et l'assimilation rapide de l'information par l'utilisateur, cette information est présentée autant que possible par superposition aux entités d'intérêt dans la vue du monde réel. Ceci permet de renforcer les liens existants entre l'information virtuelle et l'entité réelle associée. Toutes les interfaces tentent également de présenter l'information sous une forme visuelle aussi concise (en termes de quantité d'information présentée) et perceptible (en termes de taille) que possible afin de minimiser les faiblesses de l'affichage tête haute (résolution, angle de vision, etc.) et

l'impact de limitations potentielles des utilisateurs. De plus, l'information principale est présentée en vert, cette couleur étant la mieux perçue par la vision trichromatique humaine. Pour la vision photopique, l'œil humain est en effet le plus sensible à la lumière verte : sensibilité maximale d'environ 683 lumens/W autour de 555 nm [85]; une longueur d'onde de cet ordre stimulant les cônes γ et ρ en même temps et de façon presque identique (cf. Tableau 5.2).

Tableau 5.2 : Sensibilité des cônes de la vision humaine

Cônes	Sensibilité	Longueurs d'onde détectées	Sensibilité maximale
β	Ondes courtes	400 à 500nm	420 à 440nm
γ	Ondes moyennes	450 à 630nm	534 à 545nm
ρ	Ondes longues	500 à 700nm	564 à 580nm

5.3.2 Interface diffuse pour la tâche 1

En termes de buts à accomplir, la tâche réalisée à l'aide de l'ordinateur porté est identique à la tâche conventionnelle : il s'agit toujours d'obtenir, à partir d'un feuillet horaire, les heures de prochain passage prévues en fonction de paramètres prédéterminés. Le feuillet horaire et les paramètres sont bien évidemment différents, et la façon de réaliser la tâche sera également quelque peu différente; l'introduction de l'ordinateur porté, comme tout changement technologique, entraînant une ré-ingénierie de la tâche. Ainsi, en interagissant avec l'ordinateur porté à travers une interface diffuse, l'utilisateur sera en mesure d'accéder à l'information recherchée. Le billet décrivant la

mise en situation et les buts à accomplir pour réaliser la tâche avec l'ordinateur porté, tel que soumis aux participants de l'étude, est présenté à la Figure 5.20.

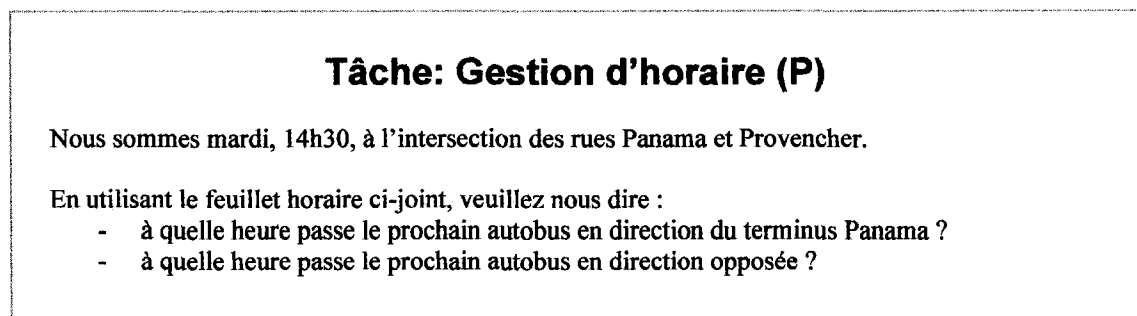


Figure 5.20 : Billet de la tâche 1 avec l'ordinateur porté présenté aux participants

Associations entités – actions – fonctionnalités

À la lumière de l'analyse de la tâche conventionnelle, il est clair qu'il existe un bassin de comportements humains préexistants exploitables lors la conception d'une interface diffuse. Il est en effet possible de venir se greffer sur plusieurs gestes instinctifs de l'utilisateur afin de les transformer en commandes implicites à l'ordinateur porté et aider à la réalisation de la tâche. Nous avons donc associé chaque intersection de la table des horaires (entité), le fait de la pointer du doigt (action) et l'obtention de la prochaine heure de passage via l'ordinateur porté (fonctionnalité). Ainsi, en manipulant naturellement le feuillet horaire, l'utilisateur fait tacitement la requête de l'information recherchée à l'ordinateur porté et fait apparaître automatiquement cette information. De telles associations entités-actions-fonctionnalité ne devraient pas alourdir la tâche puisque, par rapport à la tâche conventionnelle, aucune interaction supplémentaire n'est rajoutée et aucune manipulation usuelle n'est radicalement transformée.

Structure des interactions

Le flot des interactions entre l'utilisateur, l'ordinateur porté et l'artéfact de la tâche est résumé dans le diagramme de séquence ci-après (Figure 5.21). Nous indiquons qu'il y a interaction uniquement lorsqu'une manipulation de l'artéfact se produit; une simple acquisition d'information (c.-à-d. lecture; qui est souvent réalisée en continu par l'utilisateur) n'est donc pas représentée sur le diagramme.

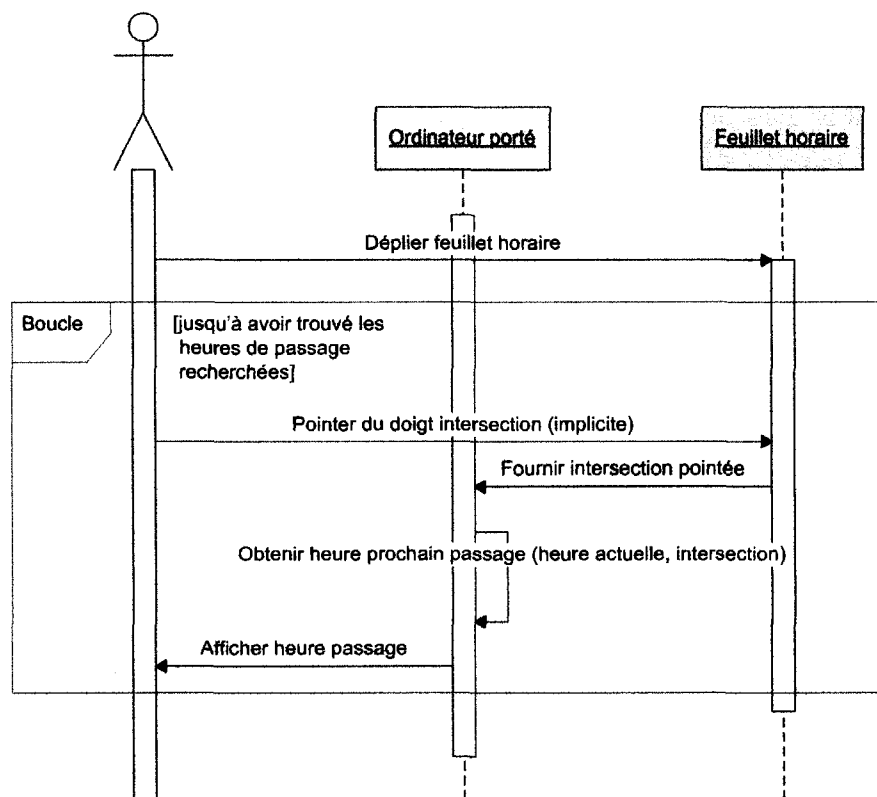


Figure 5.21 : Diagramme de séquence pour la tâche 1 avec l'ordinateur porté

Détails d'implémentation

Nous expliquons ici les aspects principaux de l'implémentation logicielle de l'interface diffuse, particulièrement en ce qui a trait à la couche Interprétation qui fait appel à

plusieurs techniques de traitement d'image traditionnelles. Les interactions avec le feuillet horaire reposent sur la capacité de l'ordinateur porté à détecter l'intersection pointée par l'utilisateur dans la table des horaires. Pour ce faire, nous avons doté le feuillet horaire de quatre marqueurs de repère (marqueurs fiduciaux). De tels marqueurs sont facilement identifiables dans les images capturées grâce à leur couleur artificielle (segmentation des blocs de couleur rose vif, cf. Figure 5.22).

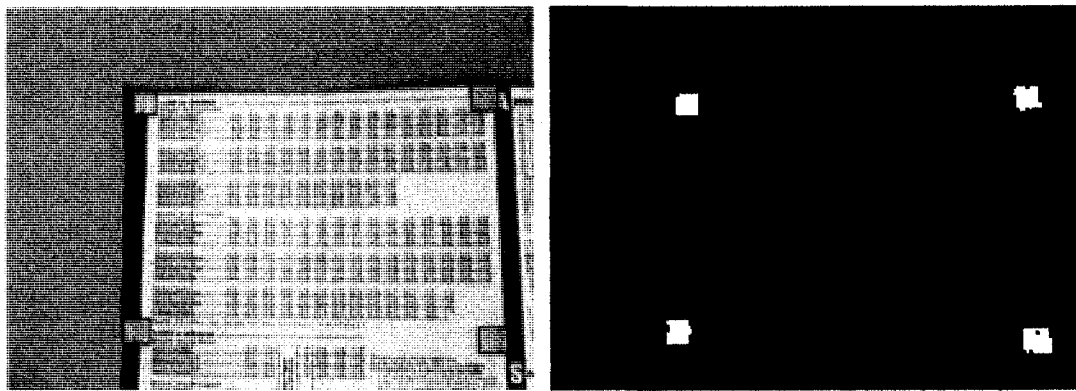


Figure 5.22 : Segmentation des marqueurs fiduciaux dans l'image

La position connue de ces marqueurs permet de définir une grille d'interaction sur le feuillet horaire, c.-à-d. des zones qui réagissent à la présence du doigt de l'utilisateur. Cette grille est bien entendu adaptée en fonction du point de vue de la caméra. Ainsi, lorsqu'elles sont observées via la caméra, les zones subissent une transformation projective plane modélisée par l'équation

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}$$

où (x', y') sont les coordonnées connues d'un point dans l'espace de la grille d'interaction et (x, y) sont les coordonnées de ce même point dans l'image acquise par la caméra. Chacun des $n=4$ centres des marqueurs donne ainsi deux équations. En posant $h_{33}=1$, la résolution du système de huit équations linéaires permet de trouver les huit inconnues de la matrice homogène et, par la suite, en inversant cette matrice, de trouver les coordonnées des zones d'interactions dans l'image actuelle. Notons que tout ceci suppose que le feuillet horaire est un objet rigide non-déformable, ce qui n'est pas tout à fait exact en réalité puisque ce feuillet (étant fait de papier) pourrait être courbé par l'utilisateur. Notons également que tous les marqueurs doivent être visibles dans l'image et qu'une perte d'un marqueur entraîne invariablement un arrêt des interactions. Ceci se produit par exemple si un marqueur sort du champ de vision de l'utilisateur / de la caméra, ou encore lorsqu'un sujet masque de sa main, son poignet ou son avant-bras, un des marqueurs positionné au bas du feuillet.

La détection du doigt de l'utilisateur repose quant à elle sur la détection de pixels assimilés à de la peau humaine dans l'image. Cette détection est effectuée par le biais d'un classificateur heuristique rapide basé sur la couleur dans un espace HSV normalisé (0 à 1). En effet, dans un tel espace, les pixels de couleur de peau sont concentrés dans un nuage relativement localisé et sont donc facilement isolables [21, 89], quelle que soient leur teinte. Ainsi, en définissant les équations délimitant la frontière de ce nuage, chaque pixel peut rapidement être testé pour déterminer s'il s'agit d'un pixel de peau ou non (cf. Figure 5.23). Nous n'avons cependant pas tenu compte de la luminance (composante V) puisque les variations dans les teintes de peau sont majoritairement

attribuables à des variations de chrominance (composante H et S). Cette réduction dimensionnelle permet légitimement de rendre le classificateur plus robuste aux changements d'illumination, de simplifier les règles de décision et donc de réduire le temps de traitement.



Figure 5.23 : Segmentation des pixels de couleur de peau

Pour décider s'il y a interaction ou non, chaque zone d'interaction est analysée en commençant à partir des zones situées au haut du feuillet. Lorsqu'une zone comporte assez de pixels de couleur de peau par rapport au nombre de pixels total dans la zone (seuil fixé empiriquement à 10%), cette région est considérée comme active et l'heure de passage associée peut être affichée. Une telle technique évite de recourir à des approximations d'ellipses pour obtenir les coordonnées du bout du doigt, ce qui est plus demandant en termes de temps de calcul.

En ce qui a trait à l'application cliente (couche Application), son implémentation se limite à une logique élémentaire et une base de données contenant les heures de prochain passage spécifiques correspondant aux paramètres de la tâche demandée aux utilisateurs

(nous visons le test du concept d'interface diffuse plus que le développement d'une application générique). La Figure 5.24 présente l'affichage de la prochaine heure de passage en fonction de la position du doigt de l'utilisateur.



Figure 5.24 : Affichage de la prochaine heure de passage selon la position du doigt

5.3.3 Interface diffuse pour la tâche 2

Pour la tâche 2, tout comme pour la tâche 1, la tâche réalisée à l'aide de l'ordinateur porté est identique à la tâche conventionnelle en termes de buts à accomplir : il s'agit toujours de trouver, parmi un ensemble de livres, un livre comportant un chapitre traitant d'un sujet spécifique, puis à prendre en note une courte portion de ce chapitre. Les paramètres de la tâche (c.-à-d. le livre recherché) ainsi que la façon de la réaliser vont bien évidemment encore une fois différer. Ainsi, en interagissant avec l'ordinateur porté à travers une interface diffuse, l'utilisateur sera en mesure d'accéder à de l'information permettant de guider sa prise de décision lors de l'étape de recherche puis d'effectuer la prise en notes sur un support numérique au lieu d'un support papier. Le billet décrivant

la mise en situation et les buts à accomplir pour réaliser la tâche avec l'ordinateur porté, tel que soumis aux participants de l'étude, est présenté à la Figure 5.25.

Tâche: Gestion bibliographique (P)

Vous êtes à la bibliothèque et vous recherchez un livre traitant en partie de "La communication bidirectionnelle dans les organisations".

Veillez :

- trouver, sortir et nous montrer le livre comportant un chapitre sur ce sujet;
- prendre en note la première ligne de ce chapitre.

Figure 5.25 : Billet de la tâche 2 avec l'ordinateur porté présenté aux participants

Associations entités – actions – fonctionnalités

Pour la première partie de la tâche, nous souhaitons supporter la prise de décision de l'utilisateur lors de sa recherche du livre spécifié. Via l'ordinateur porté, il s'agit d'influencer de façon perceptible les processus décisionnels de l'utilisateur de façon à orienter sa recherche. Même s'il est clair que le bassin de comportements exploitables est quelque peu restreint, il est possible de venir se greffer sur des gestes nécessaires de l'utilisateur pour construire des associations entité-action-fonctionnalité à la fois cohérentes et favorisant un dévoilement progressif de l'information (cf. information juste-à-temps, section 2.2.2). Plus précisément, nous avons choisi de mettre à profit le parcours du regard des livres lors de la recherche d'un candidat potentiel, ainsi que la saisie et l'inspection d'un tel candidat. Nous avons ainsi associé :

- un livre (entité), l'observation de son flanc (action) et la suggestion d'une exploration plus avant de ce candidat (fonctionnalité);

- un livre (entité), l'inspection de sa couverture (action) et la requête des mots clés associés à ce livre (fonctionnalité).

Grâce à ces deux types d'associations, il devient possible pour un utilisateur réalisant normalement la première partie de la tâche de faire implicitement la requête d'informations destinées à guider sa prise de décision. L'ordinateur porté tentera en premier lieu d'attirer l'attention de l'utilisateur en mettant en évidence (en les encerclant) des entités de la tâche jugées intéressantes, une fois celles-ci reconnues. Si l'utilisateur décide, après avoir remarqué l'indice associé, de manifester un intérêt pour un candidat potentiel en le saisissant et en l'inspectant, l'ordinateur porté lui fournira de l'information additionnelle sur cette entité. Notons que la seconde association représente, par rapport à la première, un niveau plus poussé de dévoilement de l'information.

Pour la seconde partie de la tâche, nous souhaitons tirer partie de la rapidité et du potentiel d'archivage de l'ordinateur porté. Il s'agit donc de repenser la portion « prise en notes » en fonction des capacités du support à la tâche utilisé. N'ayant presque aucun comportement naturel sur lequel s'appuyer, nous désirons introduire une action explicite permettant à l'utilisateur de demander à son ordinateur porté de capturer une portion quelconque de son champ visuel. Une telle action doit permettre de définir la portion du champ visuel à capturer et à sauvegarder, tout en étant facile à apprendre, exécuter et retenir. Elle doit donc être ancrée dans une symbolique forte et évocatrice. Le geste de capture retenu fait ainsi appel à la métaphore du cadre photo : en formant tout simplement un cadre pseudo-rectangulaire, à l'aide des index et des pouces des deux

mains, l'utilisateur peut délimiter et copier un passage d'un livre, ou éventuellement tout autre région d'intérêt de l'environnement.

Structure des interactions

Le flot des interactions entre l'utilisateur, l'ordinateur porté et une entité d'intérêt de la tâche (livre) est résumé dans le diagramme de séquence ci-après (Figure 5.26).

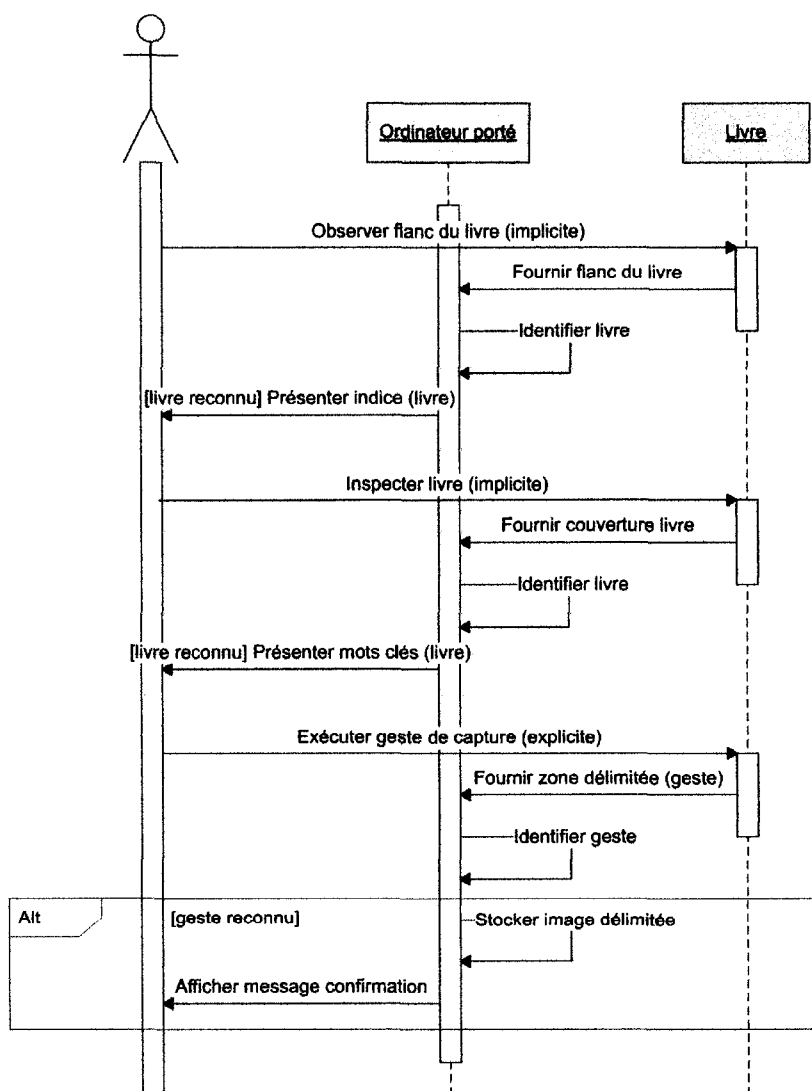


Figure 5.26 : Diagramme de séquence pour la tâche 2 avec l'ordinateur porté

Détails d'implémentation

L'influence des processus décisionnels de l'utilisateur passe par l'association d'indices à des entités d'intérêt dans son champ de vision. L'ordinateur porté doit ainsi être en mesure de détecter et reconnaître ces entités et certaines interactions avec ces entités dans les images capturées. Afin de faciliter l'implémentation de l'interface diffuse pour cette tâche, les livres utilisés pour les expériences ont soigneusement été sélectionnés en fonction de leur apparence distinctive. La détection d'un livre dans une image est basée sur la reconnaissance de la distribution de la teinte des pixels associée à ce livre. À partir de l'histogramme des teintes (composante H dans l'espace HSV) d'un modèle du livre, il est possible de re-projeter cet histogramme dans l'image afin d'obtenir la probabilité d'observer chacun des pixels de l'image étant donné la fonction de distribution de probabilité des teintes. Il suffit alors de binariser l'image (seuillage) et d'isoler les entités comportant assez de pixels 8-connectés. Finalement, selon des règles heuristiques basées sur l'aire et la forme des entités détectées, ainsi que la présence ou non de pixels de couleur de peau à proximité, il est possible de leur associer différents indices. La Figure 5.27 montre des indices présentés aux utilisateurs pour orienter leur prise de décisions durant la recherche.

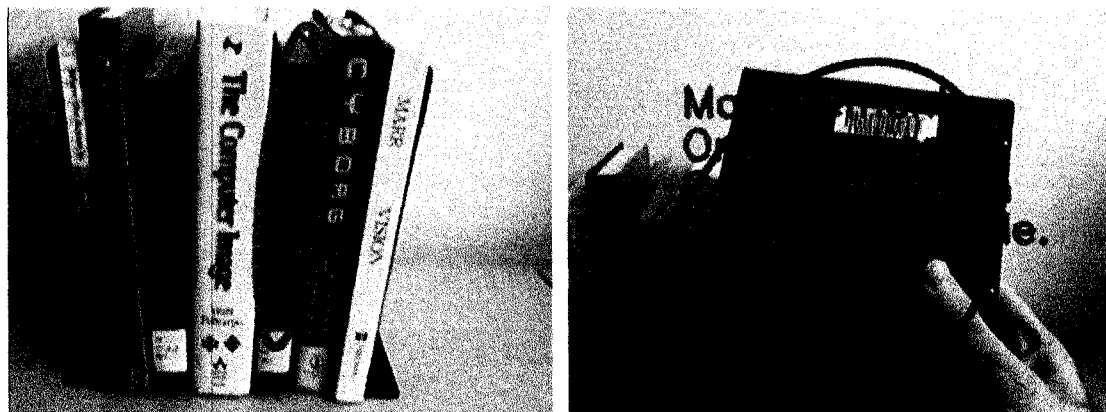


Figure 5.27 : Présentation d'indices pour guider la prise de décisions

La reconnaissance du geste de capture correspond pour sa part à la détection de pseudo-rectangles de couleur de peau dans les images capturées. Après avoir appliqué un détecteur d'arrêtes de Canny [9], nous segmentons les arrêtes détectées correspondant à des pixels de peau dans l'espace HSV (voir détails d'implémentation de la tâche 1) et nous dilatons les arrêtes retenues pour favoriser la continuité dans les segments détectés. Une carte des contours résultants (cf. Figure 5.28) est alors utilisée pour trouver les contours fermés et les polygones associés qui comportent quatre sommets, une aire non négligeable, des angles pseudo-droits ainsi qu'un rapport longueur/largeur supérieur à 1 (l'index étant toujours plus long que le pouce dans la morphologie humaine). Il s'agit alors simplement d'isoler et de sauvegarder la portion de l'image correspondant au pseudo-rectangle détecté (ou l'image au complet lorsqu'il est nécessaire d'obtenir le contexte du geste pour analyse subséquente). La Figure 5.29 montre un utilisateur effectuant un geste de capture reconnu par l'ordinateur porté.



Figure 5.28 : Contours assimilés à de la peau

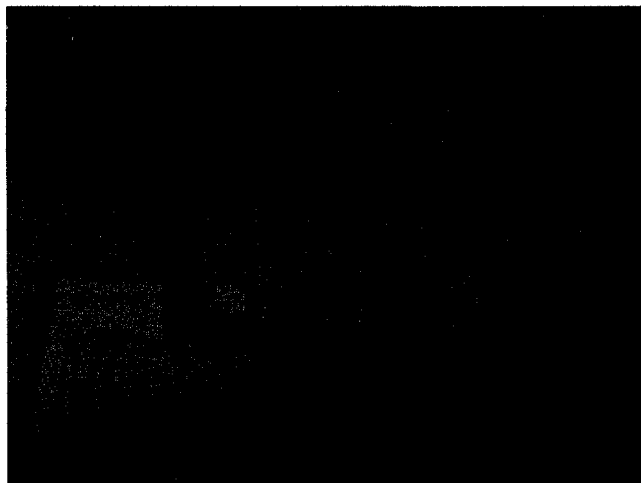


Figure 5.29 : Geste de capture permettant de sauvegarder une partie du champ visuel

5.3.4 Interface diffuse pour la tâche 3

Tout comme pour les autres tâches, la tâche réalisée à l'aide de l'ordinateur porté est identique à la tâche conventionnelle en termes de buts à accomplir. Il s'agit toujours d'obtenir les deux soldes demandés, de payer au complet la facture de la carte de crédit fictive, pour finalement redonner les deux nouveaux soldes. Les paramètres de la tâche (c.-à-d. les soldes) ainsi que la façon de réaliser la tâche vont ici encore différer. Ainsi,

en manipulant directement des objets liés à la tâche, l'utilisateur sera en mesure d'interagir avec l'ordinateur porté pour exposer l'information recherchée (les soldes) et effectuer les opérations demandées, sans avoir besoin de naviguer sur le site web traditionnel en utilisant un périphérique d'entrée standard. Le billet décrivant la mise en situation et les buts à accomplir pour réaliser la tâche avec l'ordinateur porté, tel que soumis aux participants de l'étude, est présenté à la Figure 5.30.

Tâche: Gestion bancaire (P)

Voici votre carte bancaire (carte marquée « Airmiles » pour les besoins de cette simulation) et votre carte de crédit Mastercard (carte marquée « Dividendes » pour les besoins de cette simulation).

Veillez :

- énoncer votre solde bancaire (compte chèques);
- énoncer votre solde de carte de crédit;
- payer au complet votre facture de carte de crédit grâce à votre compte chèque;
- énoncer votre nouveau solde bancaire;

Figure 5.30 : Billet de la tâche 3 avec l'ordinateur porté présenté aux participants

Associations entités – actions – fonctionnalités

Suite à l'analyse de la tâche conventionnelle, nous pouvons distinguer deux buts génériques qu'il est nécessaire de supporter : l'obtention du solde d'un compte et le transfert de fonds d'un compte à un autre pour le règlement d'une facture. Dans cette optique, les deux seuls artéfacts exploitables liés à la tâche, les deux cartes, peuvent être considérés comme une représentation physique du compte associé et donc, par extension, du solde courant de ce compte. Il s'agit ainsi, à l'aide de l'ordinateur porté, de

transformer ces cartes en conteneurs d'information virtuelle, en périphériques dédiés permettant aux utilisateurs d'accéder et de manipuler directement les soldes.

Pour le premier but, il est possible de mettre à contribution un comportement usuel des utilisateurs. Nous avons ainsi associé une carte (entité), le fait de placer cette dernière dans son champ de vision (action) et la requête du solde du compte principal lié à cette carte (fonctionnalité). Une telle association permet à l'utilisateur de faire implicitement la requête du solde simplement en observant une carte.

