

Nouvelles techniques d'interaction pour les dispositifs miniaturisés de l'informatique mobile

Simon Perrault

▶ **To cite this version:**

Simon Perrault. Nouvelles techniques d'interaction pour les dispositifs miniaturisés de l'informatique mobile. Interface homme-machine [cs.HC]. Télécom ParisTech, 2013. Français. NNT : 2013ENST0021 . tel-01250313

HAL Id: tel-01250313
https://pastel.hal.science/tel-01250313

Submitted on 4 Jan 2016

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

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



ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

TELECOM ParisTech

2013-ENST-0021

EDITE - ED 130

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

TELECOM ParisTech

Spécialité « Informatique et Réseaux »

présentée et soutenue publiquement par

Simon PERRAULT

le 15 avril 2013

Nouvelles Techniques d'Interaction pour les Dispositifs Miniaturisés de l'Informatique Mobile

Directeur de thèse : **Yves GUIARD, Telecom ParisTech**
Directeur de thèse : **Eric LECOLINET, Telecom ParisTech**

Jury

Mme Monique NOIRHOMME, Professeur, Institut d'Informatique, Namur	Président du jury
M. Géry CASIEZ, Maître de Conférences (HDR), Université Lille 1	Rapporteur
M. Olivier CHAPUIS, Chargé de Recherche CNRS, LRI, Université Paris-Sud	Rapporteur
Mme Laurence NIGAY, Professeur des Universités, Université Joseph Fourier, Grenoble	Examinateur

TELECOM ParisTech
école de l'Institut Télécom - membre de ParisTech

THÈSE

© 2013 TELECOM ParisTech

À Yingjie et mes parents.

© 2013 TELECOM ParisTech

© 2013 TELECOM ParisTech

Remerciements

Je souhaiterais remercier en premier lieu mes encadrants Yves Guiard et Eric Lecolinet pour m'avoir encadré pendant ce doctorat. Leur soutien au cours de ce travail et leurs expertises complémentaires m'ont ouvert de nombreuses possibilités et m'ont permis de mieux appréhender la recherche en Interaction Homme-Machine. Cette thèse m'a beaucoup appris sur la recherche, l'informatique et aussi sur moi-même.

Dans un second temps, merci aux membres du jury d'avoir pris le temps de lire ce manuscrit et d'être venu assister à la soutenance. Je remercie ainsi spécialement Géry Casiez et Olivier Chapuis, mes rapporteurs, d'avoir pris le temps de préparer leurs rapports, ainsi que Michel Beaudouin-Lafon qui a contresigné le rapport de M. Chapuis. Je n'oublie pas non plus mes deux examinateurs, Laurence Nigay et Monique Noirhomme pour leurs remarques et leurs conseils.

Je voudrais aussi remercier ma femme Yingjie qui a été si patiente pendant ces trois années et quelques mois, et qui m'a apporté un soutien sans failles dans toutes les situations, dans les moments où j'étais démoralisé, stressé et/ou invivable.

Enfin, j'ai eu l'immense chance d'avoir de nombreux collègues qui ont rendu cette expérience inoubiable et intéressante. Un grand merci donc à tous les membres de mon équipe, particulièrement Dong-Bach avec qui j'ai partagé un bureau presque trois ans mais aussi Halla, Sylvain M, Marcos, Gilles, Anne R, Thomas P, Mathias, Julie, Quentin, Hind, Minzhi, Yoann, Alex, Simon M, Dragutin avec qui j'ai eu grand plaisir à échanger pendant les quelques mois ou années où ils ont été présents. L'année de mon arrivée à Telecom a aussi coincidé avec l'arrivée de nombreux doctorants au sein de notre département, qui ont su apporter de la vie et de la joie. Alors merci aussi aux membres du projet C (Mike, Cuauhtemoc, Xavier, Sylvain) et les autres, Fabien, Sylvain F, Nora, Asma, Ghayet, Imen, Nan, Anne M, Azin, Damien, Antoine, Marilena, Ioana, Nicoleta, Hoa, Thomas R, tous les permanents et tous ceux que j'ai pu oublier.