Pour le second but, le transfert de fonds, il s'agit de reconstruire la notion de transaction autour des artéfacts de la tâche. Nous désirons ainsi introduire une action explicite permettant d'effectuer une opération de transfert entre deux comptes, à partir des deux cartes représentant ces comptes. Une telle action doit bien entendu permettre à l'utilisateur de définir à la fois le compte de départ, celui de destination ainsi que le montant de la transaction. Elle doit également être conceptuellement simple pour l'utilisateur et être facilement exécutable par ce dernier. Une des premières formes d'interaction que nous avons investiguée est une forme de *drag & drop* (Figure 5.31) : à partir d'une carte, l'utilisateur peut littéralement tirer et déplacer des fonds vers l'autre carte. Nous avons cependant dû abandonner cette forme d'interaction car elle pose un problème au niveau du contrôle de la granularité de la transaction. De plus, elle requiert une surface plane pour déposer les cartes qui doivent se trouver dans le champ de vision de l'utilisateur pendant que ce dernier effectue un geste explicite du doigt entre elles. L'action explicite que nous avons préféré retenir pour effectuer le transfert de fonds fait plutôt appel à une manipulation conjointe des deux cartes et exploite la notion de flot

continu de fonds (par opposition à la quantité discrète spécifiée lors du transfert via le site web). Nous avons ainsi puisé dans la métaphore des verres d'eau pour permettre à l'utilisateur de réaliser le transfert demandé en « versant » naturellement des fonds d'une carte à l'autre, plus ou moins vite selon l'inclinaison du « récipient » le plus haut. Une telle association entités-actions-fonctionnalités (c.-à-d. cartes-verser-transfert) a l'avantage de se rattacher immédiatement à un concept préexistant déjà assimilé par l'utilisateur : il suffit pour ce dernier de placer et de manipuler de façon évocatrice les artefacts de la tâche dans son champ de vision pour accomplir de façon incrémentale le but recherché.

Nous pouvons constater que la tâche 3 a mené à une ré-ingénierie plus poussée de la tâche en fonction des artefacts exploitables, plus qu'une simple greffe sur ces derniers. L'interface diffuse conçue, même si elle ne fait intervenir que deux artefacts, nous permet également d'entrevoir les riches possibilités d'interactions du nouveau paradigme que nous mettons de l'avant.



Figure 5.31 : Illustration d'une interaction de type *drag & drop* pour le transfert

Structure des interactions

Le flot des interactions entre l'utilisateur, l'ordinateur porté et les artéfacts liés à la tâche (cartes) est résumé dans le diagramme de séquence ci-après (Figure 5.32). Nous pouvons constater que l'utilisateur interagit toujours avec l'ordinateur porté de façon indirecte, par l'intermédiaire de ces entités.

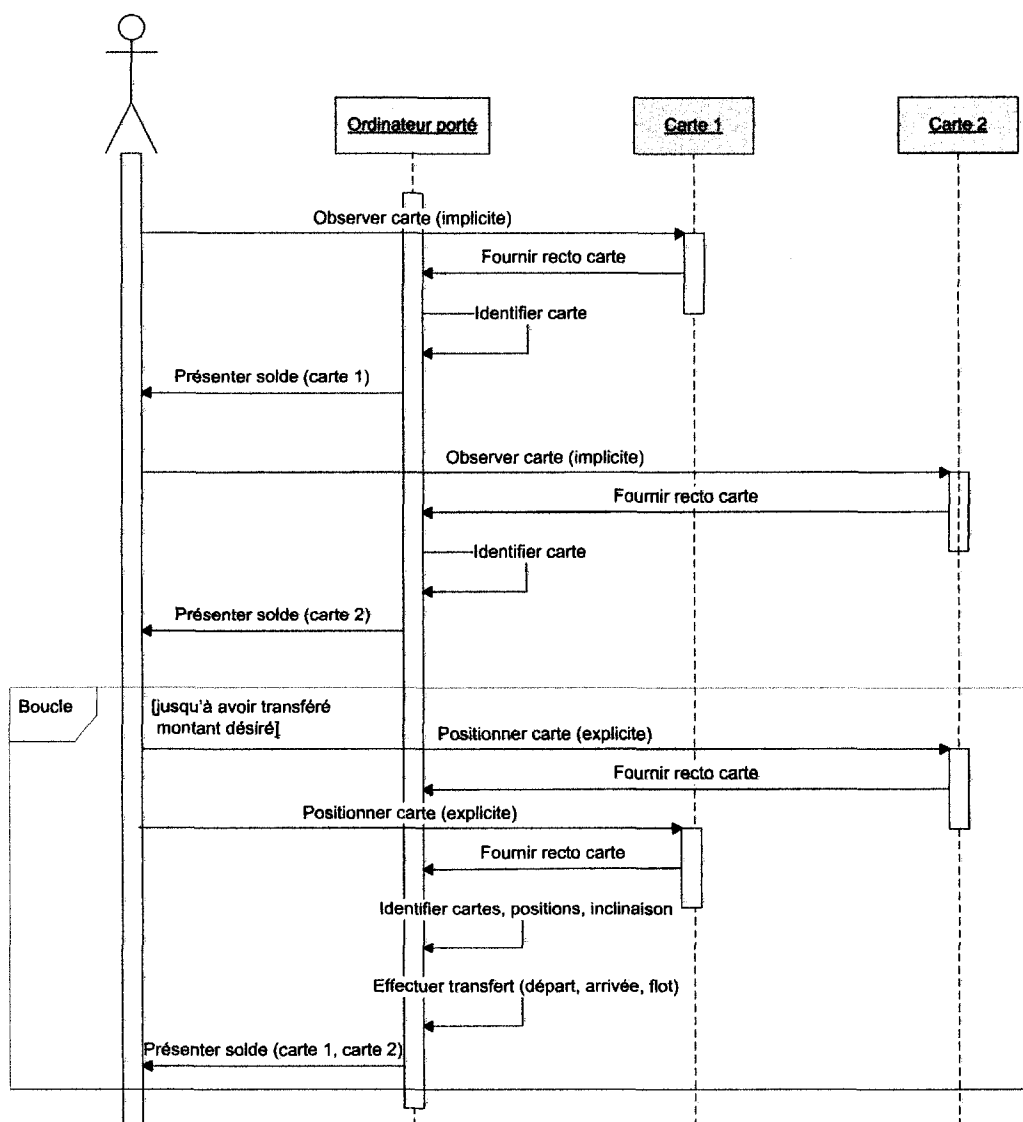


Figure 5.32 : Diagramme de séquence pour la tâche 3 avec l'ordinateur porté

Détails d'implémentation

Les interactions entre l'utilisateur et l'ordinateur porté reposent sur les cartes et la capacité de l'ordinateur porté à les détecter, à les reconnaître dans les images capturées et à quantifier leur position et leur orientation. La détection d'une carte dans une image est relativement simple. Elle est basée sur la couleur des cartes (segmentation des pixels de teinte bleue selon l'histogramme combiné des deux modèles de cartes; cf. détails d'implémentation de la tâche 2) et leur forme (quadrilatère dont le nombre de pixels 8-connectés dépasse un seuil fixé empiriquement à 1000 pixels et dont le rapport longueur/largeur tombe dans une fourchette allant de 1.2 à 1.9, le rapport physique étant de 1.574).

La reconnaissance d'une carte a en premier lieu été implémentée via le calcul de la corrélation croisée normalisée pour chacun des quadrilatères candidats re-projeté dans un rectangle de mêmes dimensions que le modèle utilisé. Pour le point de coordonnées (i,j) de l'image en tons de gris I représentant le quadrilatère re-projeté et un modèle T également en tons de gris, cette corrélation est donnée par l'équation :

$$C(i, j) = \frac{\sum_{x,y} (I(x, y) - \bar{I}(x, y))(T(x - i, y - j) - \bar{T})}{\sqrt{\sum_{x,y} (I(x, y) - \bar{I}(x, y))^2 \sum_{x,y} (T(x - i, y - j) - \bar{T})^2}}$$

Le quadrilatère candidat est assimilé à la carte dont le modèle donne la meilleure corrélation C . Cependant, nous avons constaté que cette technique n'est pas très robuste aux reflets (selon l'illumination, le fini glacé d'une carte entraîne parfois des changements brusques et drastiques dans son apparence lors de sa manipulation) et aux

variations de pose (spécifiquement à la rotation d'une carte en dehors du plan image). Elle requiert également assez de ressources en termes de temps de calcul pour le système porté. Nous avons donc développé, pour des conditions contrôlées de laboratoire, un classificateur rapide basé sur des caractéristiques plus globales. Pour un quadrilatère candidat donné, nous définissons un vecteur de mesures composé de la moyenne et l'écart-type des pixels pour chaque plan de couleur RGB (c.-à-d. six mesures au total dans le vecteur). Le candidat est alors classifié en utilisant la distance euclidienne minimale entre le vecteur de mesures et les vecteurs de référence des cartes (classificateur 1-NN). Afin de rejeter les candidats ne correspondant pas à une carte, cette distance est assujettie à un seuil maximal.

Une fois une carte identifiée dans le champ de vision de l'utilisateur, le solde actuel du compte associé peut aisément lui être superposé. Lorsque deux cartes sont identifiées dans l'image, le système détermine s'il y a une opération de versement en fonction de la position relative et de l'angle des deux cartes. Ainsi, un versement est initié lorsque l'angle dépasse le seuil d'activation du transfert et le flot s'accélère au fur et à mesure que cet angle augmente. Lorsque l'angle atteint le prochain seuil d'activation, le flot passe au palier de transfert supérieur (par multiple de dix). Par exemple, les trois premiers seuils d'activation ont été fixés empiriquement à 20, 30 et 45 degrés. Notons que pour que le transfert fonctionne, les deux cartes doivent être bien visibles et identifiables dans le champ de vision de la caméra et ne peuvent en aucun cas être superposées.

En ce qui a trait à l'application cliente (couche Application), son implémentation se limite à une modélisation de transactions bancaires simples et à une base de données contenant les soldes des comptes associés à chacune des cartes. La Figure 5.33 présente une opération de versement en cours d'exécution par un utilisateur.



Figure 5.33 : Opération de versement

CHAPITRE 6 : RÉSULTATS DE L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ET DISCUSSION

Ce chapitre présente les mesures recueillies et les résultats obtenus lors de nos séances expérimentales. Nous justifions en premier lieu les choix faits dans la présentation des résultats et leur analyse. Puis, pour chacune des trois tâches, et les deux façons de les réaliser, nous présentons les statistiques descriptives des mesures quantitatives et qualitatives récoltées, les observations recueillies, les courbes d'apprentissage ainsi qu'une analyse des résultats inférentiels. Finalement, nous discutons des résultats obtenus à la lumière des caractéristiques intrinsèques des tâches et des interfaces diffuses utilisées pour les supporter.

6.1 Notes préliminaires

6.1.1 Échelles de Likert

L'utilisation d'échelles de Likert [38] est très répandue pour le recueil de mesures subjectives lors d'études impliquant des sujets humains. Il est possible d'analyser individuellement les réponses à chaque énoncé de Likert ou d'analyser les mesures

composites générées à partir de ces énoncés (c.-à-d. échelles de Likert). Même si toutes ces mesures sont techniquement des mesures ordinales, elles sont très souvent traitées en pratique comme des mesures intervalles (particulièrement lorsque cinq catégories ou plus sont utilisées) et analysées comme telles à l'aide de techniques paramétriques issues de la théorie normale.

Statistiques descriptives

Pour les statistiques descriptives des réponses aux énoncés de Likert, nous rapportons à titre indicatif la moyenne et l'écart-type. Il n'est pas tout à fait approprié de procéder ainsi (pour des variables ordinales, nous devrions uniquement nous fier à la médiane et aux étendues inter-quartiles) mais, étant donné la symétrie de l'échelle à cinq catégories utilisée, et en supposant que les répondants perçoivent les niveaux adjacents de l'échelle comme étant approximativement équidistants (ils ont été choisis et visuellement présentés précisément pour ce faire), la moyenne et l'écart-type résument intuitivement la distribution des réponses du groupe de participants. La moyenne approxime en effet l'opinion du groupe. L'écart-type (σ) indique quant à lui s'il y a consistance, inconsistance sans polarisation, ou inconsistance avec polarisation des réponses pour un énoncé en particulier. Pour une échelle conventionnelle à cinq catégories, un $\sigma \leq 1$ reflète une consistance dans les réponses, un $\sigma > 1$ reflète une inconsistance et un σ approchant 2 indique une polarisation des réponses.

Quant aux statistiques descriptives des mesures composites, il est raisonnable de les traiter comme des données intervalles et de présenter la moyenne et l'écart-type, puisqu'il s'agit de construits basés sur des moyennes.

Statistiques inférentielles

Lors de l'analyse des réponses individuelles, nous traitons ces variables comme étant ordinales et nous utilisons des techniques non paramétriques traditionnels (test des rangs signés de Wilcoxon, test de Friedman, etc.) afin de rester conservateurs.

Lors de l'analyse des mesures composites, nous traitons ces variables comme étant intervalles et continues. Généralement, pour la plupart des tests statistiques, des écarts sévères (avec le postulat de données intervalles) ne semblent pas affecter dramatiquement [29] les erreurs de type I (faux positif) et de type II (faux négatif). Lorsque l'échelle utilisée comporte cinq catégories ou plus, les mesures composites peuvent aussi être traitées de façon paramétrique sans se soucier excessivement des transgressions de l'hypothèse de normalité [30, 90], les techniques statistiques utilisées (test t de Student, ANOVA, etc.) étant relativement robustes lorsque utilisées avec des distributions au moins en forme de monticule (*mound-shaped*). Cependant, afin de rester conservateurs, et même si le théorème de la limite centrale s'applique (et, avec une échelle de Likert de un à cinq, même pour un petit échantillon), nous ne supposons pas que les mesures composites suivent une distribution normale. Nous choisirons ainsi les techniques statistiques appropriées selon les preuves significatives obtenues pour ou contre la normalité.

6.1.2 Validité des mesures composites

Les mesures composites, et les énoncés de Likert en découlant, ont directement été créés à partir des concepts à quantifier : utilité, efficacité, efficience, satisfaction, utilisabilité générale de l'interface, facilité d'apprentissage et acceptabilité de la technologie. Ces mesures composites sont ainsi essentiellement unidimensionnelles par définition. Afin de valider les construits utilisés, nous avons calculé le coefficient α de Cronbach [13] pour chacune des mesures composites (Tableau 6.1). Ce coefficient reflète la consistance interne du construit. Il indique si les réponses des sujets aux énoncés de Likert qui composent les mesures sont fortement corrélées entre elles ou pas : plus les réponses intra-sujets sont consistantes, et plus la variabilité inter-sujets est grande dans l'échantillon, plus le α est élevé.

Tableau 6.1 : Coefficient α de Cronbach des mesures composites

Mesure	Nombre de composantes	α de Cronbach (tâche 1)	α de Cronbach (tâche 2)	α de Cronbach (tâche 3)
Utilité	4	0.800	0.749	0.744
Efficacité	2	0.817	0.769	0.723
Efficience	5	0.728	0.654	0.774
Satisfaction	4	0.877	0.779	0.778
Utilisabilité	4	0.868	0.774	0.749
Facilité d'apprentissage	5	0.734	0.847	0.846
Acceptabilité de la technologie	5	0.771 (α global)		


Un α entre 0.7 et 0.8 est habituellement considéré adéquat, tandis qu'un α supérieur à 0.8 est considéré comme excellent [53]. Un α supérieur à 0.6 est quant à lui considéré acceptable pour des besoins exploratoires. Sauf une exception, nos α de Cronbach sont tous largement supérieurs à 0.7, et ce au travers des trois tâches (Tableau 6.2).

Tableau 6.2 : Répartition des α de Cronbach calculés

Classification	Nombre	Pourcentage
$\alpha \geq 0.8$	6	32%
$0.7 \geq \alpha > 0.8$	12	63%
$0.6 \geq \alpha > 0.7$	1	5%
Total	19	100%

6.1.3 Significativité statistique

Dans cette thèse, le seuil de significativité statistique α utilisé est le seuil usuel établi à 5% (c.-à-d. $\alpha=0.05$). Ainsi, si un niveau de probabilité p est inférieur à ce seuil (c.-à-d. $p < 0.05$), nous pouvons conclure que le résultat obtenu est statistiquement significatif et rejeter l'hypothèse nulle. Plus p est petit, plus le résultat obtenu est significatif. Ainsi, si $p \leq 0.01$, nous pouvons conclure que le résultat obtenu est très significatif. Finalement, si $p \leq 0.001$, alors le résultat obtenu est hautement significatif.

Afin d'aider à la lecture des tableaux de ce chapitre, les lignes comportant des résultats statistiquement significatifs sont mises en évidence sur fond de cette couleur : .

6.2 Résultats pour la tâche 1 : Gestion d'horaire

6.2.1 Mesures objectives

Les statistiques descriptives pour le temps d'exécution et le nombre d'erreurs, à la fois pour la tâche 1 réalisée de manière conventionnelle et à l'aide de l'ordinateur porté, sont respectivement présentées dans le Tableau 6.3 et le Tableau 6.4.

Tableau 6.3 : Temps d'exécution en secondes pour la tâche 1

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
[T1] Temps d'exécution (conventionnelle)	25	291	87.83	64.011
[T1] Temps d'exécution (avec ordinateur porté)	14	117	42.43	21.244

Tableau 6.4 : Nombre d'erreurs pour la tâche 1

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
[T1] Erreurs commises (conventionnelle)	0	4	0.67	0.994
[T1] Erreurs commises (avec ordinateur porté)	0	2	0.33	0.547

6.2.2 Mesures subjectives

Le Tableau 6.5 résume pour la tâche 1 la distribution des réponses aux énoncés de Likert (recueillies via le questionnaire rempli par les 30 participants), ainsi que leur médiane, leur moyenne et leur écart-type.

Tableau 6.5 : Réponses aux énoncés de Likert pour la tâche 1

	Distribution des réponses (de 1=fortement en désaccord à 5=fortement d'accord)					Statistiques		
	1	2	3	4	5	Méd.	Moy.	Éc. type
[T1Q7] Il a été facile de réaliser la tâche de façon conventionnelle						5.00	4.17	1.117
	1 (3.3%)	2 (6.7%)	4 (13.3%)	7 (23.3%)	16 (53.3%)			

Tableau 6.5 : Réponses aux énoncés de Likert pour la tâche 1 (suite)

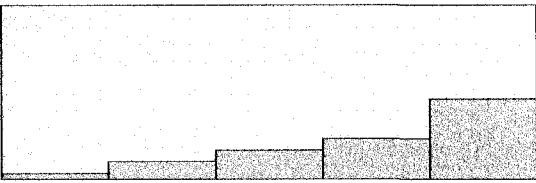
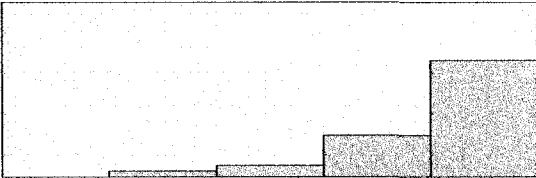
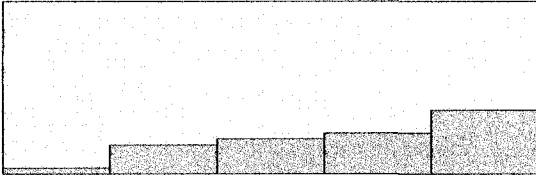
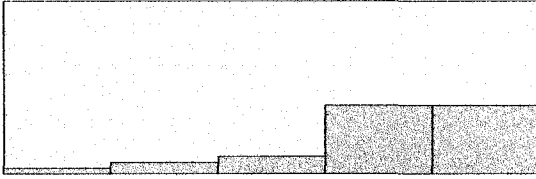
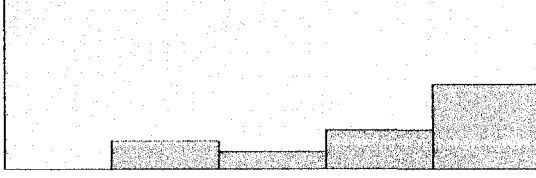
[T1Q8] Il a été facile de réaliser la tâche avec l'interface diffuse	 <p>1 (3.3%) 3 (10.0%) 5 (16.7%) 7 (23.3%) 14 (46.7%)</p>	4.00	4.00	1.174
[T1Q9] Le fonctionnement de l'interface diffuse a été facile à apprendre	 <p>0 (0.0%) 1 (3.3%) 2 (6.7%) 7 (23.3%) 20 (66.7%)</p>	5.00	4.53	0.776
[T1Q10] L'interface diffuse est utile	 <p>1 (3.3%) 5 (16.7%) 6 (20.0%) 7 (23.3%) 11 (36.7%)</p>	4.00	3.73	1.230
[T1Q11] L'interface diffuse est efficace (c.-à-d. permet de réaliser adéquatement la tâche)	 <p>1 (3.3%) 2 (6.7%) 3 (10.0%) 12 (40.0%) 12 (40.0%)</p>	4.00	4.07	1.048
[T1Q12] L'interface diffuse est efficiente (c.-à-d. permet de réaliser adéquatement la tâche avec un minimum d'effort)	 <p>0 (0.0%) 5 (16.7%) 3 (10.0%) 7 (23.3%) 15 (50.0%)</p>	4.50	4.07	1.143

Tableau 6.5 : Réponses aux énoncés de Likert pour la tâche 1 (suite)

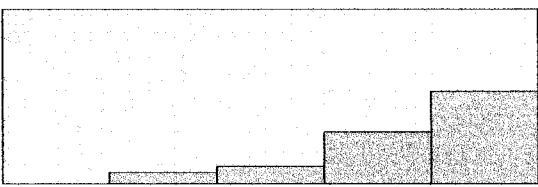
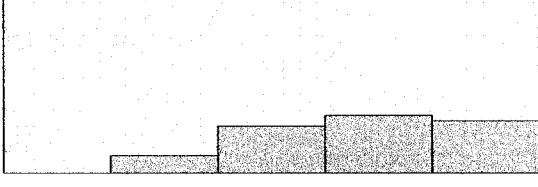
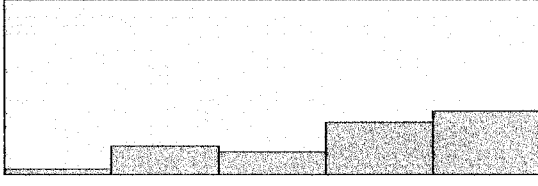
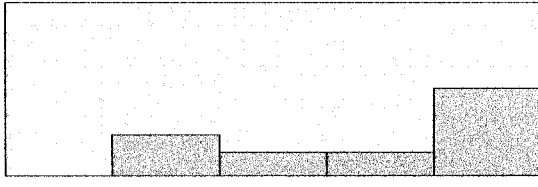
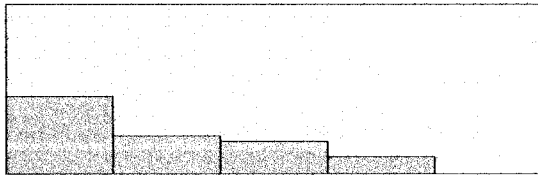
[T1Q13] L'interface diffuse est rapide	 <p>0 (0.0%) 2 (6.7%) 3 (10.0%) 9 (30.0%) 16 (53.3%)</p>	5.00	4.30	0.915
[T1Q14] L'interface diffuse est plaisante	 <p>0 (0.0%) 3 (10.0%) 8 (26.7%) 10 (33.3%) 9 (30.0%)</p>	4.00	3.83	0.986
[T1Q15] L'interface diffuse répond à mes attentes	 <p>1 (3.3%) 5 (16.7%) 4 (13.3%) 9 (30.0%) 11 (36.7%)</p>	4.00	3.80	1.215
[T1Q16] Il a été plus rapide de réaliser la tâche avec l'interface diffuse que de façon conventionnelle	 <p>0 (0.0%) 7 (23.3%) 4 (13.3%) 4 (13.3%) 15 (50.0%)</p>	4.50	3.90	1.269
[T1Q17] L'effort physique requis pour interagir avec l'interface diffuse est important	 <p>14 (46.7%) 7 (23.3%) 6 (20.0%) 3 (10.0%) 0 (0.0%)</p>	2.00	1.93	1.048

Tableau 6.5 : Réponses aux énoncés de Likert pour la tâche 1 (suite)

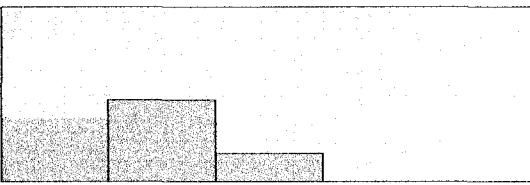
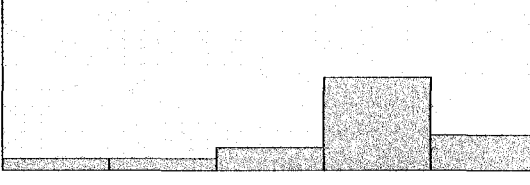
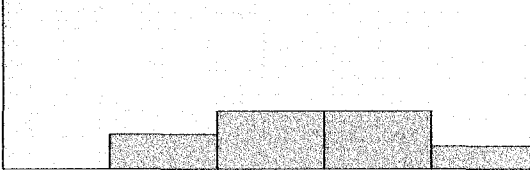
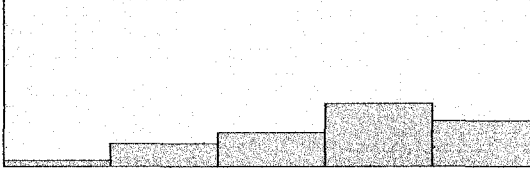
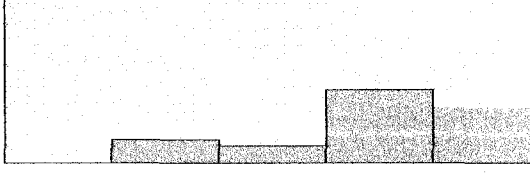
[T1Q18] L'effort mental requis pour interagir avec l'interface diffuse est important	 <p>11 (36.7%) 14 (46.7%) 5 (16.7%) 0 (0.0%) 0 (0.0%)</p>	2.00	1.80	0.714
[T1Q19] Globalement, la réalisation de la tâche à l'aide de l'ordinateur porté a demandé moins d'effort que celle de la tâche conventionnelle	 <p>2 (6.7%) 2 (6.7%) 4 (13.3%) 16 (53.3%) 6 (20.0%)</p>	4.00	3.73	1.081
[T1Q20] L'utilisation de l'ordinateur porté via l'interface diffuse est transparente	 <p>0 (0.0%) 6 (20.0%) 10 (33.3%) 10 (33.3%) 4 (13.3%)</p>	3.00	3.40	0.968
[T1Q21] Je suis satisfait de ma performance lors de la tâche conventionnelle	 <p>1 (3.3%) 4 (13.3%) 6 (20.0%) 11 (36.7%) 8 (26.7%)</p>	4.00	3.70	1.119
[T1Q22] Je suis satisfait de ma performance lors de la tâche avec l'interface diffuse	 <p>0 (0.0%) 4 (13.3%) 3 (10.0%) 13 (43.3%) 10 (33.3%)</p>	4.00	3.97	0.999

Tableau 6.5 : Réponses aux énoncés de Likert pour la tâche 1 (suite)

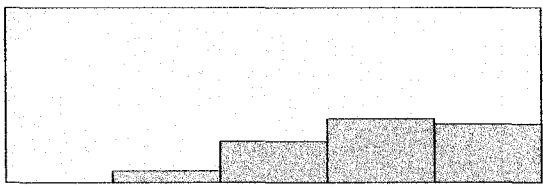
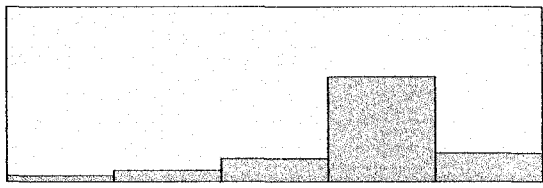
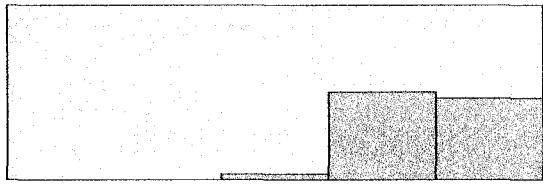
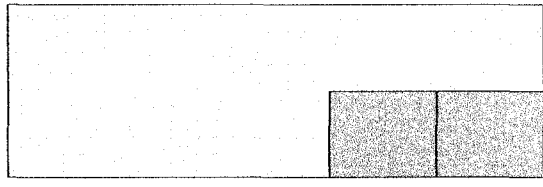
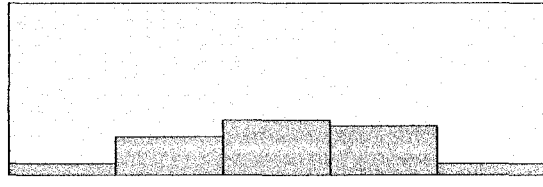
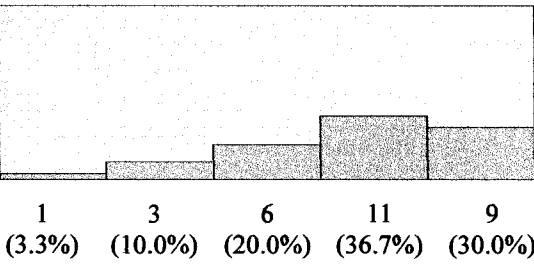
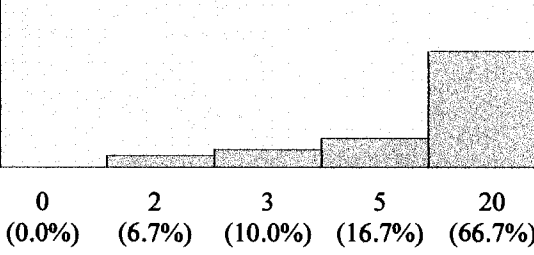
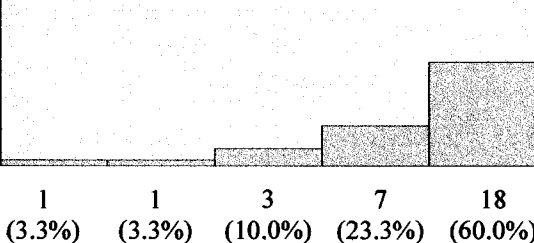
[T1Q23] Les associations entité-action-fonctionnalité de l'interface diffuse sont cohérentes	 <p>0 (0.0%) 2 (6.7%) 7 (23.3%) 11 (36.7%) 10 (33.3%)</p>	4.00	3.97	0.928
[T1Q24] Les associations entité-action-fonctionnalité de l'interface diffuse sont intuitives	 <p>1 (3.3%) 2 (6.7%) 4 (13.3%) 18 (60.0%) 5 (16.7%)</p>	4.00	3.80	0.925
[T1Q25] Lors de l'utilisation de l'ordinateur porté, l'information présentée est utile à la tâche	 <p>0 (0.0%) 0 (0.0%) 1 (3.3%) 15 (50.0%) 14 (46.7%)</p>	4.00	4.43	0.568
[T1Q26] Lors de l'utilisation de l'ordinateur porté, l'information présentée est concise	 <p>0 (0.0%) 0 (0.0%) 0 (0.0%) 15 (50.0%) 15 (50.0%)</p>	4.50	4.50	0.509
[T1Q27] J'aurais pu facilement deviner le fonctionnement de l'interface diffuse d'après les entités utilisées pour la tâche	 <p>2 (6.7%) 7 (23.3%) 10 (33.3%) 9 (30.0%) 2 (6.7%)</p>	3.00	3.07	1.048

Tableau 6.5 : Réponses aux énoncés de Likert pour la tâche 1 (suite et fin)

[T1Q28] J'aurais pu facilement découvrir le fonctionnement de l'interface diffuse par essais-erreurs, en manipulant les entités utilisées pour la tâche	 <p>1 (3.3%) 3 (10.0%) 6 (20.0%) 11 (36.7%) 9 (30.0%)</p>	4.00	3.80	1.095
[T1Q29] Avec de l'entraînement, l'interface diffuse me permettrait de réaliser la tâche plus rapidement que de façon conventionnelle	 <p>0 (0.0%) 2 (6.7%) 3 (10.0%) 5 (16.7%) 20 (66.7%)</p>	5.00	4.43	0.935
[T1Q30] Avec de l'entraînement, l'interface diffuse me permettrait de réaliser la tâche avec moins d'effort que de façon conventionnelle	 <p>1 (3.3%) 1 (3.3%) 3 (10.0%) 7 (23.3%) 18 (60.0%)</p>	5.00	4.33	1.028

Les mesures composites (échelles de Likert) caractérisant l'interface diffuse pour la tâche 1 sont résumées dans le Tableau 6.6.

Tableau 6.6 : Mesures composites caractérisant l'interface diffuse pour la tâche 1

	Min.	Max.	Moy.	Écart-type	Asymétrie (a)	Aplatissement (b)
[T1] Utilité	2.25	5.00	3.95	0.849	-0.579	-0.781
[T1] Efficacité	2.00	5.00	4.18	0.905	-1.190	0.610
[T1] Efficience	2.80	5.00	4.05	0.627	-0.080	-1.043
[T1] Satisfaction	2.25	5.00	3.90	0.939	-0.489	-1.335
[T1] Utilisabilité	2.38	4.95	4.02	0.710	-0.640	-0.560
[T1] Facilité d'apprentissage	2.20	5.00	3.83	0.669	-0.660	0.071

a) Erreur std. asymétrie = 0.427

b) Erreur std. aplatissement = 0.833

Les tableaux ci-dessous (Tableau 6.7, Tableau 6.8 et Tableau 6.9) résument les charges physique et mentale ressenties ainsi que l'effort déployé par les participants lors de la tâche 1, à la fois réalisée de façon conventionnelle et à l'aide de l'ordinateur porté.

Tableau 6.7 : Charge physique en pourcentage pour la tâche 1

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
[T1] Charge physique moyenne (conventionnelle)	0.00	96.08	26.73	24.46
[T1] Charge physique moyenne (avec ordinateur porté)	0.00	76.47	27.50	21.66

Tableau 6.8 : Charge mentale en pourcentage pour la tâche 1

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
[T1] Charge mentale moyenne (conventionnelle)	9.80	99.02	55.44	24.61
[T1] Charge mentale moyenne (avec ordinateur porté)	1.96	91.18	39.78	24.97

Tableau 6.9 : Effort moyen déployé en pourcentage pour la tâche 1

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
[T1] Effort moyen déployé (conventionnelle)	1.96	100.00	45.96	25.70
[T1] Effort moyen déployé (avec ordinateur porté)	1.96	100.00	32.89	23.85

6.2.3 Observations

Lors de la réalisation de la tâche (à la fois de façon conventionnelle et avec l'ordinateur porté), nous avons observé qu'une minorité de sujets (5) commencent par explorer plus longuement les deux côtés de l'horaire fourni (et en particulier la carte du trajet au verso) au lieu de se concentrer directement sur le recto qui présente la table des heures de passage. Ce comportement, que nous n'avions pas anticipé, a très probablement résulté en quelques temps d'exécution plus élevés dans nos mesures. Nous avons également remarqué que plus de 85% des sujets (26) utilisent instinctivement leur index pour trouver l'intersection appropriée (descente systématique du doigt dans la section appropriée de la table des heures de passage une fois que cette section a été identifiée) et pour ensuite suivre la ligne correspondante afin de trouver l'information demandée. Cette façon de procéder confirme le modèle de la tâche présenté dans le chapitre précédent (section 4.2.1).

Lors de l'utilisation de l'ordinateur porté, nous avons constaté que plusieurs sujets (4) n'arrivaient pas à bien discerner l'heure de passage présentée à travers le système d'affichage tête haute. Il semblerait que, pour ces sujets, un phénomène d'interférence oculaire se soit manifesté étant donné la nature de l'arrière-plan sur lequel les informations sont présentées (c.-à-d. la table des horaires). En effet, un arrière plan comportant de nombreux motifs ou beaucoup de texte (c.-à-d. des hautes fréquences) vient interférer avec le processus de perception de l'information présentée. Finalement, nous avons remarqué que, avec l'ordinateur porté, deux sujets semblaient réticents à

s'investir dans la tâche et à manipuler ou descendre du doigt la table des heures de passage.

6.2.4 Courbes d'apprentissage

La Figure 6.1 présente, pour la tâche 1 réalisée à la fois de façon conventionnelle et à l'aide de l'ordinateur porté, les courbes d'apprentissage obtenues par régression à partir de l'équation introduite à la section 4.5.3. Les modèles obtenus (Tableau 6.10) sont statistiquement significatifs ($p < 0.001$) et expliquent respectivement, pour la tâche réalisée de façon conventionnelle et à l'aide de l'ordinateur porté, 48.7% et 60.1% de la variance observée dans les mesures.

Tableau 6.10 : Modèle d'apprentissage pour la tâche 1

Tâche	Résumé du modèle					Estimé des paramètres	
	R ²	F	DOF1	DOF2	p	T ₁ (s)	α
Conventionnelle	0.487	45.507	1	48	0.000	67.248	0.853
Avec ordinateur porté	0.601	72.326	1	48	0.000	37.730	0.775

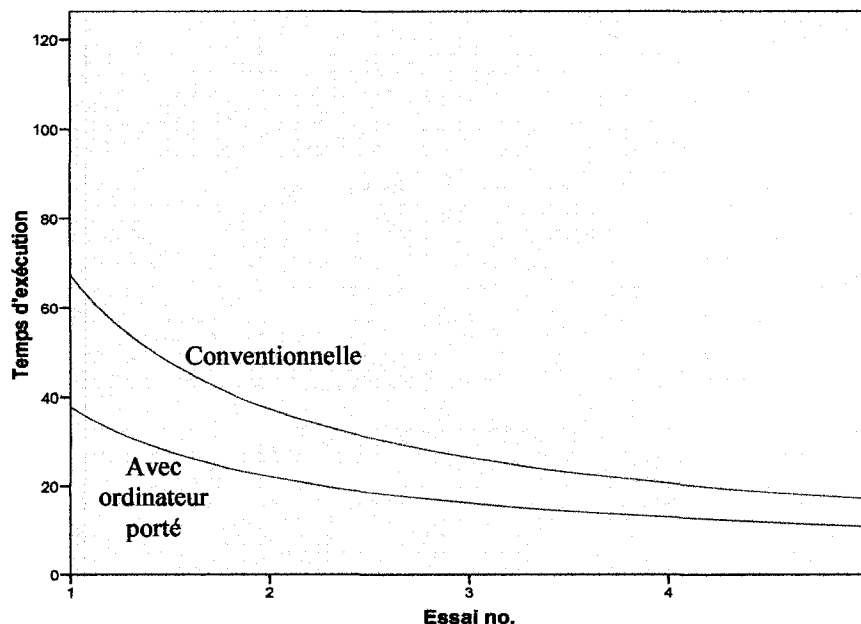


Figure 6.1 : Approximation des courbes d'apprentissage pour la tâche 1

6.2.5 Analyse inférentielle

Avant d'effectuer des tests pairés pour comparer la tâche 1 réalisée de façon conventionnelle et à l'aide de l'ordinateur porté, il est important de déterminer si les différences pairées analysées (cf. Tableau 6.11) suivent une distribution normale ou non. Puisque plusieurs distributions des différences ne semblent pas normales, et ce pour les trois tâches (voir section 6.3.5 et section 6.4.5 pour les autres tâches), nous ne pouvons pas utiliser de tests paramétriques supposant la normalité et nous devons à la place utiliser des tests non-paramétriques. En effet, pour la tâche 1, de nombreux coefficients d'aplatissement (*kurtosis*) et coefficients d'asymétrie (*skewness*) sont trop éloignés de la normale. De plus, plusieurs tests de normalité de Shapiro-Wilk (cf. Tableau 6.12)

donnent des résultats significatifs (c.-à-d. $p < 0.05$) nous amenant à rejeter l'hypothèse nulle d'une distribution normale.

Les résultats des tests bilatéraux (*two-tailed*) des rangs signés de Wilcoxon pour les échantillons pairés sont présentés dans le Tableau 6.13.

Tableau 6.11 : Caractéristiques des différences analysées pour la tâche 1

	Min.	Max.	Moy.	Écart-type	Asymétrie (a)	Aplatissement (b)
[T1] Diff. temps d'exécution (conventionnelle - avec ordinateur porté)	-63.00	212.00	45.40	58.57	1.392	2.903
[T1] Diff. nombre d'erreurs (conventionnelle - avec ordinateur porté)	-2.00	3.00	0.33	1.03	0.483	0.996
[T1] Diff. facilité de réalisation ([T1Q7] conventionnelle - [T1Q8] avec ordinateur porté)	-4.00	4.00	0.17	1.58	-0.294	1.497
[T1] Diff. satisfaction de la performance ([T1Q21] conventionnelle - [T1Q22] avec ordinateur porté)	-3.00	3.00	-0.27	1.41	0.273	0.215
[T1] Diff. charge mentale ressentie (conventionnelle - avec ordinateur porté)	-30.00	88.24	15.66	28.94	0.764	0.530
[T1] Diff. charge physique ressentie (conventionnelle - avec ordinateur porté)	-50.00	91.18	-0.77	24.64	1.491	6.340
[T1] Diff. effort moyen déployé (conventionnelle - avec ordinateur porté)	-15.00	46.08	13.07	17.91	0.436	-0.885

a) Erreur std. asymétrie = 0.427

b) Erreur std. aplatissement = 0.833

Tableau 6.12 : Tests de normalité sur les différences paires pour la tâche 1

	Shapiro-Wilk		
	W	DOF	p
[T1] Diff. temps d'exécution (conventionnelle - avec ordinateur porté)	0.876	30	0.002
[T1] Diff. nombre d'erreurs (conventionnelle - avec ordinateur porté)	0.880	30	0.003
[T1] Diff. facilité de réalisation ([T1Q7] conventionnelle - [T1Q8] avec ordinateur porté)	0.919	30	0.026
[T1] Diff. satisfaction de la performance ([T1Q21] conventionnelle - [T1Q22] avec ordinateur porté)	0.937	30	0.073
[T1] Diff. charge mentale ressentie (conventionnelle - avec ordinateur porté)	0.948	30	0.147
[T1] Diff. charge physique ressentie (conventionnelle - avec ordinateur porté)	0.839	30	0.000
[T1] Diff. effort moyen déployé (conventionnelle - avec ordinateur porté)	0.937	30	0.074

Tableau 6.13 : Tests des rangs signés de Wilcoxon pour la tâche 1

	Wilcoxon	
	T	p
[T1] Temps d'exécution (conventionnelle) - [T1] Temps d'exécution (avec ordinateur porté)	-3.980(a)	0.000
[T1] Erreurs commises (conventionnelle) - [T1] Erreurs commises (avec ordinateur porté)	-1.687(a)	0.117
[T1Q7] Il a été facile de réaliser la tâche de façon conventionnelle - [T1Q8] Il a été facile de réaliser la tâche avec l'interface diffuse	-0.746(a)	0.471
[T1Q21] Je suis satisfait de ma performance lors de la tâche conventionnelle - [T1Q22] Je suis satisfait de ma performance lors de la tâche avec l'interface diffuse	-0.949(b)	0.359
[T1] Charge mentale moyenne (conventionnelle) - [T1] Charge mentale moyenne (avec ordinateur porté)	-2.692(a)	0.006
[T1] Charge physique moyenne (conventionnelle) - [T1] Charge physique moyenne (avec ordinateur porté)	-0.762(b)	0.456
[T1] Effort moyen déployé (conventionnelle) - [T1] Effort moyen déployé (avec ordinateur porté)	-3.280(a)	0.001

a) Basé sur les rangs négatifs.

b) Basé sur les rangs positifs.

Ces tests révèlent notamment :

- une différence statistique hautement significative entre les distributions sous-jacentes du temps d'exécution ($T=-3.980$, $p<0.001$) pour la tâche conventionnelle versus la tâche avec l'ordinateur porté;
- une différence statistique très significative entre les distributions sous-jacentes de la charge mentale moyenne ressentie par les participants ($T=-2.692$, $p=0.006$) pour la tâche conventionnelle versus la tâche avec l'ordinateur porté;
- une différence statistique hautement significative entre les distributions sous-jacentes de l'effort moyen déployé par les participants ($T=-3.280$, $p=0.001$) pour la tâche conventionnelle versus la tâche avec l'ordinateur porté;

Nous rejetons ainsi l'hypothèse nulle (c.-à-d. la différence médiane entre les paires de mesures / d'observations est zéro) pour ces trois tests et nous en concluons que, pour la tâche 1, l'utilisation de l'ordinateur porté doté d'une interface diffuse améliore significativement le temps d'exécution de la tâche, comparé à cette tâche réalisée de façon conventionnelle (cf. Tableau 6.14), et diminue significativement la charge mentale moyenne ressentie par les participants ainsi que l'effort moyen qu'ils doivent fournir pour réaliser cette tâche.

Tableau 6.14 : Résumé des variations statistiquement significatives lors de l'utilisation de l'ordinateur porté pour la tâche 1

	Variation par rapport à la tâche conventionnelle (estimé à partir des moyennes)
Temps d'exécution	Réduction d'environ 52%
Charge mentale moyenne ressentie	Réduction d'environ 28%
Effort moyen déployé	Réduction d'environ 28%

6.3 Résultats pour la tâche 2 : Recherche bibliographique

6.3.1 Mesures objectives

Les statistiques descriptives pour le temps d'exécution et le nombre d'erreurs, à la fois pour la tâche 2 réalisée de manière conventionnelle et à l'aide de l'ordinateur porté, sont respectivement présentées dans le Tableau 6.15 et le Tableau 6.16. Tel qu'expliqué à la section 4.5, les erreurs ont été comptabilisées en deux parties.

Tableau 6.15 : Temps d'exécution en secondes pour la tâche 2

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
[T2] Temps d'exécution (conventionnelle)	49	320	120.70	54.515
[T2] Temps d'exécution (avec ordinateur porté)	45	223	112.53	51.665

Tableau 6.16 : Nombre d'erreurs pour la tâche 2

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
[T2] Erreurs commises (conventionnelle) - partie 1	0	2	0.30	0.596
[T2] Erreurs commises (conventionnelle) - partie 2	0	1	0.23	0.430
[T2] Erreurs commises (avec ordinateur porté) - partie 1	0	1	0.20	0.407
[T2] Erreurs commises (avec ordinateur porté) - partie 2	0	4	1.27	1.337

Les statistiques descriptives pour la précision du geste de capture lors de l'utilisation de l'ordinateur porté (cf. section 4.5) sont présentées dans le Tableau 6.17.

Tableau 6.17 : Précision du geste de capture pour la tâche 2

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
[T2] Précision du geste de capture (en pixels ⁻¹)	0.18	2.82	1.39	0.506

6.3.2 Mesures subjectives

Le Tableau 6.18 résume pour la tâche 2 la distribution des réponses aux énoncés de Likert (recueillies via le questionnaire rempli par les 30 participants), ainsi que leur médiane, leur moyenne et leur écart-type.

Tableau 6.18 : Réponses aux énoncés de Likert pour la tâche 2

	Distribution des réponses (de 1=fortement en désaccord à 5=fortement d'accord)					Statistiques		
	1	2	3	4	5	Méd.	Moy.	Éc. type
[T2Q7] Il a été facile de réaliser la tâche de façon conventionnelle	<p>0 (0.0%) 3 (10.0%) 8 (26.7%) 10 (33.3%) 9 (30.0%)</p>					4.00	3.83	0.986
[T2Q8] Il a été facile de réaliser la tâche avec l'interface diffuse	<p>0 (0.0%) 2 (6.7%) 4 (13.3%) 15 (50.0%) 9 (30.0%)</p>					4.00	4.03	0.850
[T2Q9] Le fonctionnement de l'interface diffuse a été facile à apprendre	<p>0 (0.0%) 1 (3.3%) 5 (16.7%) 11 (36.7%) 13 (43.3%)</p>					4.00	4.20	0.847
[T2Q10] L'interface diffuse est utile	<p>0 (0.0%) 3 (10.0%) 4 (13.3%) 14 (46.7%) 9 (30.0%)</p>					4.00	3.97	0.928

Tableau 6.18 : Réponses aux énoncés de Likert pour la tâche 2 (suite)

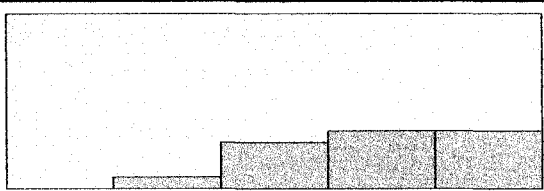
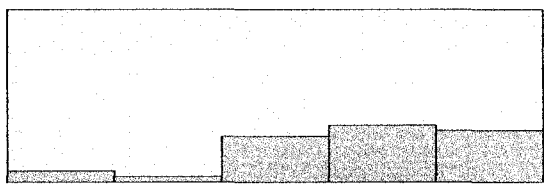
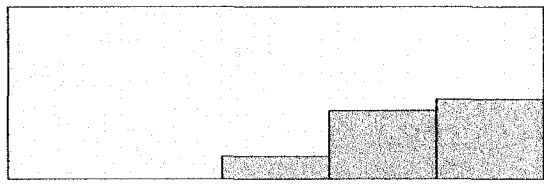
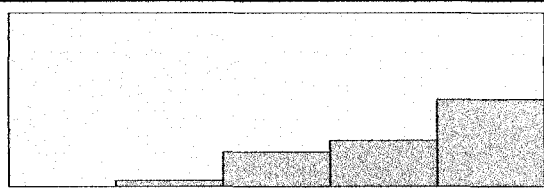
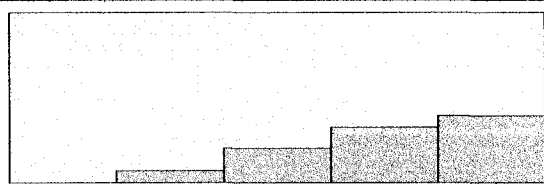
[T2Q11] L'interface diffuse est efficace (c.-à-d. permet de réaliser adéquatement la tâche)	 <p>0 (0.0%) 2 (6.7%) 8 (26.7%) 10 (33.3%) 10 (33.3%)</p>	4.00	3.93	0.944
[T2Q12] L'interface diffuse est efficiente (c.-à-d. permet de réaliser adéquatement la tâche avec un minimum d'effort)	 <p>2 (6.7%) 1 (3.3%) 8 (26.7%) 10 (33.3%) 9 (30.0%)</p>	4.00	3.77	1.135
[T2Q13] L'interface diffuse est rapide	 <p>0 (0.0%) 0 (0.0%) 4 (13.3%) 12 (40.0%) 14 (46.7%)</p>	4.00	4.33	0.711
[T2Q14] L'interface diffuse est plaisante	 <p>0 (0.0%) 1 (3.3%) 6 (20.0%) 8 (26.7%) 15 (50.0%)</p>	4.50	4.23	0.898
[T2Q15] L'interface diffuse répond à mes attentes	 <p>0 (0.0%) 2 (6.7%) 6 (20.0%) 10 (33.3%) 12 (40.0%)</p>	4.00	4.07	0.944

Tableau 6.18 : Réponses aux énoncés de Likert pour la tâche 2 (suite)

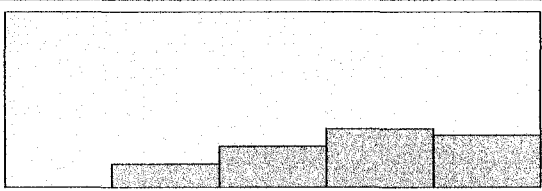
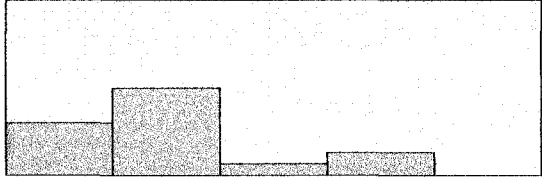
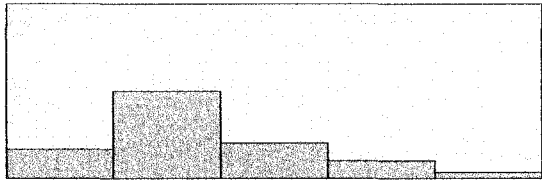
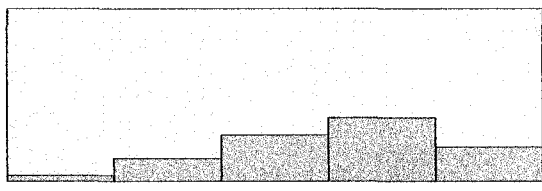
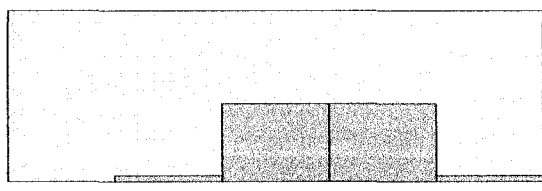
[T2Q16] Il a été plus rapide de réaliser la tâche avec l'interface diffuse que de façon conventionnelle	 <p>0 (0.0%) 4 (13.3%) 7 (23.3%) 10 (33.3%) 9 (20.0%)</p>	4.00	3.80	1.031
[T2Q17] L'effort physique requis pour interagir avec l'interface diffuse est important	 <p>9 (30.0%) 15 (50.0%) 2 (6.7%) 4 (13.3%) 0 (0.0%)</p>	2.00	2.03	0.964
[T2Q18] L'effort mental requis pour interagir avec l'interface diffuse est important	 <p>5 (16.7%) 15 (50.0%) 6 (20.0%) 3 (10.0%) 1 (3.3%)</p>	2.00	2.33	0.994
[T2Q19] Globalement, la réalisation de la tâche à l'aide de l'ordinateur porté a demandé moins d'effort que celle de la tâche conventionnelle	 <p>1 (3.3%) 4 (13.3%) 8 (26.7%) 11 (36.7%) 6 (20.0%)</p>	4.00	3.57	1.073
[T2Q20] L'utilisation de l'ordinateur porté via l'interface diffuse est transparente	 <p>0 (0.0%) 1 (3.3%) 14 (46.7%) 14 (46.7%) 1 (3.3%)</p>	3.50	3.50	0.630

Tableau 6.18 : Réponses aux énoncés de Likert pour la tâche 2 (suite)