J'ai aussi conscience d'avoir eu affaire à une équipe administrative exceptionnelle au sein de Telecom, toujours disponible et agréable. Merci Florence, Fabienne, Nazha, Hayette et les autres.

Pour terminer, merci José de m'avoir donné le goût de la recherche et l'envie de continuer.

© 2013 TELECOM ParisTech

© 2013 TELECOM ParisTech

Résumé

Du fait de la disponibilité de capteurs électroniques de plus en plus puissant, la dernière décennie a vu la popularisation de nouveaux dispositifs mobiles, comme les téléphones intelligents (smartphone), et même des dispositifs miniatures comme ceux de l'informatique portée. Ces nouveaux dispositifs apportent de nouveaux problèmes interactionnels, du fait de la petite taille de l'écran et du problème du "fat-finger" (lors de l'interaction, une large portion de l'écran se retrouve occultée par le doigt, et les tâches de pointage perdent en précision. L'objectif de ce travail de thèse est double : 1) d'acquérir une meilleure compréhension du pointage sur les petits dispositifs mobiles, grâce a une étude poussée de la loi de Fitts, 2) de créer de nouvelles techniques d'interaction afin d'augmenter la bande passante interactionnelle entre l'utilisateur et le dispositif.

Mots-clés: miniaturisation, bijou numérique, loi de Fitts, pointage, informatique portée.

Abstract

Thanks to the availability of powerful miniaturized electronic components, this last decade have seen the popularization of small mobile devices such as smartphones, and even smaller devices for wearable computing. These new devices bring new interaction problems, such as the small size of the screen and the "fat-finger" problem (a relatively large portion of the screen is occluded and pointing lacks precision). The objective of the work reported here is twofold : 1) to acquire a better understanding of pointing on small devices, thanks to an advanced study of Fitts' law, 2) to design new interaction techniques for increasing the interaction bandwidth between the user and the device.

Keywords: miniaturization, input, digital jewelry, wearable computing, Fitts' law, pointing

Table des matières

1 Introduction Générale **3**

1.1 Contexte 4

1.2 Organisation du mémoire 5

1.2.1 Loi de Fitts et pointage 6

1.2.2 Bijoux numériques 6

I Pointage et loi de Fitts

2 État de l'art du pointage **11**

2.1 Introduction : Pointage et Loi de Fitts 12

2.1.1 Définition 12

2.1.2 Protocole discret vs. réciproque 14

2.1.3 Applications en IHM 14

2.2 Formulation et terminologie 16

2.2.1 Variantes de l'équation d'origine 16

2.2.2 Indice de Difficulté (ID) d'une tâche 16

2.3 Utilisation de paramètres effectifs 17

2.3.1 Illustration des notions présentées par une manipulation 17

2.3.2 Largeur W_e et distance D_e effectives 18

2.3.3 Indice de difficulté effectif 20

2.4 Indice de performance (Throughput) 20

2.4.1 Définition défendue par MacKenzie 21

2.4.2 Définition défendue par Zhai 21

2.4.3 Utilisation de l'Indice de Performance 22

2.5 Application aux exemples présentés 22

2.6 Conclusion 24

3 Expression de la loi de Fitts comme un compromis temps/erreur 27

3.1 Motivation 28
3.2 Temps et erreur 28
3.2.1 Le temps n'est pas une vitesse 28
3.2.2 La précision : Ni information ni difficulté 28
3.2.3 Distance relative ($\frac{D}{W}$) vs. Tolérance relative ($\frac{W}{D}$) 30
3.2.4 Géométrie de la tâche contre performance du mouvement 30
3.3 La loi de Fitts comme une théorie d'affectation des ressources 32
3.4 Mise en évidence du compromis temps/erreur dans les données de Fitts (1954) 33
3.4.1 Une relation en loi puissance entre temps de mouvement et erreur relative relative (RVE) 34
3.4.2 Quantité de ressources 34
3.4.3 Affectation des ressources : le déséquilibre stratégique 36
3.4.4 Discussion 38
3.5 Données expérimentales sur le compromis temps/erreur 38
3.5.1 Méthode 39
3.5.2 Résultats et discussion 41
3.6 Implications pour la recherche fondamentale et l'IHM 47

4 Étude de l'invariance de l'Indice de Performance 51

4.1 Introduction 52
4.2 Invariance dans la loi de Fitts 52
4.3 Rappels sur l'Indice de Performance (*IP*) 53
4.4 Ordre des opérations pour le calcul de l'*IP* : un problème lié à l'inégalité de Jensen 56
4.5 Réédition du test de Mackenzie et de Isokoski 59
4.5.1 Méthode 60
4.5.2 Analyse des données 61
4.5.3 Résultats et discussion 61
4.6 Conclusion et perspectives 65

5 Récapitulatif du Pointage 67

5.1 Rappel des contributions 68
5.1.1 Loi de Fitts comme un compromis temps/erreur 68
5.1.2 Invariance de l'Indice de Performance 68
5.2 Vers un modèle et des métriques pour les petits niveaux d'échelle 68

© 2013 TELECOM ParisTech

5.3 Vers une nouvelle approche 69

II Bijoux numériques

6 Introduction aux bijoux numériques 73

6.1 Bijoux classiques 74
6.1.1 Fonctions des bijoux 74
6.1.2 Localisation des bijoux 75
6.1.3 Propriétés 75
6.2 Présentation du domaine 76
6.2.1 Informatique mobile 77
6.2.2 Informatique portée (wearable computing) 77
6.2.3 Bijoux numériques 78

7 Vers un un espace de caractérisation de l'interaction sur bijoux numériques 81

7.1 Enquête 83
7.1.1 Démographie 83
7.1.2 Connaissance et intérêt pour les bijoux numériques 84
7.1.3 Habitudes de port de bijoux classiques 84
7.1.4 Tâches 86
7.2 Présentation de l'espace de caractérisation 92
7.3 Modalités non gestuelle 93
7.3.1 Modalité vocale 93
7.3.2 Modalité passive 95
7.4 Modalité gestuelle 95
7.4.1 Matériel pour l'interaction gestuelle 96
7.4.2 Le dispositif comme référentiel d'interaction 99
7.4.3 Le dispositif se déplace dans un autre référentiel 101
7.4.4 Résumé sur l'interaction gestuelle 102
7.5 Modalités de sortie 102
7.5.1 Modalité visuelle 102
7.5.2 Modalité audio 104
7.5.3 Modalité tactile 106
7.5.4 Dispositifs déportés 107
7.5.5 Conclusion sur les sorties 108
7.6 Vue d'ensemble de l'interaction 108
7.6.1 Boucles d'oreilles 108

© 2013 TELECOM ParisTech

7.6.2 Pendentifs, colliers . . . 108
7.6.3 Broches . . . 109
7.6.4 Bracelets, montres . . . 109
7.6.5 Anneaux, bagues . . . 109