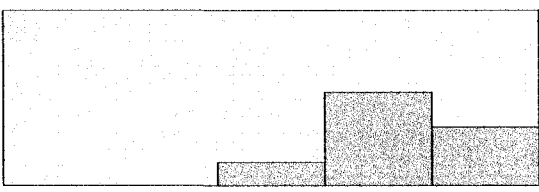
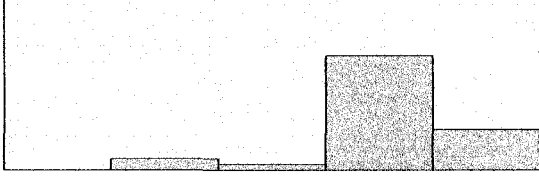
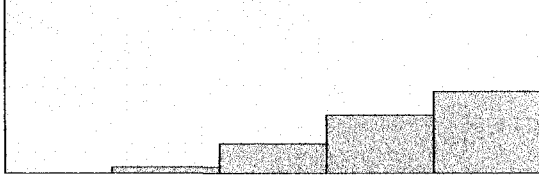
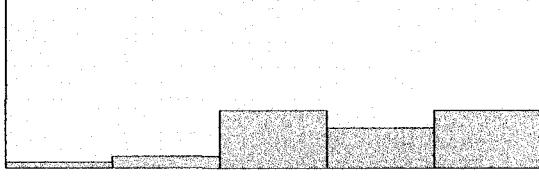
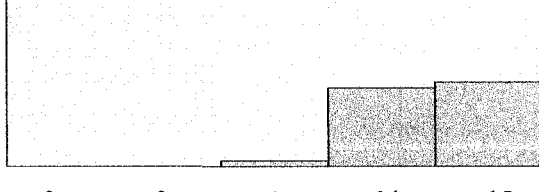
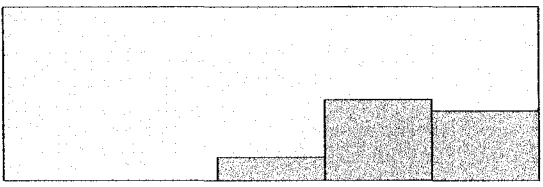
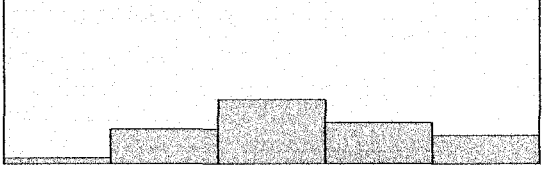
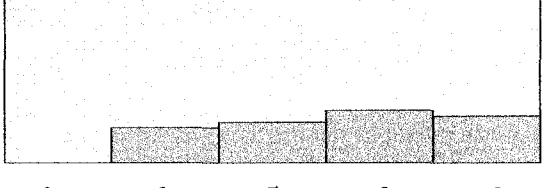
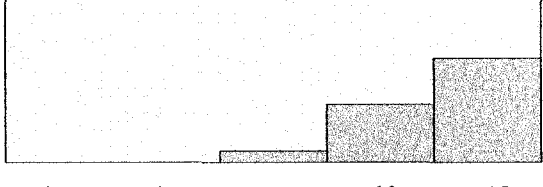
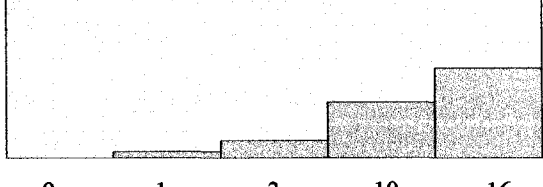
[T2Q21] Je suis satisfait de ma performance lors de la tâche conventionnelle	 <p>0 (0.0%) 0 (0.0%) 4 (13.3%) 16 (53.3%) 10 (33.3%)</p>	4.00	4.20	0.664
[T2Q22] Je suis satisfait de ma performance lors de la tâche avec l'interface diffuse	 <p>0 (0.0%) 2 (6.7%) 1 (3.3%) 20 (66.7%) 7 (23.3%)</p>	4.00	4.07	0.740
[T2Q23] Les associations entité-action-fonctionnalité de l'interface diffuse sont cohérentes	 <p>0 (0.0%) 1 (3.3%) 5 (16.7%) 10 (33.3%) 14 (46.7%)</p>	4.00	4.23	0.858
[T2Q24] Les associations entité-action-fonctionnalité de l'interface diffuse sont intuitives	 <p>1 (3.3%) 2 (6.7%) 10 (33.3%) 7 (23.3%) 10 (33.3%)</p>	4.00	3.77	1.104
[T2Q25] Lors de l'utilisation de l'ordinateur porté, l'information présentée est utile à la tâche	 <p>0 (0.0%) 0 (0.0%) 1 (3.3%) 14 (46.7%) 15 (50.0%)</p>	4.50	4.47	0.571

Tableau 6.18 : Réponses aux énoncés de Likert pour la tâche 2 (suite et fin)

[T2Q26] Lors de l'utilisation de l'ordinateur porté, l'information présentée est concise	 <p>0 (0.0%) 0 (0.0%) 4 (13.3%) 14 (46.7%) 12 (40.0%)</p>	4.00	4.27	0.691
[T2Q27] J'aurais pu facilement deviner le fonctionnement de l'interface diffuse d'après les entités utilisées pour la tâche	 <p>1 (3.3%) 6 (20.0%) 11 (36.7%) 7 (23.3%) 5 (16.7%)</p>	3.00	3.30	0.691
[T2Q28] J'aurais pu facilement découvrir le fonctionnement de l'interface diffuse par essais-erreurs, en manipulant les entités utilisées pour la tâche	 <p>0 (0.0%) 6 (20.0%) 7 (23.3%) 9 (30.0%) 8 (26.7%)</p>	4.00	3.63	1.098
[T2Q29] Avec de l'entraînement, l'interface diffuse me permettrait de réaliser la tâche plus rapidement que de façon conventionnelle	 <p>0 (0.0%) 0 (0.0%) 2 (6.7%) 10 (33.3%) 18 (60.0%)</p>	5.00	4.53	0.629
[T2Q30] Avec de l'entraînement, l'interface diffuse me permettrait de réaliser la tâche avec moins d'effort que de façon conventionnelle	 <p>0 (0.0%) 1 (3.3%) 3 (10.0%) 10 (33.3%) 16 (53.3%)</p>	5.00	4.37	0.809

Les mesures composites (échelles de Likert) caractérisant l'interface diffuse pour la tâche 2 sont résumées dans le Tableau 6.19.

Tableau 6.19 : Mesures composites caractérisant l'interface diffuse pour la tâche 2

	Min.	Max.	Moy.	Écart-type	Asymétrie (a)	Aplatissement (b)
[T2] Utilité	2.25	5.00	3.95	0.696	-0.621	0.527
[T2] Efficacité	2.50	5.00	4.13	0.754	-0.553	-0.883
[T2] Efficience	2.40	5.00	3.83	0.585	-0.397	0.105
[T2] Satisfaction	2.25	5.00	4.10	0.668	-0.833	0.815
[T2] Utilisabilité	3.05	4.90	4.00	0.524	-0.129	-0.890
[T2] Facilité d'apprentissage	2.40	5.00	3.83	0.793	-0.312	-0.838

a) Erreur std. asymétrie = 0.427

b) Erreur std. aplatissement = 0.833

Les tableaux ci-dessous (Tableau 6.20, Tableau 6.21 et Tableau 6.22) résument les charges physique et mentale ressenties ainsi que l'effort déployé par les participants lors de la tâche 2, à la fois réalisée de façon conventionnelle et à l'aide de l'ordinateur porté.

Tableau 6.20 : Charge physique en pourcentage pour la tâche 2

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
[T2] Charge physique moyenne (conventionnelle)	0.00	100.00	35.55	27.67
[T2] Charge physique moyenne (avec ordinateur porté)	0.00	88.24	31.42	22.49

Tableau 6.21 : Charge mentale en pourcentage pour la tâche 2

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
[T2] Charge mentale moyenne (conventionnelle)	18.63	100.00	60.27	22.24
[T2] Charge mentale moyenne (avec ordinateur porté)	2.00	80.39	40.58	21.54

Tableau 6.22 : Effort moyen déployé en pourcentage pour la tâche 2

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
[T2] Effort moyen déployé (conventionnelle)	10.78	99.02	50.58	26.11
[T2] Effort moyen déployé (avec ordinateur porté)	3.92	100.00	40.89	27.99

6.3.3 Observations

Lors de la réalisation de la tâche (à la fois de façon conventionnelle et avec l'ordinateur porté), nous avons observé trois modes opératoires principaux lors de la première partie de la tâche (c.-à-d. recherche du livre demandé):

- 1) la grande majorité des sujets (23) commencent par une exploration préliminaire des livres mis à leur disposition (c.-à-d. lecture rapide des titres, avec ou sans un suivi des doigts) puis sortent et examinent plus en détails la couverture et le résumé du meilleur candidat avant de regarder la table des matières se trouvant au début (deux sujets l'ont par contre cherché à la fin);
- 2) certains sujets (4) procèdent par exploration systématique des livres en les sortant et les analysant un par un au fur et à mesure;
- 3) d'autres sujets (2) optent pour un tri ordonné en deux piles (les entités potentiellement intéressantes versus celles qui ne le sont pas), selon les titres.

Le premier mode opératoire correspond au modèle de la tâche présenté au chapitre précédent (section 4.2.2). Il est cependant intéressant de noter que l'interface diffuse

créée permet de supporter ces trois modes opératoires puisque la greffe d'informations virtuelles à une entité d'intérêt est automatique lorsque cette dernière entre dans le champ de vision de l'utilisateur / du système. En comparant les deux façons de réaliser la tâche (c.-à-d. conventionnelle versus avec l'ordinateur porté), nous avons constaté une différence intéressante. Pour la tâche conventionnelle, après avoir saisi le livre semblant le plus approprié, certains sujets (6) continuent à regarder le reste des livres pour tenter de valider leur choix. Avec l'ordinateur porté ces sujets ne manifestent pas un tel comportement puisque l'information virtuelle associée à l'entité d'intérêt confirme explicitement la validité de leur choix.

Lors de l'utilisation de l'ordinateur porté, nous avons constaté que deux sujets ont tenté de réaliser la tâche au complet uniquement à travers le dispositif d'affichage tête haute, ce qui est très ardu, voire impossible, vu la résolution de capture de la caméra et celle du dispositif d'affichage qui ne permettent pas la lecture de caractères d'imprimerie conventionnels (la table des matières du livre par exemple) et de distinguer certains détails. Un tel comportement pourrait être expliqué par le fait que ces utilisateurs avaient réalisé la tâche 3 en premier dans leur séquence d'expériences, tâche nécessitant de porter davantage attention aux informations présentées à travers le dispositif d'affichage tête haute et des interactions plus soutenue avec l'ordinateur porté. Deux autres sujets ont procédé sans sembler porter attention à l'information fournie par le système. Deux sujets différents s'attendaient à obtenir plus d'aide de la part de l'ordinateur porté ou de l'information plus approfondie / plus détaillée sur une entité d'intérêt.

Finalement, pour la seconde partie de la tâche réalisée avec l'ordinateur porté, nous avons constaté que le geste de capture semblait laborieux à réaliser pour plus de la moitié des utilisateurs puisque l'interaction nécessitait le positionnement relatif des deux mains de l'utilisateur devant l'objet d'intérêt; et ceci se reflète directement dans le nombre d'erreurs mesurées pour cette partie de la tâche. Les utilisateurs ont ainsi en grande majorité (24) choisi de déposer le livre devant eux, sur la table, avant d'accomplir le geste de capture au dessus du passage d'intérêt. Il leur fallait parfois éviter que le livre ne se ferme tout en s'assurant de ne pas travailler trop proche de leur corps (trois sujets ont d'ailleurs commencé par réaliser la tâche complètement en dehors du champ de vision du système avant de s'en apercevoir). D'autres sujets (6) ont opté pour garder le livre en main mais le geste de capture semblait alors plus difficile à réaliser. Nous avons également remarqué que les sujets ont tenté d'accomplir la capture par le biais de plusieurs différentes techniques gestuelles, la plupart identifiées par le système (Figure 6.2) mais certaines trop éloignées de ce qui était prescrit, et donc non reconnues par le système, ou encore en partie hors du champ de vision du système (Figure 6.3).

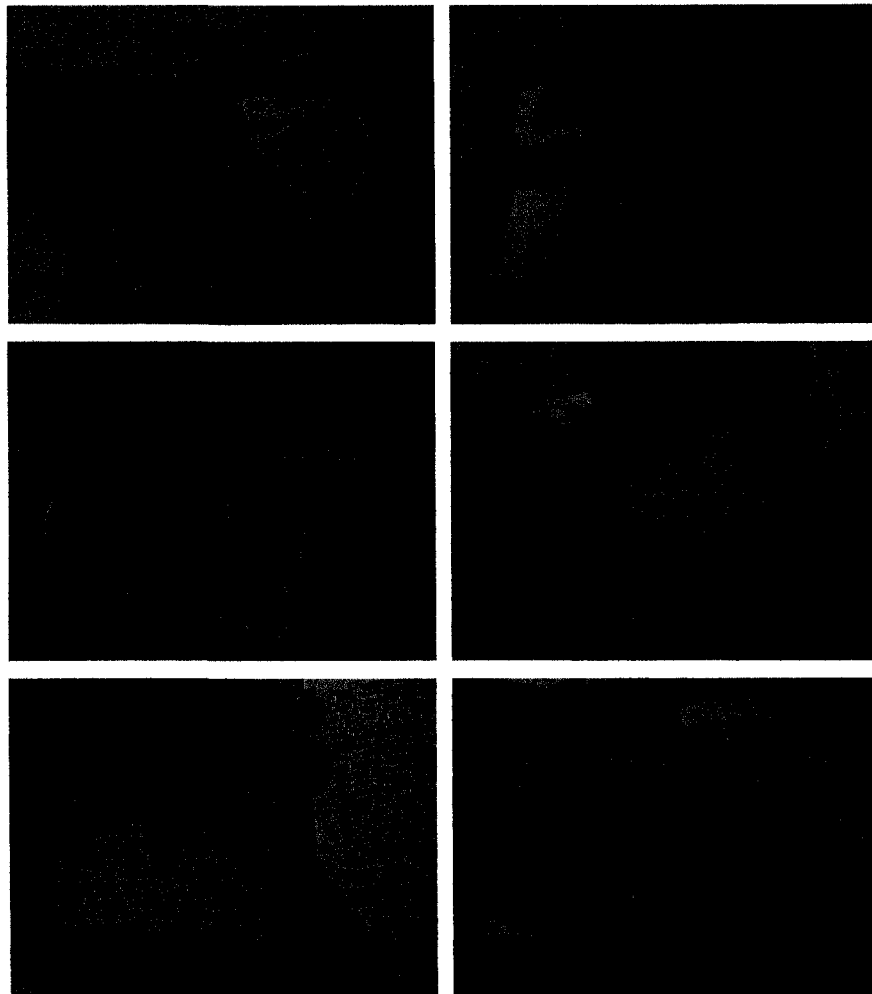


Figure 6.2 : Exemples de gestes de capture reconnus par le système

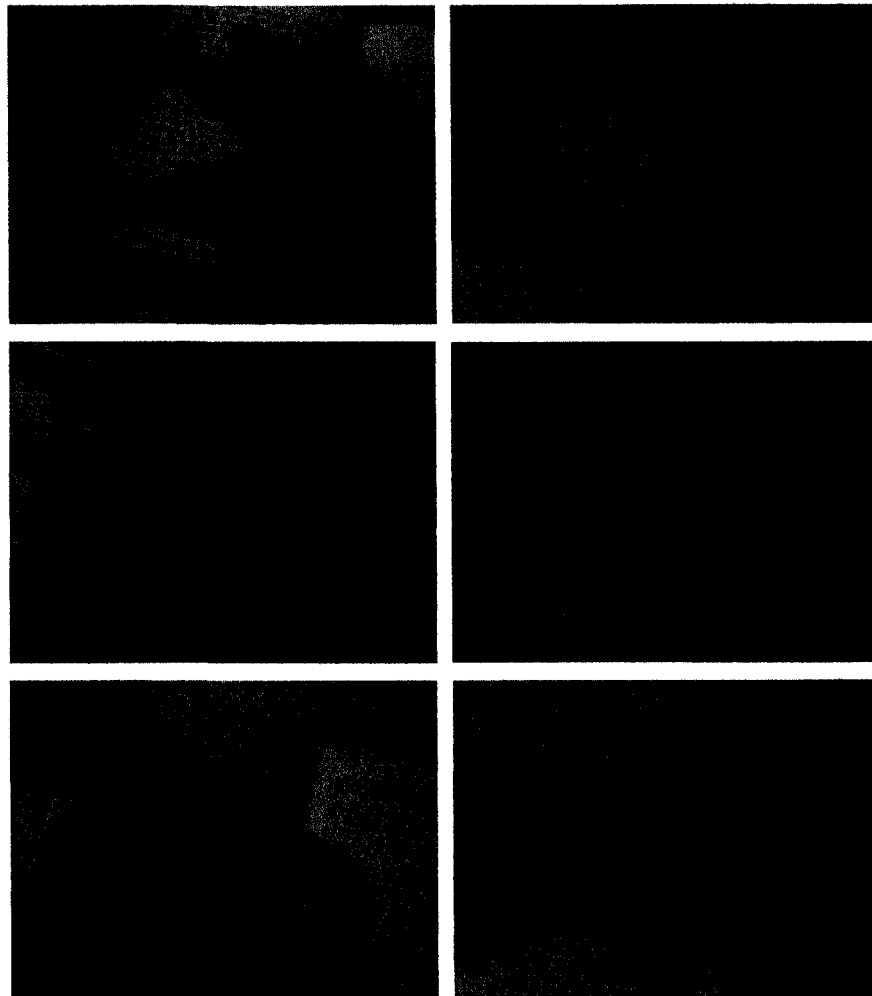


Figure 6.3 : Exemples de gestes de capture non reconnus par le système

6.3.4 Courbes d'apprentissage

La Figure 6.4 présente, pour la tâche 2 réalisée à la fois de façon conventionnelle et à l'aide de l'ordinateur porté, les courbes d'apprentissage obtenues par régression à partir de l'équation introduite à la section 4.5.3. Les modèles obtenus (Tableau 6.23) sont statistiquement significatifs ($p < 0.001$) et expliquent respectivement, pour la tâche

réalisée de façon conventionnelle et à l'aide de l'ordinateur porté, 60.5% et 72.6% de la variance observée dans les mesures.

Tableau 6.23 : Modèle d'apprentissage pour la tâche 2

Tâche	Résumé du modèle					Estimé des paramètres	
	R ²	F	DOF1	DOF2	p	T ₁ (s)	α
Conventionnelle	0.605	73.613	1	48	0.000	103.991	0.762
Avec ordinateur porté	0.726	127.433	1	48	0.000	101.163	1.059

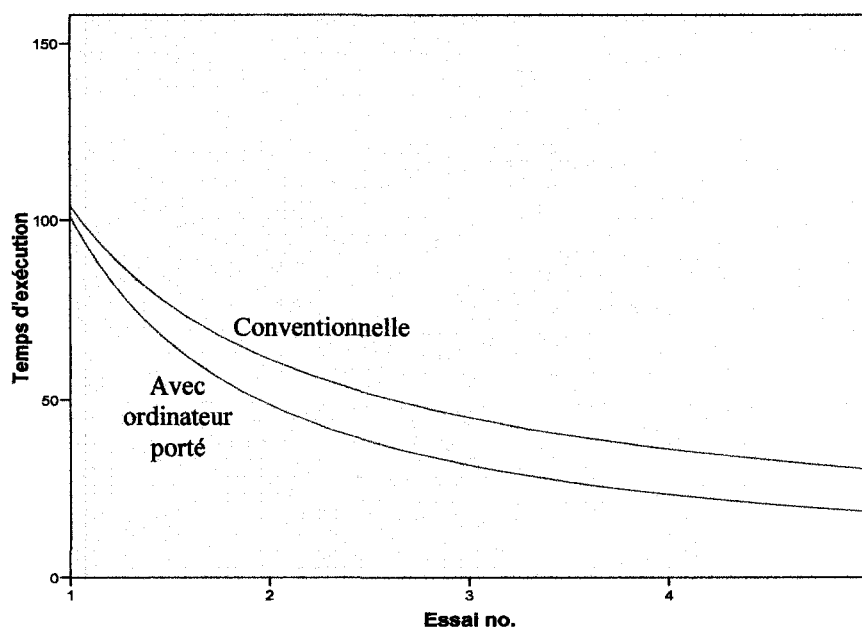


Figure 6.4 : Approximation des courbes d'apprentissage pour la tâche 2

6.3.5 Analyse inférentielle

Avant d'effectuer des tests paires pour comparer la tâche 2 réalisée de façon conventionnelle et à l'aide de l'ordinateur porté, il est important de déterminer si les différences paires analysées (cf. Tableau 6.24) suivent une distribution normale ou non.

Tableau 6.24 : Caractéristiques des différences analysées pour la tâche 2

	Min.	Max.	Moy.	Écart-type	Asymétrie (a)	Aplatissement (b)
[T2] Diff. temps d'exécution (conventionnelle - avec ordinateur porté)	-141.00	222.00	8.17	74.33	0.104	1.647
[T2] Diff. nombre d'erreurs (conventionnelle - avec ordinateur porté, partie 1)	-1.00	2.00	0.10	0.71	0.467	0.673
[T2] Diff. nombre d'erreurs (conventionnelle - avec ordinateur porté, partie 2)	-4.00	1.00	-1.03	1.50	-0.667	-0.527
[T2] Diff. facilité de réalisation ([T2Q7] conventionnelle - [T2Q8] avec ordinateur porté)	-2.00	3.00	-0.20	1.21	0.534	0.293
[T2] Diff. satisfaction de la performance ([T2Q21] conventionnelle - [T2Q22] avec ordinateur porté)	-2.00	3.00	0.13	1.07	0.612	0.723
[T2] Diff. charge mentale ressentie (conventionnelle - avec ordinateur porté)	-48.04	70.59	19.69	26.06	-0.399	0.558
[T2] Diff. charge physique ressentie (conventionnelle - avec ordinateur porté)	-41.18	55.88	4.14	21.24	0.246	0.847
[T2] Diff. effort moyen déployé (conventionnelle - avec ordinateur porté)	-41.18	62.75	9.70	23.23	0.020	-0.053

a) Erreur std. asymétrie = 0.427

b) Erreur std. aplatissement = 0.833

Puisque plusieurs distributions des différences ne semblent pas normales, et ce pour les trois tâches (voir section 6.2.5 et section 6.4.5 pour les autres tâches), nous ne pouvons pas utiliser de tests paramétriques supposant la normalité et nous devons à la place

utiliser des tests non-paramétriques. En effet, pour la tâche 2, quelques coefficients d'aplatissement (*kurtosis*) et coefficients d'asymétrie (*skewness*) sont éloignés de la normale. De plus, plusieurs tests de normalité de Shapiro-Wilk (cf. Tableau 6.25) donnent des résultats significatifs (c.-à-d. $p < 0.05$) nous amenant à rejeter l'hypothèse nulle d'une distribution normale.

Tableau 6.25 : Tests de normalité sur les différences paires pour la tâche 2

	Shapiro-Wilk		
	W	DOF	p
[T2] Diff. temps d'exécution (conventionnelle - avec ordinateur porté)	0.926	30	0.039
[T2] Diff. nombre d'erreurs (conventionnelle - avec ordinateur porté, partie 1)	0.819	30	0.000
[T2] Diff. nombre d'erreurs (conventionnelle - avec ordinateur porté, partie 2)	0.380	30	0.003
[T2] Diff. facilité de réalisation ([T2Q7] conventionnelle - [T2Q8] avec ordinateur porté)	0.921	30	0.028
[T1] Diff. satisfaction de la performance ([T2Q21] conventionnelle - [T2Q22] avec ordinateur porté)	0.908	30	0.013
[T2] Diff. charge mentale ressentie (conventionnelle - avec ordinateur porté)	0.980	30	0.833
[T2] Diff. charge physique ressentie (conventionnelle - avec ordinateur porté)	0.963	30	0.369
[T2] Diff. effort moyen déployé (conventionnelle - avec ordinateur porté)	0.973	30	0.623

Les résultats des tests bilatéraux (*two-tailed*) des rangs signés de Wilcoxon pour les échantillons paires sont présentés dans le Tableau 6.26.

Tableau 6.26 : Tests des rangs signés de Wilcoxon pour la tâche 2

	Wilcoxon	
	T	p
[T2] Temps d'exécution (conventionnelle) - [T2] Temps d'exécution (avec ordinateur porté)	-1.173(a)	0.247
[T2] Erreurs commises (conventionnelle, partie 1) - [T2] Erreurs commises (avec ordinateur porté, partie 1)	-0.775(a)	0.613
[T2] Erreurs commises (conventionnelle, partie 2) - [T2] Erreurs commises (avec ordinateur porté, partie 2)	-3.238(b)	0.001
[T2Q7] Il a été facile de réaliser la tâche de façon conventionnelle - [T2Q8] Il a été facile de réaliser la tâche avec l'interface diffuse	-1.037(b)	0.327
[T2Q21] Je suis satisfait de ma performance lors de la tâche conventionnelle - [T2Q22] Je suis satisfait de ma performance lors de la tâche avec l'interface diffuse	-0.625(a)	0.553
[T2] Charge mentale moyenne (conventionnelle) - [T2] Charge mentale moyenne (avec ordinateur porté)	-3.428(a)	0.000
[T2] Charge physique moyenne (conventionnelle) - [T2] Charge physique moyenne (avec ordinateur porté)	-1.025(a)	0.313
[T2] Effort moyen déployé (conventionnelle) - [T2] Effort moyen déployé (avec ordinateur porté)	-2.050(a)	0.040

a) Basé sur les rangs négatifs.

b) Basé sur les rangs positifs.

Ces tests révèlent notamment :

- une différence statistique hautement significative entre les distributions sous-jacentes du nombre d'erreurs commises dans la seconde partie de la tâche ($T=-3.238$, $p=0.001$) pour la tâche conventionnelle versus la tâche avec l'ordinateur porté;
- une différence statistique hautement significative entre les distributions sous-jacentes de la charge mentale moyenne ressentie par les participants ($T=-3.428$, $p<0.001$) pour la tâche conventionnelle versus la tâche avec l'ordinateur porté;

- une différence statistique significative entre les distributions sous-jacentes de l'effort moyen déployé par les participants ($T=-2.050$, $p=0.04$) pour la tâche conventionnelle versus la tâche avec l'ordinateur porté;

Nous rejetons ainsi l'hypothèse nulle (c.-à-d. la différence médiane entre les paires de mesures / d'observations est zéro) pour ces trois tests et nous en concluons que, pour la tâche 2, l'utilisation de l'ordinateur porté doté d'une interface diffuse augmente de façon colossale le nombre d'erreurs faites lors de la capture d'un passage d'intérêt, comparé à cette tâche réalisée de façon conventionnelle (cf. Tableau 6.27), tandis qu'il diminue significativement la charge mentale moyenne ressentie par les participants ainsi que l'effort moyen qu'ils doivent fournir pour réaliser cette tâche.

Tableau 6.27 : Résumé des variations statistiquement significatives lors de l'utilisation de l'ordinateur porté pour la tâche 2

	Variation par rapport à la tâche conventionnelle (estimé à partir des moyennes)
Nombre d'erreurs commises, partie 2	Augmentation d'environ 450%
Charge mentale moyenne ressentie	Réduction d'environ 33%
Effort moyen déployé	Réduction d'environ 19%

6.4 Résultats pour la tâche 3 : Gestion bancaire

6.4.1 Mesures objectives

Les statistiques descriptives pour le temps d'exécution et le nombre d'erreurs, à la fois pour la tâche 3 réalisée de manière conventionnelle et à l'aide de l'ordinateur porté, sont respectivement présentées dans le Tableau 6.28 et le Tableau 6.29.

Tableau 6.28 : Temps d'exécution en secondes pour la tâche 3

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
[T3] Temps d'exécution (conventionnelle)	100	343	197.20	61.426
[T3] Temps d'exécution (avec ordinateur porté)	17	96	46.77	19.837

Tableau 6.29 : Nombre d'erreurs pour la tâche 3

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
[T3] Erreurs commises (conventionnelle)	0	8	2.87	2.360
[T3] Erreurs commises (avec ordinateur porté)	0	3	0.67	0.884

6.4.2 Mesures subjectives

Le Tableau 6.30 résume pour la tâche 3 la distribution des réponses aux énoncés de Likert (recueillies via le questionnaire rempli par les 30 participants), ainsi que leur médiane, leur moyenne et leur écart-type.

Tableau 6.30 : Réponses aux énoncés de Likert pour la tâche 3

	Distribution des réponses (de 1=fortement en désaccord à 5=fortement d'accord)					Statistiques		
	1	2	3	4	5	Méd.	Moy.	Éc. type
[T3Q7] Il a été facile de réaliser la tâche de façon conventionnelle						3.00	3.03	1.159
[T3Q8] Il a été facile de réaliser la tâche avec l'interface diffuse						5.00	4.70	0.651
[T3Q9] Le fonctionnement de l'interface diffuse a été facile à apprendre						5.00	4.60	0.675
[T3Q10] L'interface diffuse est utile						5.00	4.60	0.563

Tableau 6.30 : Réponses aux énoncés de Likert pour la tâche 3 (suite)

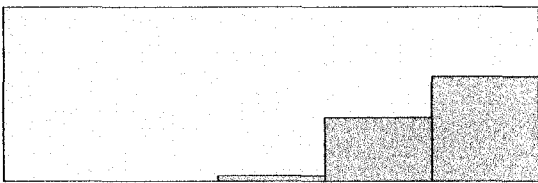
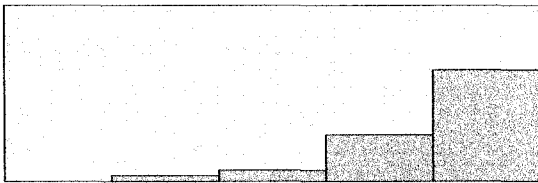
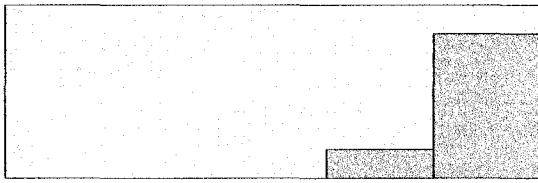
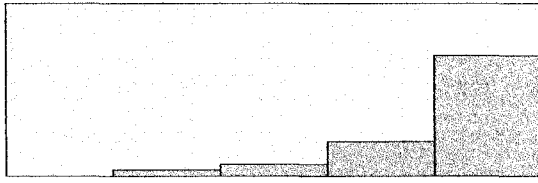
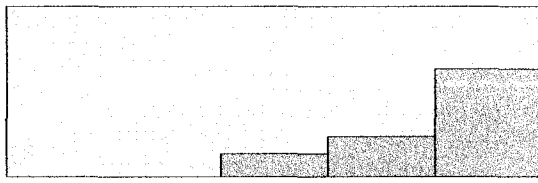
<p>[T3Q11] L'interface diffuse est efficace (c.-à-d. permet de réaliser adéquatement la tâche)</p>	 <p>0 (0.0%) 0 (0.0%) 1 (3.3%) 11 (36.7%) 18 (60.0%)</p>	5.00	4.57	0.568
<p>[T3Q12] L'interface diffuse est efficiente (c.-à-d. permet de réaliser adéquatement la tâche avec un minimum d'effort)</p>	 <p>0 (0.0%) 1 (3.3%) 2 (6.7%) 8 (26.7%) 19 (63.3%)</p>	5.00	4.50	0.777
<p>[T3Q13] L'interface diffuse est rapide</p>	 <p>0 (0.0%) 0 (0.0%) 0 (0.0%) 5 (16.7%) 25 (83.3%)</p>	5.00	4.83	0.379
<p>[T3Q14] L'interface diffuse est plaisante</p>	 <p>0 (0.0%) 1 (3.3%) 2 (6.7%) 6 (20.0%) 21 (70.0%)</p>	5.00	4.57	0.774
<p>[T3Q15] L'interface diffuse répond à mes attentes</p>	 <p>0 (0.0%) 0 (0.0%) 4 (13.3%) 7 (23.3%) 19 (63.3%)</p>	5.00	4.50	0.731

Tableau 6.30 : Réponses aux énoncés de Likert pour la tâche 3 (suite)

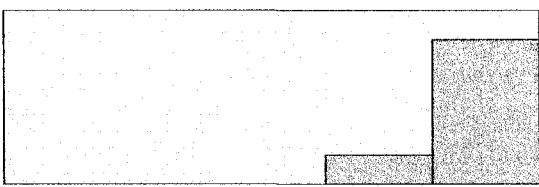
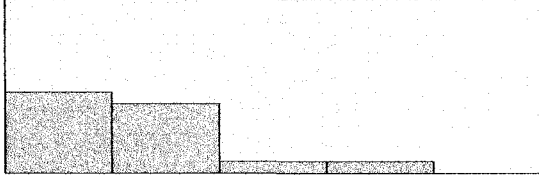
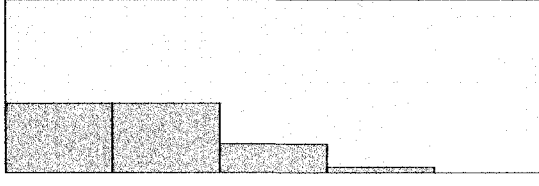
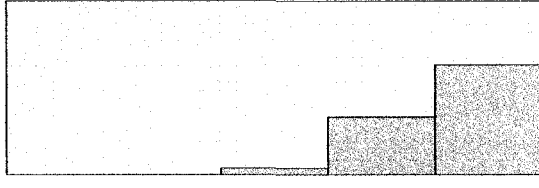
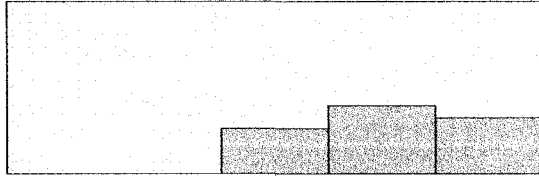
[T3Q16] Il a été plus rapide de réaliser la tâche avec l'interface diffuse que de façon conventionnelle	 <p>0 (0.0%) 0 (0.0%) 0 (0.0%) 5 (16.7%) 25 (83.3%)</p>	5.00	4.83	0.379
[T3Q17] L'effort physique requis pour interagir avec l'interface diffuse est important	 <p>14 (46.7%) 12 (40.0%) 2 (6.7%) 2 (6.7%) 0 (0.0%)</p>	2.00	1.73	0.868
[T3Q18] L'effort mental requis pour interagir avec l'interface diffuse est important	 <p>12 (40.0%) 12 (40.0%) 5 (16.7%) 1 (3.3%) 0 (0.0%)</p>	2.00	1.83	0.834
[T3Q19] Globalement, la réalisation de la tâche à l'aide de l'ordinateur porté a demandé moins d'effort que celle de la tâche conventionnelle	 <p>0 (0.0%) 0 (0.0%) 1 (3.3%) 10 (33.3%) 19 (63.3%)</p>	5.00	4.60	0.563
[T3Q20] L'utilisation de l'ordinateur porté via l'interface diffuse est transparente	 <p>0 (0.0%) 0 (0.0%) 8 (26.7%) 12 (40.0%) 10 (33.3%)</p>	4.00	4.07	0.785

Tableau 6.30 : Réponses aux énoncés de Likert pour la tâche 3 (suite)

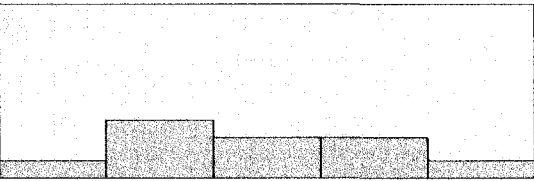
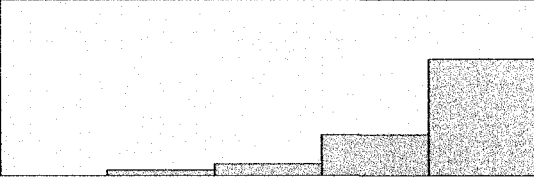
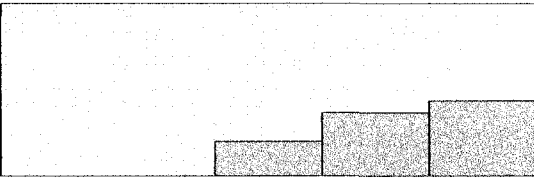
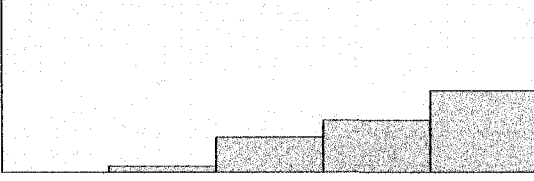
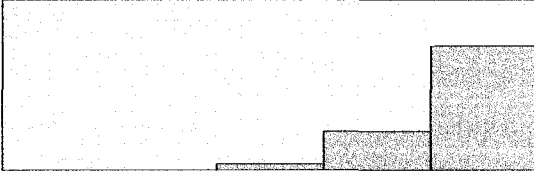
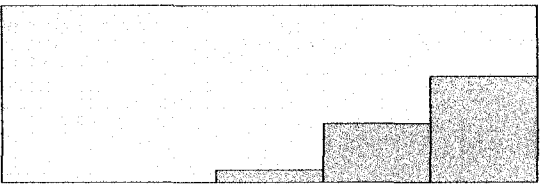
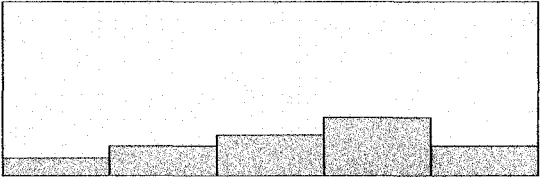
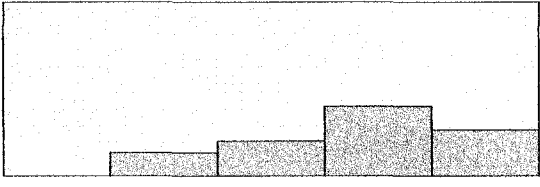
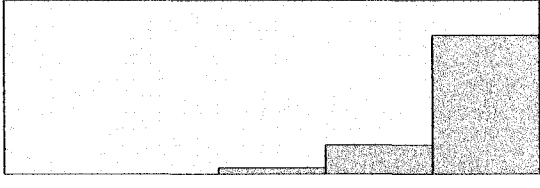
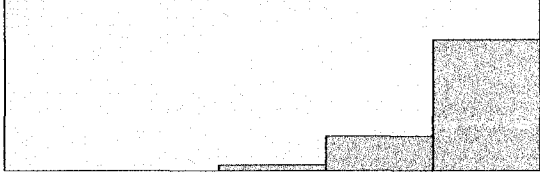
[T3Q21] Je suis satisfait de ma performance lors de la tâche conventionnelle	 <p>3 (10.0%) 10 (33.3%) 7 (23.3%) 7 (23.3%) 3 (10.0%)</p>	3.00	2.90	1.185
[T3Q22] Je suis satisfait de ma performance lors de la tâche avec l'interface diffuse	 <p>0 (0.0%) 1 (3.3%) 2 (6.7%) 7 (23.3%) 20 (66.7%)</p>	5.00	4.53	0.776
[T3Q23] Les associations entité-action-fonctionnalité de l'interface diffuse sont cohérentes	 <p>0 (0.0%) 0 (0.0%) 6 (20.0%) 11 (36.7%) 13 (43.3%)</p>	4.00	4.23	0.774
[T3Q24] Les associations entité-action-fonctionnalité de l'interface diffuse sont intuitives	 <p>0 (0.0%) 1 (3.3%) 6 (20.0%) 9 (30.0%) 14 (46.7%)</p>	4.00	4.20	0.887
[T3Q25] Lors de l'utilisation de l'ordinateur porté, l'information présentée est utile à la tâche	 <p>0 (0.0%) 0 (0.0%) 1 (3.3%) 7 (23.3%) 22 (73.3%)</p>	5.00	4.70	0.535

Tableau 6.30 : Réponses aux énoncés de Likert pour la tâche 3 (suite et fin)

[T3Q26] Lors de l'utilisation de l'ordinateur porté, l'information présentée est concise	 <p>0 (0.0%) 0 (0.0%) 2 (6.7%) 10 (33.3%) 18 (60.0%)</p>	5.00	4.53	0.629
[T3Q27] J'aurais pu facilement deviner le fonctionnement de l'interface diffuse d'après les entités utilisées pour la tâche	 <p>3 (10.0%) 5 (16.7%) 7 (23.3%) 10 (33.3%) 5 (16.7%)</p>	3.50	3.30	1.236
[T3Q28] J'aurais pu facilement découvrir le fonctionnement de l'interface diffuse par essais-erreurs, en manipulant les entités utilisées pour la tâche	 <p>0 (0.0%) 4 (13.3%) 6 (20.0%) 12 (40.0%) 8 (26.7%)</p>	4.00	3.80	0.997
[T3Q29] Avec de l'entraînement, l'interface diffuse me permettrait de réaliser la tâche plus rapidement que de façon conventionnelle	 <p>0 (0.0%) 0 (0.0%) 1 (3.3%) 5 (16.7%) 24 (80.0%)</p>	5.00	4.77	0.504
[T3Q30] Avec de l'entraînement, l'interface diffuse me permettrait de réaliser la tâche avec moins d'effort que de façon conventionnelle	 <p>0 (0.0%) 0 (0.0%) 1 (3.3%) 6 (20.0%) 23 (76.7%)</p>	5.00	4.73	0.521

Les mesures composites (échelles de Likert) caractérisant l'interface diffuse pour la tâche 3 sont résumées dans le Tableau 6.31.

Tableau 6.31 : Mesures composites caractérisant l'interface diffuse pour la tâche 3

	Min.	Max.	Moy.	Écart-type	Asymétrie (a)	Aplatissement (b)
[T3] Utilité	3.25	5.00	4.68	0.388	-1.892	5.124
[T3] Efficacité	3.50	5.00	4.70	0.428	-1.263	0.715
[T3] Efficience	2.80	5.00	4.31	0.567	-0.974	0.839
[T3] Satisfaction	2.50	5.00	4.58	0.569	-2.164	5.438
[T3] Utilisabilité	3.64	5.00	4.57	0.374	-0.806	-0.218
[T3] Facilité d'apprentissage	2.20	5.00	4.03	0.735	-0.731	-0.089

a) Erreur std. asymétrie = 0.427

b) Erreur std. aplatissement = 0.833

Les tableaux ci-dessous (Tableau 6.32, Tableau 6.33 et Tableau 6.34) résument les charges physique et mentale ressenties ainsi que l'effort déployé par les participants lors de la tâche 3, à la fois réalisée de façon conventionnelle et à l'aide de l'ordinateur porté.

Tableau 6.32 : Charge physique en pourcentage pour la tâche 3

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
[T3] Charge physique moyenne (conventionnelle)	0.00	84.31	28.61	24.59
[T3] Charge physique moyenne (avec ordinateur porté)	0.98	93.14	28.38	25.19

Tableau 6.33 : Charge mentale en pourcentage pour la tâche 3

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
[T3] Charge mentale moyenne (conventionnelle)	10.78	99.02	68.01	22.16
[T3] Charge mentale moyenne (avec ordinateur porté)	1.96	92.16	33.16	27.47

Tableau 6.34 : Effort moyen déployé en pourcentage pour la tâche 3

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
[T3] Effort moyen déployé (conventionnelle)	18.63	100.00	54.89	22.52
[T3] Effort moyen déployé (avec ordinateur porté)	2.94	100.00	30.67	24.08

6.4.3 Observations

Lors de la réalisation de la tâche de façon conventionnelle, nous n'avons pas observé de déviations significatives par rapport au modèle de la tâche présenté au chapitre précédent (section 4.2.3). Certains sujets (7) ont cependant commencé par regarder et analyser le menu de droite avant celui du haut lors de la recherche de l'option de paiement d'une facture, ou encore le sous-menu principal (1 sujet). Quelques sujets (3) ne se sont pas aperçus que le numéro de carte et le mot de passe étaient déjà automatiquement sauvegardés par le fureteur Internet et les ont re-rentés dans les champs appropriés. Un sujet a également pris le temps de lire toutes les sections intitulées « Important » présentées sur le site web original.

Lors de l'utilisation de l'ordinateur porté, nous avons constaté que les sujets semblent en mesure d'anticiper adéquatement la vitesse du flot de transfert d'une carte à l'autre. Ils parviennent ainsi à décroître l'angle de transfert (et donc la vitesse du flot) au fur et à mesure que le montant restant à payer se rapproche de zéro. Cependant, et ce malgré la protection temporelle intégrée à ce zéro, plus de 40% des utilisateurs (13) dépassent le

zéro au moins une fois, et doivent alors inverser l'interaction pour y revenir. Nous avons aussi remarqué que, lors de l'interaction pour le transfert, certains sujets (4) ont touché ou se superposé en partie les deux cartes, ce qui ralentit le temps d'exécution de la tâche. En effet, un tel phénomène arrête automatiquement le transfert puisque le système ne peut plus identifier ni l'une ni l'autre des cartes.

En comparant les deux façons de réaliser la tâche nous avons constaté que, pour la tâche conventionnelle, certains sujets (3) ne retournent pas au sommaire pour obtenir le solde restant suite à la transaction qu'ils déduisent plutôt mentalement avant de l'énoncer à haute voix, tandis qu'avec l'ordinateur porté cette information leur est immédiatement apparente, superposée sur l'entité d'intérêt. Finalement, mentionnons qu'un sujet a signalé toujours payer ses factures en personne et un autre n'avoir jamais utilisé de cartes bancaires (ou autres) de sa vie.

6.4.4 Courbes d'apprentissage

La Figure 6.5 présente, pour la tâche 3 réalisée à la fois de façon conventionnelle (en rouge) et à l'aide de l'ordinateur porté (en bleu), les courbes d'apprentissage obtenues par régression à partir de l'équation introduite à la section 4.5.3. Les modèles obtenus (Tableau 6.35) sont statistiquement significatifs ($p < 0.001$) et expliquent respectivement, pour la tâche réalisée de façon conventionnelle et à l'aide de l'ordinateur porté, 83.6% et 61.2% de la variance observée dans les mesures.

Tableau 6.35 : Modèle d'apprentissage pour la tâche 3

Tâche	Résumé du modèle					Estimé des paramètres	
	R ²	F	DOF1	DOF2	p	T ₁ (s)	α
Conventionnelle	0.836	243.909	1	48	0.000	176.152	1.115
Avec ordinateur porté	0.612	75.671	1	48	0.000	41.704	0.764

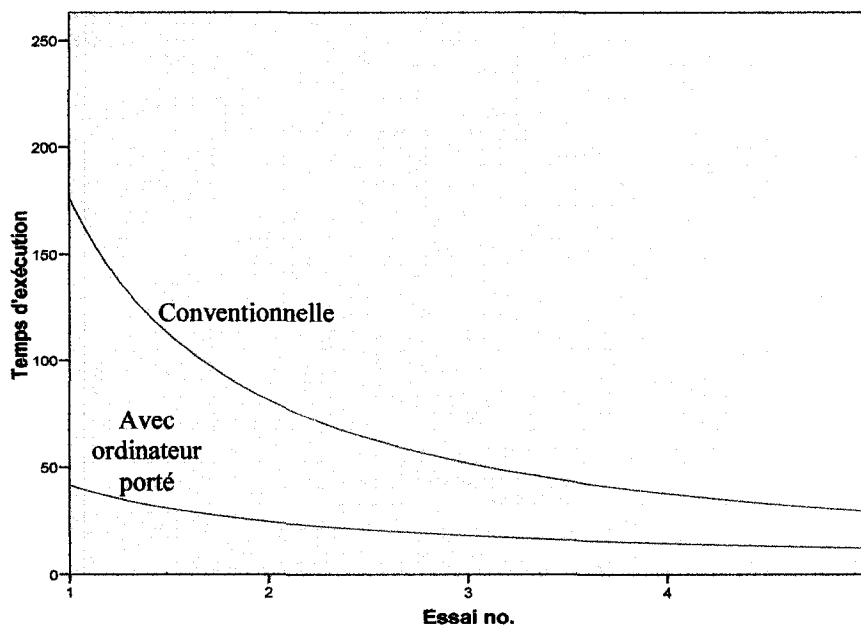


Figure 6.5 : Approximation des courbes d'apprentissage pour la tâche 3

6.4.5 Analyse inférentielle

Avant d'effectuer des tests pairés pour comparer la tâche 3 réalisée de façon conventionnelle et à l'aide de l'ordinateur porté, il est important de déterminer si les différences pairées analysées (cf. Tableau 6.36) suivent une distribution normale ou non.

Tableau 6.36 : Caractéristiques des différences analysées pour la tâche 3

	Min.	Max.	Moy.	Écart-type	Asymétrie (a)	Aplatissement (b)
[T3] Diff. temps d'exécution (conventionnelle - avec ordinateur porté)	50.00	290.00	150.43	56.79	0.436	-0.065
[T3] Diff. nombre d'erreurs (conventionnelle - avec ordinateur porté)	-1.00	6.00	2.20	2.06	0.348	-0.572
[T3] Diff. facilité de réalisation ([T3Q7] conventionnelle - [T3Q8] avec ordinateur porté)	-4.00	3.00	-1.67	1.47	1.189	2.182
[T3] Diff. satisfaction de la performance ([T3Q21] conventionnelle - [T3Q22] avec ordinateur porté)	-4.00	3.00	-1.63	1.65	0.795	0.696
[T3] Diff. charge mentale ressentie (conventionnelle - avec ordinateur porté)	-35.30	69.60	34.84	29.83	-0.970	0.129
[T3] Diff. charge physique ressentie (conventionnelle - avec ordinateur porté)	-63.73	42.16	0.23	23.02	-0.492	1.095
[T3] Diff. effort moyen déployé (conventionnelle - avec ordinateur porté)	-25.49	54.90	24.23	19.85	-0.480	0.114

a) Erreur std. asymétrie = 0.427

b) Erreur std. aplatissement = 0.833

Puisque plusieurs distributions des différences ne semblent pas normales, et ce pour les trois tâches (voir section 6.2.5 et section 6.3.5 pour les autres tâches), nous ne pouvons pas utiliser de tests paramétriques supposant la normalité et nous devons utiliser à la place des tests non-paramétriques. En effet, pour la tâche 3, de nombreux coefficients d'aplatissement (*kurtosis*) et coefficients d'asymétrie (*skewness*) sont trop éloignés de la

normale. De plus, plusieurs tests de normalité de Shapiro-Wilk (cf. Tableau 6.37) donnent des résultats significatifs (c.-à-d. $p < 0.05$) nous amenant à rejeter l'hypothèse nulle d'une distribution normale.

Tableau 6.37 : Tests de normalité sur les différences pairées pour la tâche 3

	Shapiro-Wilk		
	W	DOF	p
[T3] Diff. temps d'exécution (conventionnelle - avec ordinateur porté)	0.981	30	0.854
[T3] Diff. nombre d'erreurs (conventionnelle - avec ordinateur porté)	0.943	30	0.111
[T3] Diff. facilité de réalisation ([T3Q7] conventionnelle - [T3Q8] avec ordinateur porté)	0.886	30	0.004
[T3] Diff. satisfaction de la performance ([T3Q21] conventionnelle - [T3Q22] avec ordinateur porté)	0.928	30	0.044
[T3] Diff. charge mentale ressentie (conventionnelle - avec ordinateur porté)	0.893	30	0.006
[T3] Diff. charge physique ressentie (conventionnelle - avec ordinateur porté)	0.961	30	0.337
[T3] Diff. effort moyen déployé (conventionnelle - avec ordinateur porté)	0.968	30	0.482

Les résultats des tests bilatéraux (*two-tailed*) des rangs signés de Wilcoxon pour les échantillons pairés sont présentés dans le Tableau 6.38.

Tableau 6.38 : Tests des rangs signés de Wilcoxon pour la tâche 3

	Wilcoxon	
	T	p
[T3] Temps d'exécution (conventionnelle) - [T3] Temps d'exécution (avec ordinateur porté)	-4.782(a)	0.000
[T3] Erreurs commises (conventionnelle) - [T3] Erreurs commises (avec ordinateur porté)	-4.208(a)	0.000
[T3Q1] Il a été facile de réaliser la tâche de façon conventionnelle - [T3Q1] Il a été facile de réaliser la tâche avec l'interface diffuse	-3.964(a)	0.000
[T3Q21] Je suis satisfait de ma performance lors de la tâche conventionnelle - [T3Q22] Je suis satisfait de ma performance lors de la tâche avec l'interface diffuse	-3.794(b)	0.000
[T3] Charge mentale moyenne (conventionnelle) - [T3] Charge mentale moyenne (avec ordinateur porté)	-4.266(a)	0.000
[T3] Charge physique moyenne (conventionnelle) - [T3] Charge physique moyenne (avec ordinateur porté)	-0.178(a)	0.866
[T3] Effort moyen déployé (conventionnelle) - [T3] Effort moyen déployé (avec ordinateur porté)	-4.236(a)	0.000

a) Basé sur les rangs négatifs.

b) Basé sur les rangs positifs.

Ces tests révèlent notamment :

- une différence statistique hautement significative entre les distributions sous-jacentes du temps d'exécution ($T=-4.782$, $p<0.001$) pour la tâche conventionnelle versus la tâche avec l'ordinateur porté;
- une différence statistique hautement significative entre les distributions sous-jacentes du nombre d'erreurs commises ($T=-4.208$, $p<0.001$) pour la tâche conventionnelle versus la tâche avec l'ordinateur porté;
- une différence statistique hautement significative entre les distributions sous-jacentes de la facilité de réalisation ($T=-3.964$, $p<0.001$) pour la tâche conventionnelle versus la tâche avec l'ordinateur porté;

- une différence statistique hautement significative entre les distributions sous-jacentes de la satisfaction de la performance ($T=-3.794$, $p<0.001$) pour la tâche conventionnelle versus la tâche avec l'ordinateur porté;
- une différence statistique hautement significative entre les distributions sous-jacentes de la charge mentale moyenne ressentie par les participants ($T=-4.206$, $p<0.001$) pour la tâche conventionnelle versus la tâche avec l'ordinateur porté;
- une différence statistique hautement significative entre les distributions sous-jacentes de l'effort moyen déployé par les participants ($T=-4.236$, $p<0.001$) pour la tâche conventionnelle versus la tâche avec l'ordinateur porté;

Nous rejetons ainsi l'hypothèse nulle (c.-à-d. la différence médiane entre les paires de mesures / d'observations est zéro) pour ces six tests et nous en concluons que, pour la tâche 3 et comparé à cette tâche réalisée de façon conventionnelle (cf. Tableau 6.39), l'utilisation de l'ordinateur porté doté d'une interface diffuse améliore significativement le temps d'exécution de la tâche, diminue significativement le nombre d'erreurs commises, augmente significativement la facilité perçue de la tâche, augmente significativement la satisfaction des utilisateurs vis-à-vis leur performance et diminue significativement la charge mentale moyenne ressentie par les participants ainsi que l'effort moyen qu'ils doivent fournir pour réaliser cette tâche.

Tableau 6.39 : Résumé des variations statistiquement significatives lors de l'utilisation de l'ordinateur porté pour la tâche 3

	Variation par rapport à la tâche conventionnelle (estimé à partir des moyennes)
Temps d'exécution	Réduction d'environ 76%
Nombre d'erreurs commises	Réduction d'environ 77%
Facilité de réalisation	Augmentation d'environ 55%
Satisfaction de la performance	Augmentation d'environ 56%
Charge mentale moyenne ressentie	Réduction d'environ 51%
Effort moyen déployé	Réduction d'environ 44%

6.5 Résultats généraux

Nous présentons dans cette section des résultats généraux ne se rapportant pas à une expérience spécifique.