8 Contribution à l'étude de la joaillierie numérique : Watch It 111
8.1 Motivation . . . 113
8.2 Contexte et travaux connexes . . . 115
8.2.1 Dispositif comme mobile . . . 116
8.2.2 Dispositif comme référentiel d'interaction . . . 116
8.3 Interaction sur un bracelet . . . 118
8.3.1 Le concept WatchIt . . . 120
8.3.2 Vocabulaire gestuel . . . 122
8.4 Expérience préliminaire . . . 123
8.4.1 Participants . . . 124
8.4.2 Méthode . . . 124
8.4.3 Résultats . . . 125
8.4.4 Discussion . . . 127
8.5 Interaction "eyes-free" . . . 129
8.5.1 Définition . . . 129
8.5.2 Menu Audio . . . 129
8.6 Expérience "eyes-free" . . . 129
8.6.1 Participants . . . 130
8.6.2 Stimulus . . . 130
8.6.3 Méthode . . . 130
8.6.4 Tâche . . . 131
8.6.5 Résultats . . . 132
8.6.6 Discussion . . . 134
8.7 Contrôle continu . . . 135
8.7.1 Technique de défilement sur le bracelet . . . 135
8.7.2 Technique de pointage absolu . . . 135
8.7.3 Note sur la validation . . . 136
8.8 Expérience de défilement de liste . . . 136
8.8.1 Participants . . . 137
8.8.2 Stimulus . . . 137
8.8.3 Méthode . . . 137
8.8.4 Tâche . . . 138

© 2013 TELECOM ParisTech

8.8.5 Résultats . . . 139
8.8.6 Discussion . . . 142
8.9 Discussion sur WatchIt . . . 143
8.9.1 Utilisation "eyes-free" . . . 143
8.9.2 Utilisation pour du contrôle continu précis . . . 143
8.10 Applications . . . 144
8.10.1 Cas d'utilisation général de WatchIt . . . 144
8.10.2 Scénarios . . . 144
8.11 Conclusion et perspectives . . . 145
8.11.1 Perspectives sur les techniques d'interaction . . . 145
8.11.2 Limitations technologiques et perspectives d'utilisation d'une technologie capacitive . . . 146
8.11.3 Utilisation des deux potentiomètres sur chaque demi-bracelet : implémentation d'un lecteur musical . . . 147
8.11.4 Conclusion . . . 150

9 Conclusions et Perspectives **155**
9.1 Contributions . . . 156
9.1.1 Pointage et loi de Fitts . . . 156
9.1.2 Bijoux numériques . . . 157
9.2 Perspectives . . . 158
9.2.1 Pointage sur bijoux numériques . . . 158
9.2.2 Vers une remise en cause de la norme ISO ? . . . 158
9.2.3 Rôle futur des bijoux numériques . . . 159
9.2.4 Vers un bracelet totalement augmenté . . . 159
9.2.5 Augmentation d'autres objets du quotidien . . . 159
9.2.6 Utilisation de nouveaux dispositifs d'affichage sur bijoux numériques . 159

A Publications personnelles **163**

Bibliographie **167**

© 2013 TELECOM ParisTech

© 2013 TELECOM ParisTech

Liste des illustrations

1.1 La montre GNUX de Steve Mann propose une application sommaire de vidéoconférence dès 1998. . . . 4
1.2 La montre IBM embarque un système d'exploitation Linux en 2001. . . . 5

2.1 Tâche de Fitts dans sa version classique, dite réciproque. Le participant doit atteindre, avec un pointeur d'écran, alternativement la cible gauche et la cible droite le plus grand nombre de fois possible en un temps donné (par exemple, 30s chez (Fitts, 1954)), en commettant le moins d'erreurs possible. . . . 12
2.2 Réprésentation de l'intervalle supposé de validité $[S_{min}; S_{max}]$ de la loi de Fitts (Guiard, 1999). . . . 13
2.3 Exemple de distribution de mouvements pour une tâche de difficulté moyenne où D=1000 pixels et W=100 pixels (ID de Shannon = 3,46 bits). Les valeurs négatives sont des undershoots. . . . 18
2.4 Exemple d'une distribution de mouvements pour une tâche extrêmement facile de paramètres D=1000 pixels et W=1000 pixels (ID de Shannon = 1 bit). . . . 19
2.5 Exemples de mouvements pour une tâche très difficile de paramètres D=1000 pixels et W=1 pixel (ID de Shannon = 9,97 bits). . . . 19
2.6 Distribution normale des points (avec en Y la fréquence des points). . . . 19
2.7 Calcul de la loi de Fitts avec les valeurs effectives pour les 3 exemples présentés. . 23