6.5.1 Analyse inférentielle à travers les trois tâches

Nous désirons comparer les caractéristiques perçues des trois interfaces diffuses utilisées afin de pouvoir tirer des conclusions sur leurs qualités, leurs défauts et leurs attributs fondamentaux en fonction de la tâche supportée. Pour ce faire, il est possible de comparer entre les trois tâches réalisées :

- les variations relatives entre les temps d'exécution de la tâche (c.-à-d.

$$\frac{\text{temps}_{\text{tâche conventionnelle}} - \text{temps}_{\text{tâche avec ordinateur porté}}}{\text{temps}_{\text{tâche conventionnelle}}});$$

- toutes les mesures composites présentées plus haut;

- les différences (c.-à-d. $mesure_{t\grave{a}che\ conventionnelle} - mesure_{t\grave{a}che\ avec\ ordinateur\ port\acute{e}}$) pour la charge physique ressentie, la charge mentale ressentie, et l'effort d'effort d'effort;
- ainsi que les r'ponses aux questions Q29 et Q30 du questionnaire de l'annexe B.

Avant de proc'eder, il est important de d'eterminer si les distributions des donn'ees qui seront compar'ees suivent une distribution normale ou non. Nous avons d'ej' tabl'i que les r'ponses aux questions Q29 et Q30 (cf. section 6.1.1) ainsi que les diff'rences pour la charge physique, la charge mentale et l'effort d'effort d'effort (cf. sections 6.2.5, 6.3.5 et 6.4.5) ne semblaient pas suivre une distribution normale. En ce qui concerne les variations relatives entre les temps d'ex'ecution de la t'ache et les mesures composites, ces derni'eres ne semblent 'egalement pas 'etre normales. En effet de nombreux coefficients d'aplatissement (*kurtosis*) et coefficients d'asym'etrie (*skewness*) sont 'eloign'es de la normale (cf. Tableau 6.6, Tableau 6.19, Tableau 6.31 et Tableau 6.40). De plus, la majorit'e des tests de normalit'e de Shapiro-Wilk (cf. Tableau 6.41 et Tableau 6.42) donnent des r'esultats significatifs (c.-'a-d. $p < 0.05$) nous amenant 'a rejeter l'hypoth'ese nulle d'une distribution normale.

Tableau 6.40 : Variations relatives entre les temps d'exécution de la tâche

	Min.	Max.	Moy.	Écart-type	Asymétrie (a)	Aplatissement (b)
[T1] Diff. rel. temps d'exécution (conventionnelle - avec ordinateur porté)/conventionnelle	-1.17	0.77	0.37	0.435	-2.045	4.487
[T2] Diff. rel. temps d'exécution (conventionnelle - avec ordinateur porté)/conventionnelle	-1.86	0.69	-0.11	0.752	-1.388	0.741
[T3] Diff. rel. temps d'exécution (conventionnelle - avec ordinateur porté)/conventionnelle	0.42	0.92	0.75	0.112	-1.341	1.944

a) Erreur std. asymétrie = 0.427

b) Erreur std. aplatissement = 0.833

Tableau 6.41 : Tests de normalité sur les variations relatives entre les temps d'exécution de la tâche

	Shapiro-Wilk		
	W	DOF	p
[T1] Diff. rel. temps d'exécution (conventionnelle - avec ordinateur porté)/conventionnelle	0.731	30	0.000
[T2] Diff. rel. temps d'exécution (conventionnelle - avec ordinateur porté)/conventionnelle	0.767	30	0.000
[T3] Diff. rel. temps d'exécution (conventionnelle - avec ordinateur porté)/conventionnelle	0.895	30	0.004

Tableau 6.42 : Tests de normalité sur les mesures composites

	Shapiro-Wilk		
	W	DOF	p
[T1] Utilité	0.913	30	0.018
[T1] Efficacité	0.835	30	0.000
[T1] Efficience	0.944	30	0.119
[T1] Satisfaction	0.865	30	0.001
[T1] Utilisabilité	0.928	30	0.044
[T1] Facilité d'apprentissage	0.955	30	0.225
[T2] Utilité	0.914	30	0.019
[T2] Efficacité	0.882	30	0.003
[T2] Efficience	0.976	30	0.719
[T2] Satisfaction	0.936	30	0.069
[T2] Utilisabilité	0.967	30	0.457
[T2] Facilité d'apprentissage	0.948	30	0.154
[T3] Utilité	0.766	30	0.000
[T3] Efficacité	0.720	30	0.000
[T3] Efficience	0.908	30	0.013
[T3] Satisfaction	0.734	30	0.000
[T3] Utilisabilité	0.898	30	0.008
[T3] Facilité d'apprentissage	0.934	30	0.063

Nous avons donc effectué des analyses non-paramétriques de la variance. Ces analyses par rangs de Friedman sont accompagnées au besoin (c.-à-d. si elles sont significatives) de tests post-hoc bilatéraux (*two-tailed*) des rangs signés de Wilcoxon pour toutes les permutations $n=3$ de tâches paires possibles, avec correction de Bonferroni ($1/n=0.333$) au seuil de significativité statistique. Le Tableau 6.43 présente le résumé des analyses de Friedman.

Tableau 6.43 : Analyses de Friedman comparant les interfaces diffuses utilisées pour les trois tâches

	Friedman			
	N	Chi-carré	DOF	p
Diff. rel. temps d'exécution (conventionnelle - avec ordinateur porté)/conventionnelle	30	40.467	2	0.000
Utilité	30	24.945	2	0.000
Efficacité	30	15.129	2	0.000
Efficience	30	10.000	2	0.006
Satisfaction	30	10.038	2	0.006
Utilisabilité	30	24.467	2	0.000
Facilité d'apprentissage	30	2.991	2	0.230
Diff. charge mentale ressentie (conventionnelle - avec ordinateur porté)	30	10.596	2	0.004
Diff. charge physique ressentie (conventionnelle - avec ordinateur porté)	30	2.275	2	0.366
Diff. effort moyen déployé (conventionnelle - avec ordinateur porté)	30	5.912	2	0.050
[Q29] Avec de l'entraînement, l'interface diffuse me permettrait de réaliser la tâche plus rapidement que de façon conventionnelle	30	3.102	2	0.228
[Q30] Avec de l'entraînement, l'interface diffuse me permettrait de réaliser la tâche avec moins d'effort que de façon conventionnelle	30	6.241	2	0.043

Nous constatons que la grande majorité des résultats des analyses de Friedman sont significatifs (Tableau 6.43). Nous rejetons ainsi l'hypothèse nulle (c.-à-d. les mesures / observations proviennent de la même distribution) pour ces données et nous en concluons qu'il existe entre les trois tâches :

- une différence statistique hautement significative dans la variation du temps d'exécution lors de l'utilisation de l'ordinateur porté par rapport à la tâche conventionnelle ($\chi^2=40.467, p<0.001$);
- une différence statistique hautement significative dans l'utilité perçue des interfaces diffuses utilisées ($\chi^2=24.945, p<0.001$);
- une différence statistique hautement significative dans l'efficacité perçue des interfaces diffuses utilisées ($\chi^2=15.129, p<0.001$);
- une différence statistique très significative dans l'efficacité perçue des interfaces diffuses utilisées ($\chi^2=10.000, p=0.006$);
- une différence statistique très significative dans la satisfaction des utilisateurs par rapport aux interfaces diffuses utilisées ($\chi^2=10.038, p=0.006$);
- une différence statistique hautement significative dans l'utilisabilité générale des interfaces diffuses utilisées ($\chi^2=24.467, p<0.001$);
- une différence statistique très significative dans la variation de la charge mentale moyenne ressentie lors de l'utilisation de l'ordinateur porté par rapport à la tâche conventionnelle ($\chi^2=10.596, p=0.004$);
- une différence statistique quasi-significative dans la variation de l'effort moyen déployé lors de l'utilisation de l'ordinateur porté par rapport à la tâche conventionnelle ($\chi^2=5.912, p=0.05$);
- une différence statistique significative dans la perception de l'effort que demanderait avec de l'entraînement l'utilisation des interfaces diffuses proposées par rapport aux tâches conventionnelles ($\chi^2=6.241, p=0.043$).

Les résultats des tests post-hoc effectués afin d'explorer plus avant ces résultats significatifs sont résumés dans le Tableau 6.44. Il est à noter que nous avons inclus les tests pour l'effort moyen qui, dans l'analyse de Friedman, est à la limite du seuil de significativité statistique.

Tableau 6.44 : Tests post-hoc des rangs signés de Wilcoxon pour les analyses de Friedman significatives

	Wilcoxon	
	T	p
[T2] Diff. rel. temps d'exécution (conventionnelle - avec ordinateur porté)/conventionnelle - [T1] Diff. rel. temps d'exécution (conventionnelle - avec ordinateur porté)/conventionnelle	-3,240(a)	0,001
[T3] Diff. rel. temps d'exécution (conventionnelle - avec ordinateur porté)/conventionnelle - [T1] Diff. rel. temps d'exécution (conventionnelle - avec ordinateur porté)/conventionnelle	-4,597(b)	0,000
[T3] Diff. rel. temps d'exécution (conventionnelle - avec ordinateur porté)/conventionnelle - [T2] Diff. rel. temps d'exécution (conventionnelle - avec ordinateur porté)/conventionnelle	-4,762(b)	0,000
[T2] Utilité - [T1] Utilité	-0,185(a)	0,858
[T3] Utilité - [T1] Utilité	-3,910(b)	0,000
[T3] Utilité - [T2] Utilité	-4,270(b)	0,000
[T2] Efficacité - [T1] Efficacité	-0,351(a)	0,746
[T3] Efficacité - [T1] Efficacité	-2,951(b)	0,002
[T3] Efficacité - [T2] Efficacité	-3,426(b)	0,000
[T2] Efficience - [T1] Efficience	-1,461(a)	0,148
[T3] Efficience - [T1] Efficience	-1,913(b)	0,056
[T3] Efficience - [T2] Efficience	-3,699(b)	0,000
[T2] Satisfaction - [T1] Satisfaction	-0,863(b)	0,399
[T3] Satisfaction - [T1] Satisfaction	-3,664(b)	0,000
[T3] Satisfaction - [T2] Satisfaction	-3,151(b)	0,001
[T2] Utilisabilité - [T1] Utilisabilité	-0,329(a)	0,749
[T3] Utilisabilité - [T1] Utilisabilité	-3,672(b)	0,000
[T3] Utilisabilité - [T2] Utilisabilité	-4,577(b)	0,000

Tableau 6.44 : Tests post-hoc des rangs signés de Wilcoxon pour les analyses de Friedman significatives (suite et fin)

[T2] Diff. charge mentale ressentie (conventionnelle - avec ordinateur porté) - [T1] Diff. charge mentale ressentie (conventionnelle - avec ordinateur porté)	-0.913(b)	0.370
[T3] Diff. charge mentale ressentie (conventionnelle - avec ordinateur porté) - [T1] Diff. charge mentale ressentie (conventionnelle - avec ordinateur porté)	-2.281(b)	0.022
[T3] Diff. charge mentale ressentie (conventionnelle - avec ordinateur porté) - [T2] Diff. charge mentale ressentie (conventionnelle - avec ordinateur porté)	-2.141(b)	0.031
[T2] Diff. effort moyen déployé (conventionnelle - avec ordinateur porté) - [T1] Diff. effort moyen déployé (conventionnelle - avec ordinateur porté)	-0.467(a)	0.650
[T3] Diff. effort moyen déployé (conventionnelle - avec ordinateur porté) - [T1] Diff. effort moyen déployé (conventionnelle - avec ordinateur porté)	-2.437(b)	0.013
[T3] Diff. effort moyen déployé (conventionnelle - avec ordinateur porté) - [T2] Diff. effort moyen déployé (conventionnelle - avec ordinateur porté)	-2.227(b)	0.025
[T2Q30] Avec de l'entraînement, l'interface diffuse me permettrait de réaliser la tâche avec moins d'effort que de façon conventionnelle - [T1Q30] Avec de l'entraînement, l'interface diffuse me permettrait de réaliser la tâche avec moins d'effort que de façon conventionnelle	-0.066(b)	0.924
[T3Q30] Avec de l'entraînement, l'interface diffuse me permettrait de réaliser la tâche avec moins d'effort que de façon conventionnelle - [T1Q30] Avec de l'entraînement, l'interface diffuse me permettrait de réaliser la tâche avec moins d'effort que de façon conventionnelle	-2.072(b)	0.047
[T3Q30] Avec de l'entraînement, l'interface diffuse me permettrait de réaliser la tâche avec moins d'effort que de façon conventionnelle - [T2Q30] Avec de l'entraînement, l'interface diffuse me permettrait de réaliser la tâche avec moins d'effort que de façon conventionnelle	-2.500(b)	0.020

a) Basé sur les rangs positifs.

b) Basé sur les rangs négatifs.

La correction de Bonferroni est parfois jugée trop conservatrice, cependant, la procédure de Holm-Bonferroni (procédure de test fermée contrôlant le taux d'erreur par famille pour toutes les hypothèses) donne des résultats identiques au niveau de la sélection des résultats statistiquement significatifs. D'après ce qui précède, nous pouvons tirer plusieurs conclusions intéressantes (cf. Tableau 6.45).

Tableau 6.45 : Différences statistiquement significatives entre les interfaces diffuses utilisées pour les trois tâches

	Conclusion (I _x = Interface diffuse utilisée pour la tâche x)	Variation (estimée à partir des moyennes)
Diff. rel. temps d'exécution (conventionnelle - avec ordinateur porté)/conventionnelle	I3 > I1 > I2	Réduction de 38%* de plus avec I3 versus I1 Réduction de 48%* de plus avec I1 versus I2
Utilité	I3 > I2 I3 > I1	I3 19% plus utile que I2 I3 19% plus utile que I1
Efficacité	I3 > I2 I3 > I1	I3 14% plus efficace que I2 I3 12% plus efficace que I1
Efficiace	I3 > I2	I3 12% plus efficiente que I2
Satisfaction	I3 > I2 I3 > I1	I3 12% plus satisfaisante que I2 I3 17% plus satisfaisante que I1
Utilisabilité	I3 > I2 I3 > I1	I3 14% plus utilisable que I2 I3 14% plus utilisable que I1
Diff. effort moyen déployé (conventionnelle - avec ordinateur porté)	I3 > I1	Réduction de 11%* de plus avec I3 versus I1

* = Simple différence puisque les moyennes représentent déjà des pourcentages.

Nous constatons que l'interface diffuse utilisée pour la tâche 3 (gestion bancaire) permet une réduction relative du temps de réalisation de la tâche plus importante que les deux autres interfaces diffuses. Aussi, l'interface diffuse utilisée pour la tâche 1 (gestion d'horaire) permet une réduction relative du temps de réalisation de la tâche plus importante que celle utilisée pour la tâche 2 (recherche bibliographique). Nous en concluons que, en termes d'amélioration du temps d'exécution, l'interface 3 est supérieure à l'interface 1 qui est elle-même supérieure à l'interface 2.

Nous constatons également que l'interface 3 est perçue par les utilisateurs comme étant plus utile et plus efficace, que les utilisateurs sont plus satisfaits lors de son emploi, et

que son utilisabilité générale est plus importante comparativement aux deux autres interfaces diffuses. De plus, l'interface 3 est perçue comme étant plus efficace que l'interface 2. Finalement, nous constatons que cette même interface réduit l'effort moyen déployé par les utilisateurs de façon plus significative que l'interface diffuse utilisée pour la tâche 1.

6.5.2 Évaluation comparative par les participants

Le Tableau 6.46 résume pour la section 5 du questionnaire la distribution des réponses des participants, ainsi que leur mode.

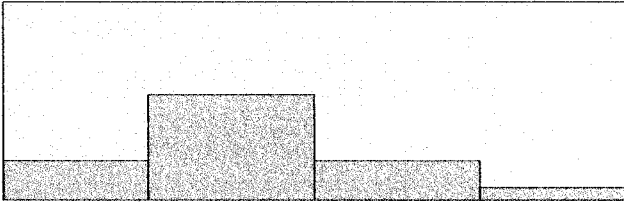
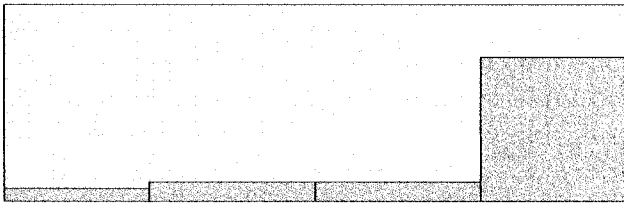
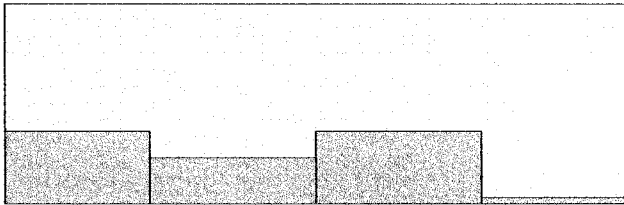
Tableau 6.46 : Comparaison des interfaces diffuses utilisées

	Distribution des réponses				Statistiques
	Aucune en particulier	Tâche 1 (gestion d'horaire)	Tâche 2 (recherche biblio.)	Tâche 3 (gestion bancaire)	Mode
[Q34] Interface diffuse la plus facile à apprendre	0 (0.0%)	7 (23.3%)	4 (13.3%)	19 (63.3%)	Tâche 3 (gestion bancaire)
[Q35] Interface diffuse la plus difficile à apprendre	11 (36.7%)	6 (20.0%)	12 (40.0%)	1 (3.3%)	Tâche 2 (recherche biblio.)

Tableau 6.46 : Comparaison des interfaces diffuses utilisées (suite)

[Q36] Interface diffuse la plus facile à utiliser	<p>0 (0.0%) 10 (33.3%) 3 (10.0%) 17 (56.7%)</p>	Tâche 3 (gestion bancaire)
[Q37] Interface diffuse la plus difficile à utiliser	<p>4 (13.3%) 8 (26.7%) 17 (56.7%) 1 (3.3%)</p>	Tâche 2 (recherche biblio.)
[Q38] Interface diffuse la plus intuitive	<p>0 (0.0%) 10 (33.3%) 8 (26.7%) 12 (40.0%)</p>	Tâche 3 (gestion bancaire)
[Q39] Interface diffuse la moins intuitive	<p>7 (23.3%) 5 (16.7%) 14 (46.7%) 4 (13.3%)</p>	Tâche 2 (recherche biblio.)
[Q40] Interface diffuse la plus utile	<p>1 (3.3%) 5 (16.7%) 6 (20.0%) 18 (60.0%)</p>	Tâche 3 (gestion bancaire)

Tableau 6.46 : Comparaison des interfaces diffuses utilisées (suite et fin)

[Q41] Interface diffuse la moins utile	 <p>6 (20.0%) 16 (53.3%) 6 (20.0%) 2 (6.7%)</p>	Tâche 1 (gestion d'horaire)
[Q42] Interface diffuse la mieux intégrée à la tâche	 <p>2 (6.7%) 3 (10.0%) 3 (10.0%) 22 (73.3%)</p>	Tâche 3 (gestion bancaire)
[Q43] Interface diffuse la moins bien intégrée à la tâche	 <p>11 (36.7%) 7 (23.3%) 11 (36.7%) 1 (3.3%)</p>	Tâche 2 (recherche biblio.)

Afin de déterminer si les réponses recueillies sont statistiquement significatives, nous avons réalisé pour chacune des questions un test du chi-carré de Pearson (*chi-square goodness-of-fit test*) en éliminant au préalable les réponses « Aucune en particulier » (nous avons assimilé ces dernières à un refus des participants de se prononcer). Pour chacun des tests, l'hypothèse nulle est que la distribution des réponses est uniforme (ce qui signifie qu'il n'y a pas de différences entre les trois interfaces diffuses utilisées). Le Tableau 6.47 présente les résultats des tests.

Tableau 6.47 : Tests du chi-carré de Pearson pour la comparaison des interfaces

	Chi-carré	DOF	p	Catégorie	n observé	n attendu
[Q34] Interface diffuse la plus facile à apprendre	12.600	2	0.002	Gestion d'horaire	7	10.0
				Recherche bibliographique	4	10.0
				Gestion bancaire	19	10.0
[Q35] Interface diffuse la plus difficile à apprendre	9.579	2	0.009	Gestion d'horaire	6	6.3
				Recherche bibliographique	12	6.3
				Gestion bancaire	1	6.3
[Q36] Interface diffuse la plus facile à utiliser	9.800	2	0.009	Gestion d'horaire	10	10.0
				Recherche bibliographique	3	10.0
				Gestion bancaire	17	10.0
[Q37] Interface diffuse la plus difficile à utiliser	14.846	2	0.001	Gestion d'horaire	8	8.7
				Recherche bibliographique	17	8.7
				Gestion bancaire	1	8.7
[Q38] Interface diffuse la plus intuitive	0.800	2	0.705	Gestion d'horaire	10	10.0
				Recherche bibliographique	8	10.0
				Gestion bancaire	12	10.0
[Q39] Interface diffuse la moins intuitive	7.913	2	0.024	Gestion d'horaire	5	7.7
				Recherche bibliographique	14	7.7
				Gestion bancaire	4	7.7
[Q40] Interface diffuse la plus utile	10.828	2	0.005	Gestion d'horaire	5	9.7
				Recherche bibliographique	6	9.7
				Gestion bancaire	18	9.7
[Q41] Interface diffuse la moins utile	13.000	2	0.001	Gestion d'horaire	16	8.0
				Recherche bibliographique	6	8.0
				Gestion bancaire	2	8.0
[Q42] Interface diffuse la mieux intégrée à la tâche	23.786	2	0.000	Gestion d'horaire	3	9.3
				Recherche bibliographique	3	9.3
				Gestion bancaire	22	9.3
[Q43] Interface diffuse la moins bien intégrée à la tâche	3.000	2	0.017	Gestion d'horaire	7	6.3
				Recherche bibliographique	11	6.3
				Gestion bancaire	1	6.3

Les résultats obtenus confirment plusieurs conclusions tirées dans la section précédente : l'interface 3 (gestion bancaire) est perçue par les utilisateurs comme étant la plus facile à utiliser, la plus utile, et de façon générale la mieux intégrée à la tâche. De plus, nous constatons ici que l'interface 2 (recherche bibliographique) est perçue comme étant la plus difficile des trois à apprendre et à utiliser, la moins intuitive, et de façon générale la moins bien intégrée à la tâche.

6.5.3 Analyse en fonction du profil des sujets

Pour les trois tâches, des tests de Kruskal-Wallis n'ont pas révélé, pour les hommes versus les femmes, selon le niveau de familiarité des sujets avec l'informatique ou selon l'attitude des sujets face aux nouvelles technologies, de différences statistiquement significatives entre les distributions des temps d'exécution, des nombres d'erreurs commises, des mesures composites formant l'utilisabilité (utilité, efficacité, efficience et satisfaction), de l'utilisabilité perçue, de la facilité d'apprentissage, de la précision des gestes pour la tâche 2, des charges physique et mentale moyennes ressenties ainsi que de l'effort moyen déployé par les sujets. Il est intéressant de mentionner ceci puisque, par exemple, les tâches font intervenir des manipulations d'artéfacts (tâches spatiales) et que les femmes (ou les hommes) auraient pu avoir plus de difficulté (ou de facilité) à les réaliser. Une exception a cependant révélé, pour la tâche 1, une différence statistiquement significative ($\chi^2=8.653$, $p=0.003$) entre les distributions de l'efficacité

perçue pour les hommes versus les femmes (24% plus élevée pour les femmes, basé sur les moyennes).

De plus, les coefficients de corrélation des rangs de Spearman ont révélé des corrélations faibles mais statistiquement significatives entre l'âge des sujets et plusieurs variables (cf. Tableau 6.48). Notamment, pour la tâche 3, une corrélation négative avec l'effort moyen déployé avec l'ordinateur porté et, pour la tâche 2, une corrélation positive avec le temps d'exécution de la tâche avec l'ordinateur porté et des corrélations négatives avec les différences absolues et relatives entre les temps d'exécution.

Tableau 6.48 : Corrélations statistiquement significatives avec l'âge des sujets

	Spearman	
	r_s	p
[T2] Temps d'exécution (avec ordinateur porté)	0.415	0.023
[T2] Diff. temps d'exécution (conventionnelle - avec ordinateur porté)	-0.512	0.004
[T2] Diff. rel. temps d'exécution (conventionnelle - avec ordinateur porté)/conventionnelle	-0.445	0.014
[T3] Effort moyen déployé (avec ordinateur porté)	-0.441	0.015

6.5.4 Acceptabilité de la technologie

Le Tableau 6.49 résume pour la section 6 du questionnaire la distribution des réponses aux énoncés de Likert, ainsi que leur médiane, leur moyenne et leur écart-type.

Tableau 6.49 : Réponses aux énoncés de Likert pour l'acceptabilité de la technologie

	Distribution des réponses (de 1=fortement en désaccord à 5=fortement d'accord)					Statistiques		
	1	2	3	4	5	Méd.	Moy.	Éc. type
[Q44] Les ordinateurs portés présentent un potentiel certain						5.00	4.47	0.730
[Q45] S'ils étaient miniaturisés et adéquatement intégrés à des vêtements, j'aimerais utiliser un ordinateur porté au quotidien						4.00	3.83	1.289
[Q46] Les interfaces diffuses présentent un potentiel certain						5.00	4.40	0.770
[Q47] Si la technologie le permettait, je préférerais utiliser une interface diffuse pour réaliser certaines tâches quotidiennes						4.00	4.07	1.081

Tableau 6.49 : Réponses aux énoncés de Likert pour l'acceptabilité de la technologie
(suite et fin)

[Q48] Une interface diffuse est appropriée pour interagir avec un ordinateur porté						4.00	4.23	0.679
	0 (0.0%)	0 (0.0%)	4 (13.3%)	15 (50.0%)	11 (36.7%)			

En synthétisant ces énoncés élémentaires, nous obtenons une mesure composite (échelle de Likert) quantifiant l'acceptabilité de la technologie (Tableau 6.50).

Tableau 6.50 : Mesure composite de l'acceptabilité de la technologie

	Min.	Max.	Moy.	Écart-type	Asymétrie (a)	Aplatissement (b)
Acceptabilité de la technologie	2.40	5.00	4.20	0.675	-0.901	0.703

a) Erreur std. asymétrie = 0.427

b) Erreur std. aplatissement = 0.833

Des tests de Kruskal-Wallis n'ont pas révélé de différence statistiquement significative entre les distributions de l'acceptabilité de la technologie pour les hommes versus les femmes ($\chi^2=0.276$, $p=0.613$), ni selon les différents niveaux de familiarité des sujets avec l'informatique ($\chi^2=1.420$, $p=0.772$). De plus, le coefficient de corrélation des rangs de Spearman n'a révélé aucune corrélation significative entre les mesures composites d'acceptabilité de la technologie et l'âge des sujets ($r_s=0.031$, $p=0.869$).

Cependant, un test de Kruskal-Wallis a révélé une différence statistiquement significative ($\chi^2=6.533$, $p=0.017$) entre les distributions de l'acceptabilité de la

technologie selon l'attitude des sujets face aux nouvelles technologies (Q6 du questionnaire). Le coefficient de corrélation des rangs Tau de Kendall indique qu'il existe une corrélation positive significative mais faible entre ces deux variables ($\tau_b=0.400, p=0.011$), ce qui n'est pas du tout surprenant.

6.6 Discussion

L'analyse des mesures composites révèle que le paradigme d'interaction proposé est clairement adapté aux ordinateurs portés puisque les interfaces diffuses développées sont toutes perçues par les utilisateurs comme étant faciles à apprendre, utiles, efficaces, efficientes, satisfaisantes et, de façon générale, utilisables. Les moyennes composites sont en effet toutes près de ou dépassent un score de quatre sur cinq. Il existe cependant certaines disparités méritant d'être explorées entre les interfaces développées, celle de la tâche 3 étant perçue comme supérieure aux deux autres sur presque tous les points.

Avant de discuter plus avant des résultats obtenus et des observations recueillies, il est important de se remémorer les caractéristiques principales des trois tâches lorsque réalisées avec l'ordinateur porté (Tableau 6.51).