3.1 Compromis entre μ_T et RVE dans les données de Fitts . . . 34
3.2 Conservation du produit q de l'Équation 3.3 à travers la variation de μ_T, pour les différentes conditions d'échelle . . . 35
3.3 Un tracé de l'Équation 3.3 pour la condition d'échelle $D = 40,64cm$ échelle, où l'exposant p vaut $-0,3509$. ABCD sont quatre points correspondants à des données réelles, E est une extrapolation arbitraire le long de la courbe. Tous les rectangles ont la même surface. . . . 36
3.4 SI en fonction de RTT dans les données de Fitts . . . 37
3.5 RVE en fonction de RTT. La ligne en pointillés représente l'égalité théorique $RVE = RTT$ . . . 37

3.6 Effet de la manipulation des instructions sur le temps médian μ_T et l'erreur variable (RVE), avec les intervalles de confiance à 95% basés sur les écart-types intra-participants . . . 42
3.7 Front convexe de performance. A) une courbe de type puissance courbe est tracée sur tous les points de données du participant ; les points sous la courbe (cercles pleins) sont ensuite sélectionnés. B) une nouvelle courbe d'ajustement est tracée sur le sous-ensemble sélectionné . . . 43
3.8 Exposant p de l'Équation 3.1 en fonction : A) du r^2 de l'ajustement du modèle puissance, et B) de la valeur du coefficient q, indicatif de la quantité de ressources. Un point par participant. . . . 45
3.9 Un exemple représentatif de A) l'ajustement du modèle à un coefficient de l'Équation 3.6 et B) la conservation de q à travers une variation de μ_T . . . 47
3.10 Comparaison de deux différentes courbes représentant le compromis. Chaque courbe représente un participant. . . . 48

4.1 Deux façons de calculer le TP_M sous l'hypothèse que la loi de Fitts suit la formule de Shannon, avec $a = 0,1$ s et $b = 0,125$ s/bit . La troisième colonne $TP_Z = \frac{ID}{MT-a}$ est constante par hypothèse. . . . 56
4.2 La fonction $TP_M = f(MT)$ avec le modèle Shannon. . . . 57
4.3 Les étapes successives de calcul de TP_M, (de gauche à droite) et les niveaux d'agrégation statistique (de bas en haut). Un exemple de chemin est mis en relief, qui fournit la valeur globale du TP_M pour un participant particulier placé dans une condition donnée. . . . 58
4.4 Amplitude moyenne en fonction des consignes. . . . 61
4.5 Temps de mouvement médian en fonction des consignes. . . . 62
4.6 Vitesse moyenne en fonction des consignes. . . . 63
4.7 Écart type des points de mouvements en fonction des consignes. . . . 63
4.8 TP_M en fonction des instructions. Les barres d'erreur indiquent les intervalles de confiance à 95% sur la base écarts-types entre-participants. . . . 64

6.1 Exemple de bijou permettant d'affirmer son appartenance à une communauté religieuse : un pendentif en forme de croix. . . . 74
6.2 Préférences subjectives des utilisateurs pour le placement des différentes commandes d'un baladeur. . . . 76
6.3 Temps de réaction moyen pour détecter l'allumage d'une diode selon la localisation du dispositif. Extrait d'(Harrison et al., 2009). . . . 76
6.4 Exemple de dispositif mobile : un Palm Pilot. Ce type de PDA est apparu dans le courant des années 1990. . . . 77