En fonction de ces caractéristiques, nous nous penchons dans les pages qui suivent sur plusieurs aspects notables des interfaces diffuses étudiées : performances, interactions implicites versus interactions explicites, choix de conception faits pour les interactions explicites, comparaison avec des interfaces plus traditionnelles ainsi que présentation d'information.

Tableau 6.51 : Caractéristiques des tâches lorsque réalisées avec l'ordinateur porté

Catégorie	Caractéristique	Tâche 1 (gestion d'horaire)	Tâche 2 (recherche biblio.)	Tâche 3 (gestion bancaire)
Rôles de l'ordinateur porté	Accès à de l'information	✓		✓
	Saisie de données		✓	✓
	Support à la prise de décision		✓	
Artéfacts de la tâche	Artéfact unique	✓		
	Artéfacts multiples		✓	✓
Interactions avec le ou les artéfacts	Interactions individuelles	✓	✓	✓
	Interactions conjointes			✓
	Interaction avec des sous-entités	✓	✓	
	Interactions implicites	✓	✓	✓
	Interactions explicites		✓	✓

6.6.1 Analyse des performances

À travers les expériences réalisées, nous constatons que l'utilisation d'un ordinateur porté doté d'une interface diffuse permet toujours, par rapport à la tâche conventionnelle, de diminuer la charge mentale perçue par les utilisateurs ainsi que l'effort moyen qu'ils déploient pour réaliser la tâche, tout en conservant la charge physique perçue au même niveau et en diminuant le temps d'exécution de façon significative dans deux cas sur trois. Même si l'introduction d'une technologie novatrice entraîne généralement une réingénierie de la tâche, et l'émergence de nouvelles façons d'accomplir les buts associés, les tâches réalisées de façon conventionnelle restent un

point de référence permettant d'évaluer indirectement la tâche réalisée avec l'ordinateur porté. Nos résultats sont ainsi des plus encourageants et illustrent clairement les capacités des interfaces diffuses. Pour des tâches simples, ils tendent en effet à indiquer que les utilisateurs sont en mesure d'accéder de façon relativement transparente au support à la tâche par le biais des interfaces diffuses développées. Pour de telles tâches, un ordinateur porté doté d'une interface diffuse présente un coût d'utilisation, en termes de ressources physiques, perceptuelles et cognitives devant lui être consacré, qui semble négligeable par rapport aux bénéfices pouvant en être retirés par les utilisateurs, et ce peu importe le rôle joué par l'ordinateur porté.

Il est aussi intéressant de noter l'existence de mesures extrêmes (*outliers*), aussi bien pour les tâches réalisées de façon conventionnelle que celles réalisées à l'aide de l'ordinateur porté. De telles mesures font en sorte que les données ne peuvent souvent pas être assimilées à des distributions normales. Il faut cependant comprendre que de telles mesures sont légitimes et qu'elles ne doivent pas être éliminées puisqu'elles fournissent des informations importantes. En effet, lors de tests d'utilisabilité, il se produit presque toujours un effet plancher, par exemple pour les temps d'exécution mesurés. Il est ainsi impossible pour des sujets d'être plus rapides qu'un minimum donné, peu importe leur façon de procéder ou les ressources qu'ils déploient. Cependant, suite à la réingénierie de la tâche et comme tendent à le montrer les graphiques des courbes d'apprentissage présentées, un tel plancher peut bien évidemment être différent lors de l'utilisation de l'ordinateur porté. Les performances plus pauvres de certains utilisateurs (temps d'exécutions extrêmement longs par exemple), bien qu'elles soient

quelquefois corrélées pour les deux façons de faire une tâche donnée, ne semblent pas quant à elles corrélées entre les tâches ou causées par des caractéristiques persistantes des utilisateurs.

6.6.2 Interactions implicites versus interactions explicites

Selon les données et les observations recueillies auprès des sujets, les interfaces diffuses faisant principalement appel à des gestes implicites pour accéder à de l'information semblent être les mieux intégrées à la tâche ainsi que les plus faciles à apprendre et à utiliser. Ceci vient appuyer, pour le nouveau paradigme d'interaction proposé, le principe de greffe sur des actions se produisant naturellement au cours de la tâche que nous avons mis de l'avant. Les observations et les commentaires post-expérimentaux recueillis tendent également à montrer que ce paradigme est consistant avec, et permet de soutenir, la cognition située des utilisateurs. Ces derniers semblent en effet proactifs au niveau macroscopique mais plutôt réactifs au niveau microscopique. Le niveau microscopique peut ainsi directement être supporté par des interactions implicites, puisque ces dernières ne nécessitent pas de transition pour aller récupérer l'interaction à effectuer dans la mémoire à court ou à long terme, tandis que les interactions explicites doivent plutôt être planifiées au niveau macroscopique. Les interactions implicites s'avèrent donc des plus appropriées pour la requête d'informations brèves, quasi-opportunistes, via les artéfacts de la tâche lorsque ces informations sont conceptuellement associées dans l'esprit de l'utilisateur à l'interaction qui les révèle. Les interactions explicites se prêtent bien pour leur part à l'entrée de données ou la

manipulation d'information qui tendent nécessairement à être planifiées d'avance. Finalement, nous avons constaté qu'il semble essentiel que l'information obtenue via une interaction implicite soit utilisable immédiatement ou dans un futur très rapproché afin de ne pas décontenancer l'utilisateur. Par exemple, au cours de la tâche 1, la possibilité d'accéder à toutes les heures de passage semblait parfois ralentir certains sujets. Ceci aurait certainement pu être mitigé si d'autres informations du contexte avaient été disponibles (habitudes de l'utilisateur, coordonnées GPS, etc.) pour restreindre la portée de cette interaction implicite.

6.6.3 Conception d'interactions explicites

Plusieurs leçons peuvent être tirées en comparant les interactions explicites implémentées pour la tâche 2 et la tâche 3. Selon les utilisateurs, l'interface diffuse utilisée pour la tâche 2 est facile à apprendre (cf. par exemple T2Q9), les interactions étant conceptuellement simples. Cependant, le geste explicite implémenté semble difficile à réaliser et gagnerait à mieux être intégré au flot des activités de la tâche. Ceci est reflété directement par le nombre d'erreurs qui augmente drastiquement pour la tâche 2 réalisée à l'aide de l'ordinateur porté versus de façon conventionnelle. Pour les interactions explicites, le choix de l'ancre cognitive associée reste important, puisque cette dernière permet de favoriser la facilité d'apprentissage du geste retenu et de réduire la charge mentale lors du rappel de l'interaction, mais il est aussi nécessaire de considérer la nature des artéfacts à manipuler et les limitations de l'utilisateur. Ainsi, pour la tâche 2, l'exécution du geste explicite requiert l'utilisation des deux mains du

sujet qui doivent être positionnées, dans son champ de vision, à la fois entres elles et par rapport à une sous-partie d'un artéfact devant être maintenu dans un état spécifique (c.-à-d. s'assurer que le livre reste ouvert à la bonne page). Ces facteurs font en sorte que, du point de vue de l'utilisateur, l'interface diffuse associée à la tâche 2 est la plus difficile à utiliser. Même si elle a nécessité une réingénierie plus poussée de la tâche, l'interface diffuse utilisée pour la tâche 3 présente de bien meilleures performances humaines. Les interactions explicites ont en effet été construites autour de manipulations conjointes, beaucoup plus faciles à exécuter. Au lieu d'accéder à une fonctionnalité via une action directe et spécifique face à une entité, les manipulations conjointes permettent à l'utilisateur d'exposer cette fonctionnalité en créant des relations significatives entre les artéfacts de la tâche (proximité de deux objets, leur positionnement relatif, etc.). Les manipulations conjointes font directement appel à la cognition distribuée de l'utilisateur et à sa capacité à gérer et à organiser son environnement. Ainsi que nous l'avons constaté, et lorsqu'elles sont adéquatement intégrées à la tâche, de telles manipulations semblent augmenter la facilité de réalisation perçue de la tâche et rendent une interface diffuse plus intuitive.

6.6.4 Comparaison avec des paradigmes d'interaction traditionnels

La tâche 3 est des plus intéressantes puisqu'elle permet de comparer indirectement une interface diffuse à une interface traditionnelle (interface web). Les performances obtenues pour la tâche conventionnelle peuvent ainsi être vues comme étant une borne supérieure des performances qu'il aurait été possible d'obtenir en transposant telle quelle

l'interface traditionnelle sur l'ordinateur porté, sans tenir compte des limitations physiques, des restrictions matérielles ou des contraintes liées à la nomadicité. À la lumière des résultats obtenus, nous pouvons conclure qu'une interface diffuse semble beaucoup plus appropriée pour un ordinateur porté qu'une interface pointer-cliquer traditionnelle puisque ses performances sont supérieures en termes de temps d'exécution, de nombre d'erreurs commises, de charge mentale ressentie, d'effort moyen déployé, etc.

Dans cette même optique, nous avons déjà étudié [59] l'utilisation de techniques d'interaction associées aux interfaces diffuses (c.-à-d. des gestes usuels tels que saisir ou balayer de la main), versus des techniques plus traditionnelles faisant appel à un Twiddler2 (c.-à-d. utilisation uniquement de touches fonction et utilisation d'une interface pointer-cliquer). Nous avons constaté que, pour initier le dialogue avec l'ordinateur porté et signifier l'intérêt ou le désintérêt envers un certain type d'information, des techniques d'interaction basées sur des actions tangibles et évocatrices prennent moins de temps, engendrent moins d'erreurs et semblent être mieux reçues par les utilisateurs. Les interfaces diffuses constituent ainsi, à travers des gestes usuels, un moyen efficace et rapide d'accéder aux fonctionnalités de l'ordinateur porté dans un contexte mobile. De telles techniques ne sont bien entendu pas destinées à soutenir un dialogue continu avec l'ordinateur porté, d'autres paradigmes d'interaction sont probablement mieux adaptés pour ce faire, mais elles évitent de coûteuses transitions entre l'espace de la tâche et l'espace du support à la tâche, tout en éliminant

l'utilisation de périphériques dédiés pour l'accès à de l'information, la saisie de données légères ou le soutien à la prise de décision.

6.6.5 Présentation d'information et niveaux d'attention

Pour toutes les interfaces diffuses développées, et malgré les capacités de traitement relativement limitées de la plate-forme centrale, les techniques de traitement de l'information utilisées permettent des temps de réponse adéquats (taux de rafraîchissement autour de 12fps). Ainsi, au travers des trois tâches, les utilisateurs perçoivent ces interfaces comme étant rapides (c.-à-d. réactives). Il est cependant intéressant de constater que les utilisateurs perçoivent l'interface de la tâche 3 comme étant plus réactive que les deux autres alors que ce n'est techniquement pas le cas. Ceci pourrait être expliqué par la boucle de rétroaction créée lors de l'exécution du geste explicite qui donne à l'utilisateur un contrôle granulaire sur le flot de transfert d'une carte à l'autre et sur l'interaction avec l'ordinateur porté, comparativement aux autres tâches où l'information nécessaire est présentée directement à l'utilisateur suite à un geste.

Nous avons également constaté en observant les sujets à l'œuvre que leurs attentes vis-à-vis l'information dévoilée par des gestes implicites sont différentes selon les interfaces diffuses. En effet, pour la tâche 3, l'attention de l'utilisateur est essentiellement concentrée sur les artéfacts manipulés. L'utilisateur est donc en mesure de remarquer et d'assimiler immédiatement toute information présentée. Il n'en est pas autant pour les autres tâches. Pour la tâche 2 par exemple, les artéfacts multiples en présence et les

processus décisionnels monopolisent respectivement l'attention de l'utilisateur et ses facultés mentales. L'ordinateur porté, qui tente d'attirer l'attention de l'utilisateur pour orienter sa prise de décision, entre alors en compétition avec de nombreux autres stimuli pour les ressources limitées de l'utilisateur. Il existe ainsi différents niveaux pour l'attention humaine disponible qui doivent être pris en compte lors de la conception d'une interface diffuse.

La présentation de l'information par superposition des données aux entités d'intérêt dans la vue du monde réel semble quant à elle convenir aux utilisateurs (cf. Q15 pour les trois tâches). Couplée à un dévoilement progressif, elle permet de garder l'information présentée localisée et concise (cf. Q26 pour les trois tâches). Cependant, une meilleure intégration à l'environnement (registration tridimensionnelle par exemple) serait certainement à investiguer lorsque la technologie le permettra. Dans cette optique, nous avons déjà étudié [61] des techniques de présentation d'information via une modification des propriétés perçues des entités de l'environnement apparentée à une synesthésie artificielle. Les résultats préliminaires sont encourageants et montrent par exemple une augmentation des performances pour la mémorisation et le rappel de structures au contenu aléatoire (Figure 6.6) et la recherche d'entités irrégulières via l'expérience classique de Ramachandran (Figure 6.7). Ceci confirme qu'il est possible d'utiliser les propriétés perçues des entités de l'environnement pour véhiculer de l'information utilisable.

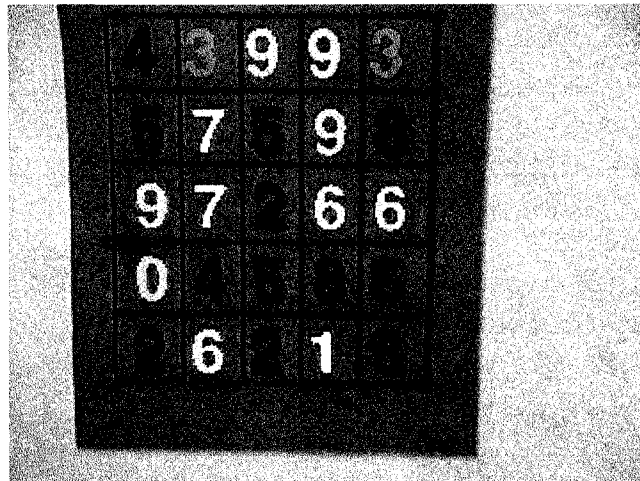


Figure 6.6 : Synesthésie artificielle via l'ordinateur porté (tâche de mémorisation)

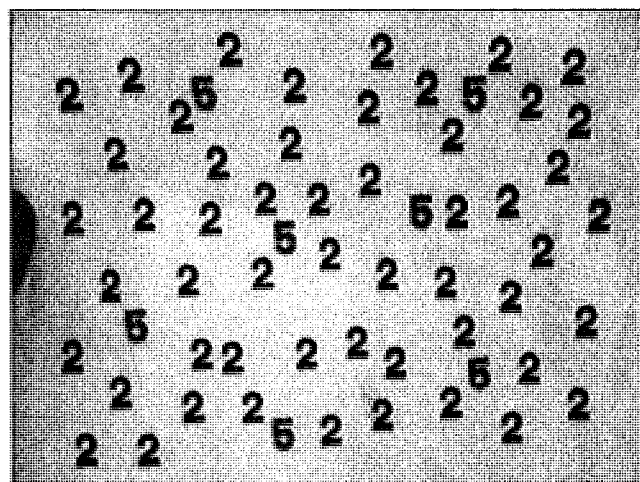


Figure 6.7 : Synesthésie artificielle via l'ordinateur porté (tâche de recherche)

6.6.6 Évolution des modes opératoires

Lors de la tâche 1 réalisée de façon répétitive, nous avons remarqué l'utilisation par les sujets de deux manières de procéder : certains continuaient à chercher la bonne intersection avant d'accéder à l'information virtuelle associée, tandis que d'autres semblaient ajuster directement les données présentées par l'ordinateur porté d'un

mouvement du doigt jusqu'à trouver l'information requise. Ainsi, même si une interface diffuse est construite autour d'une façon particulière de réaliser une tâche, de nouveaux modes opératoires peuvent émerger spontanément et même suite à une brève utilisation de l'interface. Ceci tend à confirmer que les concepteurs d'interfaces diffuses devraient offrir une certaine souplesse dans les séquences d'interactions permises ou encore laisser les utilisateurs définir ou modifier eux-mêmes les associations entités-actions-fonctionnalités utilisées pour une tâche donnée, même s'il n'est pas trivial de le faire.

CHAPITRE 7 : CONCLUSION

Ce chapitre récapitule en premier lieu les connaissances acquises à travers des lignes directrices pour guider la conception, le développement et l'évaluation d'interfaces diffuses. Nous résumons brièvement ensuite les objectifs atteints et les contributions majeures de cette thèse à l'avancement des connaissances. Nous terminons en présentant les avenues de recherches qui semblent prometteuses dans le domaine des interactions humain-ordinateur porté.

7.1 Synthèse

Cette thèse a abordé le problème complexe de création d'un paradigme d'interaction humain-ordinateur porté approprié. À la lumière des résultats obtenus, nous sommes convaincus que les interfaces diffuses présentent un potentiel intéressant pour le support de tâches. La création d'interfaces humain-ordinateur porté diffuses n'est cependant pas simple. En synthétisant l'expérience accumulée lors du développement de notre plateforme portée et des prototypes d'interfaces diffuses créés ainsi que les résultats et les observations recueillies, il est toutefois possible d'élaborer des lignes directrices fondamentales, regroupées en trois grands axes, et destinées à guider leur conception,

leur développement et leur évaluation. Notons que nous nous concentrons sur les spécificités des interfaces diffuses sans réitérer les lignes directrices génériques applicables à la majorité des interfaces humain-ordinateur.

7.1.1 Lignes directrices pour la conception

Les lignes directrices ci-dessous se rapportent à la conception des interfaces diffuses et des mécanismes d'interaction associés :

- Ne pas utiliser une interface diffuse si des interactions soutenues et prolongées avec l'ordinateur porté sont requises.
- Partir de l'analyse de la tâche pour déterminer les artefacts exploitables pour la conception d'une interface diffuse.
- Analyser l'environnement immédiat de l'utilisateur au cours de la tâche pour déterminer si d'autres artefacts en présence pourraient être utilisés ou non pour l'interface diffuse (c.-à-d. pour l'introduction d'interactions explicites).
- Définir les associations entités-actions-fonctionnalités intuitives selon les caractéristiques des entités, les concepts qu'elles véhiculent, les comportements qu'elles suggèrent, ainsi que les manipulations utilisées et les modalités sollicitées lors de la réalisation de la tâche de façon conventionnelle.
- Privilégier des interactions implicites pour l'accès à de l'information ou initier le dialogue avec l'ordinateur porté.
- Ancrer les interactions explicites dans un concept évocateur déjà assimilé par l'utilisateur afin de diminuer les ressources mentales requises.

- Pour les interactions explicites, en présence de plusieurs artefacts, favoriser des manipulations conjointes lorsque les artefacts sont aisément maniables ou lorsque l'utilisateur a tendance à distribuer sa cognition dans son environnement de travail.
- Lors de la conception de mécanismes d'interaction implicites ou explicites, garder à l'esprit les capacités et les limites des composantes matérielles portées utilisées (résolution du dispositif d'affichage par exemple) et celles de l'utilisateur (en termes de charge physique, de charge mentale et d'effort engendrés par l'interaction).

7.1.2 Lignes directrices pour le développement

Les lignes directrices ci-dessous sont liées à l'implémentation des interfaces diffuses conçues :

- Minimiser les restrictions imposées à l'utilisateur et éviter de gêner indûment ses facultés et ses activités usuelles.
- Utiliser des capteurs permettant de dupliquer pour l'ordinateur porté les données perçues par les sens de l'utilisateur utilisés au cours de la tâche.
- Faire appel au besoin à des variables de substitution (*proxy*) pour pallier aux ressources limitées de l'ordinateur porté, simplifier la détection et la reconnaissance du contexte et l'interaction avec des artefacts de la tâche.
- Tirer avantage des informations du contexte pour restreindre les interactions implicites possibles et/ou leur portée à un instant donné.

- Pour les interactions explicites, rechercher, lorsque possible, une fine granularité dans les interactions.
- Dévoiler l'information de façon progressive, en respectant le principe du juste-à-temps, pour limiter la quantité d'information présentée à l'utilisateur.
- Gérer adéquatement l'attention de l'utilisateur via l'implémentation de mécanismes de gestion dans la couche Présentation.
- Privilégier l'intégration de l'information présentée au monde réel pour favoriser sa détection et son assimilation rapide par l'utilisateur (par le biais d'un placement localisé, en l'encodant dans les propriétés des entités de l'environnement, etc.).

7.1.3 Lignes directrices pour l'évaluation

Les lignes directrices ci-dessous se rapportent à l'évaluation des interfaces diffuses développées :

- Évaluer les performances techniques et humaines de l'interface diffuse en fonction de la tâche, de l'utilisateur mais aussi du contexte.
- Capturer et sauvegarder si possible le contexte tel que perçu par l'utilisateur au cours de la tâche afin de pouvoir expliquer ses réactions et ses décisions lors de l'interaction avec l'ordinateur porté.
- Raffiner l'interface diffuse, et les mécanismes d'interaction associés, en fonction des comportements des utilisateurs face à cette interface et des modes opératoires émergents observés lors de son évaluation.

7.2 Contributions

La contribution fondamentale de cette thèse à l'avancement des connaissances scientifiques et techniques est liée au domaine des interfaces humain-ordinateur porté : elle porte sur la conception, le développement et l'évaluation d'un nouveau paradigme d'interaction, fonctionnel et approprié, pour les ordinateurs portés. Ce paradigme, basé sur une diffusion de l'interface humain-ordinateur porté dans l'environnement de l'utilisateur, permet d'aboutir à une interface intrinsèquement locale s'appuyant sur les artefacts de la tâche. Il s'agit là d'une contribution majeure car les paradigmes et les techniques d'interactions associés aux interfaces humain-ordinateur conventionnelles, utilisés actuellement dans le domaine de l'informatique portée, n'y sont clairement pas adaptés. En faisant disparaître les métaphores et les périphériques traditionnels les interfaces diffuses nous rapprochent d'une intégration transparente de l'ordinateur porté à la tâche.

Plus spécifiquement, cette thèse contribue à l'avancement des connaissances sur plusieurs plans :

- en articulant le concept d'interface diffuse et en justifiant la raison d'être de ce nouveau paradigme d'interaction en fonction des caractéristiques fondamentales des ordinateurs portés, de leurs rôles et des besoins des utilisateurs mobiles;
- en présentant des résultats expérimentaux sur l'évaluation de la performance technique mais surtout de la performance humaine (utilisabilité, charge mentale, etc.) du nouveau paradigme d'interaction proposé pour les trois prototypes d'interface diffuse développés;

- en illustrant, pour des tâches simples, les capacités et les limites de techniques d'interaction basées les artefacts liés à ces tâches pour l'implémentation d'interfaces diffuses;
- en synthétisant le corps de nouvelles connaissances acquises à travers des lignes directrices et des principes d'ingénierie permettant de guider la conception et le développement pour les ordinateurs portés d'interfaces diffuses appropriées, utilisables et faciles à apprendre.

Les contributions de cette thèse à la recherche appliquée et au développement de la technologie sont également multiples. Elles se résument principalement à :

- la conception d'une architecture matérielle et le développement d'une plateforme de test portée modulaire basée sur des technologies génériques;
- la conception d'une architecture logicielle en couches, générique et réutilisable, permettant de supporter la création d'interfaces diffuses;
- la conception, le développement, le test et l'évaluation de prototypes d'interfaces diffuses permettant d'interagir avec un ordinateur porté pour le support de trois tâches simples;
- le développement de mécanismes d'interaction réutilisables basés sur le traitement d'images du champ de vision de l'utilisateur et pouvant être adaptés ou étendus à d'autres tâches ou scénarios d'utilisation.

7.3 Futures avenues de recherche

L'informatique portée est un domaine pluridisciplinaire en constante évolution et offrant de nombreuses avenues de recherche potentielles, que ce soit au niveau matériel (miniaturisation, intégration textile, etc.), logiciel (traitement contextuel, réalité interposée, etc.) ou applicatif (création d'applications industrielles, d'applications centrées sur l'utilisateur, etc.). Il semble cependant clair que l'interface humain-ordinateur porté demeure une composante clé qui permettra à terme de tendre vers un outil, et des interactions, mieux intégrés au flot des activités humaines. Dans cette optique, nous sommes convaincus que plus de recherches sur les interfaces diffuses s'imposent afin de pouvoir appliquer ce nouveau paradigme d'interaction à un vaste éventail de tâches ainsi qu'à nombre d'utilisateurs éventuels. Il semble ainsi crucial de poursuivre la conception, le développement et l'évaluation à grande échelle d'interfaces diffuses pour des tâches plus complexes et réalisées dans des conditions réelles, en plus d'investiguer le support de tâches résultant de comportements opportunistes et de tâches parallèles.

7.3.1 Interfaces diffuses optimales

En premier lieu, il serait intéressant d'étudier de nombreuses diffusions possibles pour une tâche donnée et de comparer les performances des interfaces diffuses résultantes en fonction des modalités employées, des caractéristiques des tâches et des particularités des groupes d'utilisateurs cibles. Dans cette même direction, il serait important d'investiguer de façon plus poussée la facilité d'apprentissage du paradigme

d'interaction proposé en laissant les utilisateurs explorer des interfaces diffuses pour découvrir le fonctionnement de l'interface par manipulation directe. Le temps requis pour découvrir comment accéder à certaines fonctionnalités pourrait constituer à juste titre des mesures de l'intuitivité de l'interface testée. De telles études contribueraient à approfondir les choix de conception, actuellement guidés à la fois par l'expérience et les lignes directrices que nous avons proposées précédemment, pour aboutir par exemple à des patrons de conception, aux techniques d'interactions les plus efficaces en fonction des artefacts de la tâche et des spécificités environnementales, etc.

À terme, nous pourrions être en mesure de développer et valider une méthodologie formelle permettant une diffusion adéquate et/ou optimale de l'interface d'un ordinateur porté dans l'environnement pour soutenir une tâche quelconque. De nombreuses difficultés sont à envisager et, en supposant qu'une méthodologie de diffusion fonctionne pour des tâches simples, rien ne garantit qu'elle fonctionnera également pour des tâches plus complexes. Le développement d'une telle méthodologie passe inévitablement par une meilleure compréhension des interactions se produisant à la fois sur le plan physique et sur le plan cognitif dans de multiples systèmes humain - ordinateur porté doté d'une interface diffuse. Il sera ainsi nécessaire de développer et valider un modèle générique comportant les notations et mécanismes permettant de formaliser de telles interactions, ou encore d'adapter un modèle existant pour ce faire. Un tel modèle pourrait par exemple prendre la forme d'une représentation schématique de la propagation de l'information dans le système fonctionnel comprenant l'utilisateur, l'ordinateur porté, les artefacts de la tâche, et l'environnement. Il s'agit en fait de

favoriser une meilleure compréhension des multiples implémentations possibles du paradigme d'interaction proposé à la lumière des associations entités-actions-fonctionnalités retenues. La validation d'un tel modèle pourrait être réalisée par le biais d'études ethnographiques (c.-à-d. observations in situ), ce qui est tout à fait approprié pour une interface diffuse.

7.3.2 Greffe sur des interfaces préexistantes

Une possibilité également intrigante est l'utilisation d'artéfacts « actifs » dans une interface diffuse. En effet, les interfaces diffuses ne sont pas simplement limitées à l'emploi d'artéfacts passifs et pourraient faire appel, pour interagir avec l'ordinateur porté, à la manipulation d'interfaces d'appareils de l'environnement, ou de composantes de ces interfaces matérielles. Nous avons ainsi déjà investigué l'utilisation d'un ordinateur porté pour supporter, pour des tâches simples, l'utilisation d'appareils usuels (ex., cuisinière électrique). Plus de recherches sont nécessaires mais notre étude préliminaire [57] indique qu'une telle approche semble prometteuse puisqu'elle permet à l'ordinateur porté de venir se greffer sur et tirer partie d'une interface préexistante se trouvant dans l'environnement. L'ordinateur porté se transforme alors en partie en un conduit façonnant nos interactions avec les appareils de l'environnement; il s'agit là, comme nous en avons déjà traité [58], d'un des niveaux possibles de médiation utilisateur-appareil.

7.3.3 Informatique portée et informatique disséminée

Une autre avenue de recherche des plus intéressantes est directement liée aux aspects complémentaires existants entre l'informatique disséminée (*pervasive computing*) et l'informatique portée (*wearable computing*). L'informatique disséminée permet en effet à la fois un contrôle efficace des ressources locales et une gestion globale de l'information. L'informatique portée assure pour sa part à l'utilisateur une grande personnalisation des services offerts et la préservation du contrôle de ses informations personnelles. Ces deux champs seront ainsi inéluctablement amenés à interagir et à cristalliser le rôle de l'ordinateur porté comme agent personnel de l'utilisateur mobile face à un environnement saturé d'informatique [56].

7.3.4 Acceptation de masse

Finalement, mentionnons que l'aspect matériel n'est pas à négliger pour favoriser une acceptation de masse des ordinateurs portés. Le système porté développé gagnerait par exemple à être raffiné et miniaturisé afin d'aboutir à un prototype de prochaine génération moins manifeste. Même si la technologie semble bien accueillie par la tranche de la population représentée dans nos expériences (c.-à-d. principalement des étudiants d'âge universitaire), il est primordial de mener des études à plus grande échelle avec des utilisateurs provenant de tous les segments de la population si nous voulons, à terme, intégrer les ordinateurs portés à même la fibre de la société et encourager, via l'utilisation d'interfaces diffuses, l'apparition de nouveaux types d'objets, hybrides entre

le réel et le virtuel⁷. L'utilisation transparente d'ordinateurs portés dotés d'interfaces diffuses permettra très certainement de tendre vers une gestion plus naturelle de l'information tout en augmentant implicitement les capacités de tout un chacun⁸.

⁷ Entrevue pour l'article "Vers la fusion du virtuel et du réel", magazine *Découvrir*, vol.26 no.5, Canada, septembre-octobre 2005, pp.10-11.

⁸ Entrevue pour l'article "L'ordinateur porté : un pas vers l'homme du futur", magazine *Poly* de l'École Polytechnique de Montréal, vol.2 no.1, Canada, mars 2005, p.15.

RÉFÉRENCES

- [1] G. D. Abowd et E. D. Mynatt, "Charting past, present and future research in ubiquitous computing," in *Human-Computer Interaction in the new millenium*, J. M. Carroll, Ed.: Addison-Wesley, 2002, pp. 511-536.
- [2] J. Anhalt, A. Smailagic, D. P. Siewiorek, F. Gemperle, D. Salber, S. Weber, J. Beck, et J. Jennings, "Toward Context-Aware Computing: Experiences and Lessons," *IEEE Intelligent Systems*, vol. 16, no. 3, pp. 38-46, 2001.
- [3] R. T. Azuma, "A Survey of Augmented Reality," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 6, no. 4, pp. 355-385, 1997.
- [4] R. T. Azuma, "The Challenge of Making Augmented Reality Work Outdoors," in *Mixed Reality: Merging Real and Virtual Worlds*, Y. Ohta and H. Tamura, Eds.: Springer-Verlag, 1999, pp. 379-390.
- [5] C. Baber, J. Knight, D. J. Haniff, et L. Cooper, "Ergonomics of Wearable Computers," *Mobile Networks and Applications*, vol. 4, no. 1, pp. 15-21, 1999.

- [6] M. Beaudoin-Lafon, "Instrumental Interaction : An Interaction Model for Designing Post-WIMP User Interfaces," in *Proceedings CHI 2000*. The Hague, Netherlands: ACM Press, 2000, pp. 446-453.
- [7] M. Billinghamurst, J. Bowskill, N. Dyer, et J. Morphett, "Spatial Information Displays on a Wearable Computer," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 18, no. 6, pp. 24-31, 1998.
- [8] M. Billinghamurst et T. Starner, "Wearable Devices: New Ways to Manage Information," *IEEE Computer*, vol. 32, no. 1, pp. 57-64, 1999.
- [9] J. Canny, "A Computational Approach To Edge Detection," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 8, no. 6, pp. 679-698, 1986.
- [10] S. Card, T. Moran, et A. Newell, *The Psychology of Human-Computer Interaction*. Hillsdale: Erlbaum, 1983.
- [11] A. Clark, "What do we want from a wearable user interface?," in *Proceedings of Workshop on Software Engineering for Wearable and Pervasive Computing*. Limerick, Ireland, 2000, pp. 3.
- [12] B. Clarkson, K. Mase, et A. Pentland, "Recognizing User Context via Wearable Sensors," in *Proceedings of the 4th International Symposium on Wearable Computers (ISWC'00)*. Atlanta, U.S.A., 2000, pp. 69-75.

- [13] L. J. Cronbach, "Coefficient Alpha and the Internal Structure of Tests," *Psychometrika*, vol. 16, no. 3, pp. 297-334, 1951.
- [14] P. De la Hamette, P. Lukowicz, G. Tröster, et T. Svoboda, "Fingermouse: A Wearable Hand Tracking System," in *Proceedings of the 4th International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp2002)*, 2002, pp. 15-16.
- [15] R. W. DeVaul, "The Memory Glasses: Wearable Computing for Just-in-Time Memory Support," Ph.D. Thesis, M.I.T. Media Laboratory, 2004, pp. 181.
- [16] R. W. DeVaul, M. Sung, J. Gipps, et A. Pentland, "MITHril 2003: Architecture and applications," in *Proceedings of the 7th IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC'03)*. White Plains, U.S.A., 2003, pp. 4-11.
- [17] E. Dubois et L. Nigay, "Augmented Reality: Which Augmentation for which Reality?," in *Proceedings of DARE 2000 on Designing Augmented Reality Environments*: ACM, 2000, pp. 165-166.
- [18] R. O. Duda, P. E. Hart, et D. G. Stork, *Pattern classification (2nd Ed.)*: Interscience, 2000.
- [19] L. Faulkner, "Beyond the Five-user Assumption: Benefits of Increased Sample Sizes in Usability Testing," *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, vol. 35, no. 3, pp. 379-383, 2003.

- [20] T. A. Furness III, "Retinal displays, Keynote address," in *Proceedings of the 2nd International Symposium on Wearable Computers (ISWC'98)*. Los Alamos, U.S.A., 2002.
- [21] C. Garcia et G. Tziritas, "Face Detection Using Quantized Skin Color Regions Merging and Wavelet Packet Analysis," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 1, no. 3, pp. 264-277, 1999.
- [22] F. Gemperle, N. Ota, et D. P. Siewiorek, "Design of a wearable tactile display," in *Proceedings of the 5th International Symposium on Wearable Computers (ISWC'01)*. Zurich, Switzerland, 2001, pp. 5-12.
- [23] S. G. Hart et L. E. Staveland, "Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research," in *Human Mental Workload*, P. A. Hancock and N. Meshkati, Eds.: Elsevier Science Publishers B.V., 1988, pp. 139-183.
- [24] A. S. Hetal, S. E. Moore, et B. Ramachandran, "Drishti: An Integrated Navigation System for Visually Impaired and Disabled," in *Proceedings of the 5th International Symposium on Wearable Computers (ISWC'01)*. Zurich, Switzerland, 2001, pp. 149-158.

- [25] T. Höllerer, S. Feiner, D. Hallaway, B. Bell, M. Lanzagorta, D. Brown, S. Julier, Y. Baillot, et L. Rosenblum, "User Interface Management Techniques for Collaborative Mobile Augmented Reality," *Computers and Graphics*, vol. 25, no. 5, pp. 799-810, 2001.
- [26] B. Howard et S. Howard, "Lightglove: Wrist-Worn Virtual Typing and Pointing," in *Proceedings of the 5th International Symposium on Wearable Computers (ISWC '01)*. Zurich, Switzerland, 2001, pp. 172-173.
- [27] E. Hutchins, *Cognition in the wild*: MIT Press, 1995.
- [28] H. Ishii et B. Ullmer, "Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms," in *Proceedings of Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '97)*. Atlanta, U.S.A.: ACM, 1997, pp. 234-241.
- [29] J. J. Jaccard et C. K. Wan, *LISREL Approaches to Interaction Effects in Multiple Regression*. Thousand Oaks, CA, U.S.A: Sage Publications, 1996.
- [30] D. R. Johnson et J. C. Creech, "Ordinal Measures in Multiple Indicator Models: A Simulation Study of Categorization Error," *Americal Sociological Review*, vol. 48, pp. 398-407, 1983.
- [31] E. Keyes, "The Enchantment Window Manager: A Wearable Computing User Interface," <http://www.media.mit.edu/wearables/mithril/enchantment.html>, 2000.

- [32] D. E. Kieras, "Towards a Practical GOMS Model Methodology for User Interface Design," in *Handbook of Human-Computer Interaction*, M. Helander, Ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science, 1988, pp. 135-158.
- [33] D. E. Kieras, "A Guide to GOMS Model Usability Evaluation using NGOMSL," in *Handbook of Human-Computer Interaction (2nd edition)*, M. Helander, T. K. Landauer, and P. Prabhu, Eds. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science, 1997, pp. 733-766.
- [34] Y. Kojima, Y. Yasumuro, H. Sasaki, I. Kanaya, O. Oshiro, T. Kuroda, Y. Manabe, et K. Chihara, "Hand Manipulation of Virtual Objects in Wearable Augmented Reality," in *Proceedings of the 7th International Conference on Virtual Systems and MultiMedia (VSMM2001)*, 2001, pp. 463-469.
- [35] T. K. Landauer et J. Nielsen, "A Mathematical Model of the Finding of Usability Problems," in *Proceedings of the INTERACT'93 and CHI '93 conference on Human factors in computing systems*. Amsterdam, Netherlands: ACM Press, 1993, pp. 206-213.
- [36] R. S. Laramée et C. Ware, "Rivalry and interference with a head mounted display," *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, vol. 9, no. 3, pp. 238-251, 2002.

- [37] J. C. R. Licklider, "Man-Computer Symbiosis," *IRE Transactions on Human Factors in Electronics*, vol. HFE-1, pp. 4-11, 1960.
- [38] R. Likert, "A Technique for the Measurement of Attitudes," *Archives of Psychology*, vol. 140, pp. 1-55, 1932.
- [39] K. Lyons et T. Starner, "Mobile Capture for Wearable Computer Usability Testing," in *Proceedings of the 5th International Symposium on Wearable Computers (ISWC'01)*. Zurich, Switzerland, 2001, pp. 69-76.
- [40] K. Lyons, T. Starner, D. Plaisted, J. Fusia, A. Lyons, A. Drew, et E. W. Looney, "Twiddler Typing: One-Handed Chording Text Entry for Mobile Phones," GeorgiaTech, Rapport technique 03-37 03-37, 2003.
- [41] B. MacIntyre et S. Feiner, "Future Multimedia User Interfaces," *Multimedia Systems*, vol. 4, no. 5, pp. 250-268, 1996.
- [42] W. Mackay, "Réalité Augmentée : le meilleur des deux mondes," *La Recherche*, vol. 285, pp. 32-37, 1996.
- [43] S. Mann, *Intelligent Image Processing*. New York: John Wiley and Sons, 2001.
- [44] S. Mann, "Wearable Computing: Toward Humanistic Intelligence," *IEEE Intelligent Systems*, vol. 16, no. 3, pp. 10-15, 2001.

- [45] S. Mann, D. Chen, et S. Sadeghi, "HI-Cam: Intelligent Biofeedback Signal Processing," in *Proceedings of the 5th International Symposium on Wearable Computers (ISWC'01)*. Zurich, Switzerland, 2001, pp. 178-179.
- [46] S. Mann et H. Niedzviecki, *Cyborg: Digital Destiny and Human Possibility in the Age of the Wearable Computer*. Toronto: Doubleday Canada, 2001.
- [47] P. Milgram et F. Kishino, "A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays," *IEICE Transactions on Information Systems*, vol. E77-D, no. 12, pp. 1321-1329, 1994.
- [48] K. L. Mills et J. Scholtz, "Situating computing: the next frontier for HCI research," in *Human-Computer Interaction in the new millenium*, J. M. Carroll, Ed. Boston: Addison-Wesley, 2002, pp. 537-552.
- [49] M. E. R. Nicholls, C. A. Orr, M. Okubo, et A. Loftus, "Satisfaction Guaranteed: The Effect of Spatial Biases on Responses to Likert Scales," *Psychological Science*, vol. 17, no. 12, pp. 1027-1028, 2006.
- [50] J. Nielsen, *Usability Engineering*: Morgan Kaufmann Publishers, 1994.
- [51] D. A. Norman, *The Design of Everyday Things*. New York: Doubleday, 1990.
- [52] D. A. Norman, *The Invisible Computer*. Cambridge: MIT Press, 1998.

- [53] J. C. Nunnally et I. H. Bernstein, *Psychometric Theory*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [54] J. Pascoe, "Adding generic contextual capabilities to wearable computers," in *Proceedings of the 2nd International Symposium on Wearable Computers (ISWC'98)*. Los Alamos, U.S.A., 1998, pp. 92-99.
- [55] W. Piekarski et B. H. Thomas, "ThumbsUp: Integrated Command and Pointer Interactions for Mobile Outdoor Augmented Reality Systems," in *Proceedings of HCI International*. Greece, 2003.
- [56] A. Plouznikoff, N. Plouznikoff, et J.-M. Robert, "Virtualisation d'interfaces matérielles par l'intermédiaire d'un ordinateur porté," in *Compte rendu de la 17ième Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM'05)*. Toulouse, France: ACM Press, International Conference Proceedings Series, Septembre 2005, pp. 287-290.
- [57] A. Plouznikoff, N. Plouznikoff, J.-M. Robert, et M. Desmarais, "Enhancing Human-Machine Interactions: Virtual Interface Alteration through Wearable Computers," in *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems (CHI'06)*. Montréal, Canada: ACM Press, April 2006.

- [58] 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," in *Compte rendu de la 18ième Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM'06)*. Montréal, Canada: ACM Press, International Conference Proceedings Series, Mai 2006, pp. 107-114.
- [59] N. Plouznikoff, A. Plouznikoff, M. Desmarais, et J.-M. Robert, "Gesture-Based Interactions with Virtually Embodied Wearable Computer Software Processes Competing for User Attention," in *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC'07)*. Montreal, Canada: IEEE, October 2007, pp. 2533-2538.
- [60] N. Plouznikoff, A. Plouznikoff, et J.-M. Robert, "Object Augmentation through Ecological Human - Wearable Computer Interactions," in *Proceedings of the 2005 International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob2005)*. Montréal, Canada: IEEE, August 2005, pp. 159-164.
- [61] N. Plouznikoff, A. Plouznikoff, et J.-M. Robert, "Artificial Grapheme-Color Synesthesia for Wearable Task Support," in *Proceedings of the 9th International Symposium on Wearable Computers (ISWC'05)*. Osaka, Japan: IEEE, October 2005, pp. 108-111.

- [62] N. Plouznikoff et J.-M. Robert, "Interactions humain-ordinateur porté via des interfaces diffuses," in *Compte rendu de la 18ième Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM'06)*. Montréal, Canada: ACM Press, International Conference Proceedings Series, Mai 2006, pp. 285-286.
- [63] N. Plouznikoff et J.-M. Robert, "Caractéristiques, enjeux et défis de l'informatique portée," in *Compte rendu de la 16ième Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM'04)*. Namur, Belgique: ACM Press, International Conference Proceedings Series, Septembre 2004, pp. 125-132.
- [64] C. Randell et H. Muller, "Context Awareness by Analysing Accelerometer Data," in *Proceedings of the 4th International Symposium on Wearable Computers (ISWC'00)*. Atlanta, U.S.A., 2000, pp. 175-176.
- [65] B. Rhodes, "The wearable remembrance agent: A system for augmented memory," *Personal Technologies*, vol. 1, no. 4, pp. 218-224, 1997.
- [66] B. Rhodes, "WIMP Interface Considered Fatal," presented at IEEE VRAIS'98 Workshop on Interfaces for Wearable Computers, Atlanta, U.S.A., 1998.
- [67] B. Rhodes et P. Maes, "Just-in-time information retrieval agents," *IBM Systems Journal*, vol. 39, no. 3/4, pp. 685-704, 2000.

- [68] B. Rhodes, N. Minar, et J. Weaver, "Wearable Computing Meets Ubiquitous Computing," in *Proceedings of the 3rd International Symposium on Wearable Computers (ISWC'99)*. San Francisco, U.S.A., 1999, pp. 141-149.
- [69] B. Schiele, T. Jebara, et N. Oliver, "Sensory-Augmented Computing: Wearing the Museum's Guide," *IEEE Micro*, vol. 21, no. 3, pp. 44-52, 2001.
- [70] A. Schmidt, "Implicit Human Computer Interaction Through Context," *Personal Technologies*, vol. 4, no. 2, pp. 191-199, 2000.
- [71] T. Starner, "Wearable Computing and Contextual Awareness," Ph.D. Thesis, M.I.T. Media Laboratory, 1999, pp. 248.
- [72] T. Starner, "The Challenges of Wearable Computing: part 1&2," *IEEE Micro*, vol. 21, no. 4, pp. 44-67, 2001.
- [73] T. Starner, "Attention, memory, and wearable interfaces," *IEEE Pervasive Computing*, vol. 1, no. 4, pp. 88-91, 2002.
- [74] T. Starner, "The Role of Speech Input in Wearable Computing," *IEEE Pervasive Computing*, vol. 1, no. 3, pp. 89-93, 2002.
- [75] T. Starner, "Thick Clients for Personal Wireless Devices," *IEEE Computer*, vol. 35, no. 1, pp. 133-135, 2002.

- [76] T. Starner, "The enigmatic display," *IEEE Pervasive Computing*, vol. 2, no. 1, pp. 15-18, 2003.
- [77] T. Starner et Y. Maguire, "A Heat Dissipation Tutorial for Wearable Computers," in *Proceedings of the 2nd International Symposium on Wearable Computers (ISWC'98)*. Los Alamos, U.S.A., 1998, pp. 140-149.
- [78] T. Starner, J. Weaver, et A. Pentland, "A Wearable Computer Based American Sign Language Recognizer," in *Proceedings of the 1st International Symposium on Wearable Computers (ISWC'97)*. Cambridge, U.S.A., 1997, pp. 130-137.
- [79] R. Suomela, J. Lehtikoinen, et I. Salminen, "A System for Evaluating Augmented Reality User Interfaces in Wearable Computers," in *Proceedings of the 5th International Symposium on Wearable Computers (ISWC'01)*. Zurich, Switzerland, 2001, pp. 77-84.
- [80] B. Thomas, B. Close, J. Donoghue, J. Squires, P. De Bondi, M. Morris, et W. Pickarski, "ARQuake: An Outdoor/Indoor Augmented Reality First Person Application," in *Proceedings of the 4th International Symposium on Wearable Computers (ISWC'00)*. Atlanta, U.S.A., 2000, pp. 139-146.
- [81] B. Thomas, B. Close, J. Donoghue, J. Squires, P. De Bondi, et W. Piekarski, "First Person Indoor/Outdoor Augmented Reality Application: ARQuake," *Personal and Ubiquitous Computing*, vol. 6, no. 1, pp. 75-86, 2002.

- [82] B. Thomas, K. Grimmer, J. Zucco, et S. Milanese, "Where Does the Mouse Go? An Investigation into the Placement of a Body-Attached TouchPad Mouse for Wearable Computers," *Personal and Ubiquitous Computing*, vol. 6, no. 2, pp. 97-112, 2002.
- [83] A. Toney, L. Dunne, B. Thomas, et S. P. Ashdown, "A Shoulder Pad Insert Vibrotactile Display," in *Proceedings of the 7th IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC'03)*. White Plains, U.S.A., 2003, pp. 35-45.
- [84] B. Ullmer et H. Ishii, "Emerging frameworks for tangible user interfaces," *IBM Systems Journal*, vol. 39, no. 3&4, pp. 915-931, 2000.
- [85] G. Wald, "Human Vision and the Spectrum," *Science*, vol. 101, no. 2635, pp. 653-658, 1945.
- [86] M. Weiser, "The computer for the twenty-first century," *Scientific American*, vol. 265, no. 3, pp. 94-104, 1991.
- [87] C. D. Wickens, "Information processing, decision-making, and cognition," in *Handbook of human factors*, G. Salvendy, Ed. New York: Wiley, 1987, pp. 72-107.
- [88] C. D. Wickens, *Engineering psychology and human performance (2nd Ed.)*. New York: Harper Collins Publishers Inc., 1992.

- [89] B. D. Zait, B. J. Super, et F. K. H. Quek, "Comparison of Five Color Models in Skin Pixel Classification," in *Proceedings of the International Workshop on Recognition, Analysis and Tracking of Faces and Gestures in Real-Time Systems (ICCV'99)*. Corfu, Greece, 1999, pp. 58-63.
- [90] B. D. Zumbo et D. W. Zimmerman, "Is the Seletion of Statistical Methods Governed by Level of Measurement?," *Canadian Psychology*, vol. 34, pp. 390-400, 1993.

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
RECHERCHE PAR LE
COMITÉ D'ÉTHIQUE DE LA RECHERCHE AVEC
DES SUJETS HUMAINS DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Montréal, le 15 novembre 2007.

M. Nicolas Plouznikoff
Étudiant au doctorat
Département de mathématiques et génie industriel
École Polytechnique de Montréal

N/Réf : Dossier CÉR-07/08-05

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 « *Interface diffuse : conception, développement et évaluation d'un nouveau paradigme d'interface humain-ordinateur porté* » que vous réalisez sous la direction du professeur Jean-Marc Robert, du département de mathématiques et génie industriel, 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. : Jean-Marc Robert, MAGI
Céline Roehrig, DRI

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

Questionnaire no. _____

Étude sur les interfaces diffuses

En tant que participant vous devrez réaliser 3 tâches usuelles simples et familières à la fois de façon conventionnelle et à l'aide de l'ordinateur porté. Le but de cette étude est d'évaluer un nouveau type d'interface humain-ordinateur porté utilisant la manipulation d'objets de la tâche pour interagir avec l'ordinateur porté et assister à la réalisation de la tâche. Des mesures qualitatives et quantitatives seront recueillies pour comparer les deux façons de réaliser ces tâches. En tant que participant, vous pouvez décider de vous retirer en tout temps des expériences.

Section 1 : Informations générales

Q1. Sexe : Homme Femme

Q2. Age : _____ ans

Q3. Programme d'étude : _____

Q4. Avez-vous déjà suivi un cours portant sur les interfaces humain-ordinateur à l'École Polytechnique? Oui Non

Q5. Quel est votre niveau de familiarité avec l'informatique (ordinateurs de bureau, laptops...)?
 Débutant Intermédiaire Avancé Expert

Q6. Quelle est votre attitude face aux nouvelles technologies?
 Défavorable Neutre Favorable

Section :

Encercler la tâche venant d'être réalisée. Les énoncés sont identiques pour les 3 tâches.

2. Gestion d'horaire**3. Recherche bibliographique****4. Gestion bancaire simulée**

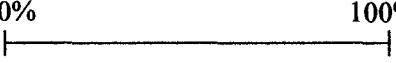


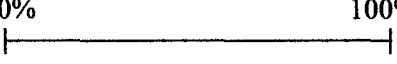


Donnez votre opinion sur les énoncés suivants en cochant la case appropriée :

- 1 = Fortement en désaccord
 2 = En désaccord
 3 = Ni en accord, ni en désaccord
 4 = D'accord
 5 = Fortement d'accord

	1	2	3	4	5
Q7. Il a été facile de réaliser la tâche de façon conventionnelle.					
Q8. Il a été facile de réaliser la tâche avec l'interface diffuse.					
Q9. Le fonctionnement de l'interface diffuse a été facile à apprendre.					
Q10. L'interface diffuse est utile.					
Q11. L'interface diffuse est efficace (c.-à-d. permet de réaliser adéquatement la tâche).					
Q12. L'interface diffuse est efficiente (c.-à-d. permet de réaliser adéquatement la tâche avec un minimum d'effort)					
Q13. L'interface diffuse est rapide.					
Q14. L'interface diffuse est plaisante.					
Q15. L'interface diffuse répond à mes attentes.					
Q16. Il a été plus rapide de réaliser la tâche avec l'interface diffuse que de façon conventionnelle.					
Q17. L'effort physique requis pour interagir avec l'interface diffuse est important.					

Q18.	L'effort mental requis pour interagir avec l'interface diffuse est important.				
Q19.	Globalement, la réalisation de la tâche à l'aide de l'ordinateur porté a demandé moins d'effort que celle de la tâche conventionnelle.				
Q20.	L'utilisation de l'ordinateur porté via l'interface diffuse est transparente.				
Q21.	Je suis satisfait de ma performance lors de la tâche conventionnelle.				
Q22.	Je suis satisfait de ma performance lors de la tâche avec l'interface diffuse.				
Q23.	Les associations entité-action-fonctionnalité de l'interface diffuse sont cohérentes.				
Q24.	Les associations entité-action-fonctionnalité de l'interface diffuse sont intuitives.				
Q25.	Lors de l'utilisation de l'ordinateur porté, l'information présentée est utile à la tâche.				
Q26.	Lors de l'utilisation de l'ordinateur porté, l'information présentée est concise.				
Q27.	J'aurais pu facilement deviner le fonctionnement de l'interface diffuse d'après les entités utilisées pour la tâche.				
Q28.	J'aurais pu facilement découvrir le fonctionnement de l'interface diffuse par essais-erreurs, en manipulant les entités utilisées pour la tâche.				
Q29.	Avec de l'entraînement, l'interface diffuse me permettrait de réaliser la tâche plus rapidement que de façon conventionnelle.				
Q30.	Avec de l'entraînement, l'interface diffuse me permettrait de réaliser la tâche avec moins d'effort que de façon conventionnelle.				

(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	conventionnelle	avec l'interface diffuse
Q31. Quelle était votre charge mentale moyenne?	0% 100% 	0% 100% 
Q32. Quelle était votre charge physique moyenne?	0% 100% 	0% 100% 
Q33. Quel était l'effort moyen que vous avez déployé?	0% 100% 	0% 100% 

Section 5 : Évaluation comparative

(Répondez aux questions suivantes en cochant la case correspondante sur chaque ligne)
En rétrospective, quelle interface diffuse avez-vous trouvée :

	Gestion d'horaire	Recherche bibliographique	Gestion bancaire simulée	Aucune en particulier
Q34. la plus facile à apprendre?				
Q35. la plus difficile à apprendre?				
Q36. la plus facile à utiliser?				
Q37. la plus difficile à utiliser?				
Q38. la plus intuitive?				
Q39. la moins intuitive?				
Q40. la plus utile?				
Q41. la moins utile?				
Q42. la mieux intégrée à la tâche?				
Q43. la moins bien intégrée à la tâche?				

Section 6 : Conclusion

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

- 1 = Fortement en désaccord
- 2 = En désaccord
- 3 = Ni en accord, ni en désaccord
- 4 = D'accord
- 5 = Fortement d'accord

	1	2	3	4	5
Q44. Les ordinateurs portés présentent un potentiel certain.					
Q45. S'ils étaient miniaturisés et adéquatement intégrés à des vêtements, j'aimerais utiliser un ordinateur porté au quotidien.					
Q46. Les interfaces diffuses présentent un potentiel certain.					
Q47. Si la technologie le permettait, je préférerais utiliser une interface diffuse pour réaliser certaines tâches quotidiennes.					
Q48. Une interface diffuse est appropriée pour interagir avec un ordinateur porté.					

Q49. Quels avantages voyez-vous aux interfaces diffuses?

Q50. Quels inconvénients voyez-vous aux interfaces diffuses?

Q51. Avez-vous d'autres commentaires particuliers à nous faire part?