7.1 Répartition des réponses à l'enquête, par catégories socioprofessionnelles . . . 83

© 2013 TELECOM ParisTech

7.2 Familiarité des répondants avec la notion de "bijou numérique" 84
7.3 Intérêt manifesté pour les bijoux numériques 84
7.4 Fréquence de port de bijoux classiques selon le sexe 85
7.5 Les Marking Menus par (Kurtenbach and Buxton, 1991). Si l'utilisateur maintient le bouton de la souris enfoncé, les différentes commandes sur menu circulaire apparaissent (a), il peut aussi directement tracer le chemin pour sélectionner la commande sans regarder le menu (b). 87
7.6 Exemple de clavier virtuel sur une montre téléphone : plus de 80% de l'espace visuel est occupé pour l'entrée de texte. 87
7.7 Liste de tâches, classées par intérêt manifesté par les utilisateurs 88
7.8 Halo permet d'indiquer la direction et distance de points d'intêrets même en dehors de l'écran. 90
7.9 Présentation de l'espace de caractérisation. 94
7.10 Caractéristation de l'interaction gestuelle 95
7.11 Dans Tilttext (Wigdor and Balakrishnan, 2003), en appuyant sur une des touches du clavier l'utilisateur peut soit entrer un chiffre (position neutre), soit entrer une des lettres affichées sur la touche (inclinaison vers le haut, bas, gauche ou droite). L'inclinaison est détectée avec un accéléromètre. 96
7.12 Dans Imaginary Interfaces (Gustafson et al, 2010), la main gauche sert de repère. Il est possible de dessiner et tracer des chemins dans ce repère avec la main droite. 97
7.13 TimeTilt (Roudaut et al., 2009a)détecte l'inclinaison du téléphone pour basculer d'une application à l'autre. 98
7.14 Avec la technique des Microrolls (Roudaut et al., 2009b), l'utilisateur sélectionne des commandes par de légers roulements du pouce. 99
7.15 EarPod propose de la sélection de commandes. Un retour audio continu est proposé afin d'aider l'utilisateur à interagir sans regarder le dispositif. 100
7.16 Techniques d'entrée basées sur des mouvements dans le référentiel du dispositif . . 100
7.17 Techniques d'entrée basées sur le mouvement de l'appareil 101
7.18 Avec Skinput (Harrison et al., 2010), un menu est projeté sur le bras de l'utilisateur. En effectuant un "tap" sur un élément, il peut le sélectionner facilement. 103
7.19 Les lunettes Google Glasses. 105
7.20 HANDset (Fukumoto and Tonomura, 1999) utilise la conduction osseuse pour transmettre une conversation téléphonique. 106

8.1 La montre GNUX de Steve Mann propose une application sommaire de vidéoconférence dès 1998. 113
8.2 Exemple d'occultation de l'écran par le doigt sur iPod nano. 114
8.3 Menu de l'iPod nano, avec une seule application sélectionnable à l'écran. 114
8.4 Exemple de montre interactive : la montre "Pebble" (par la société Pebble). 115

© 2013 TELECOM ParisTech

8.5 L'anneau interactif Nenya. L'interaction se fait grâce à l'aimant situé sur l'anneau, et dont les mouvements sont captés par un magnétomètre dans le bracelet. 116
8.6 Utilisation du cadran de la montre par Blasko. L'utilisateur interagit en faisant glisser son doigt le long du cadran, qui sert de marque tactile. 117
8.7 Interaction avec le dos du dispositif avec le concept "Back of device". 118
8.8 Abracadabra détecte la position de l'aimant fixé sur le doigt de l'utilisateur grâce à un magnétomètre. 119
8.9 SideSight permet de détecter les mouvements d'un ou plusieurs doigts autour d'un dispositif, ici un téléphone portable. 119
8.10 Premier prototype WatchIt 121
8.11 Participant lors de l'expérience préliminaire 124
8.12 Exemple de stimulus de l'expérience préliminaire. Il s'agit ici du geste #4 du Tableau 8.1. Le "2" indique qu'il faut sélectionner la zone du milieu. 125
8.13 Taux de réussite de chacun des 15 gestes. 125
8.14 Temps d'exécution de chacun des 15 gestes. 126
8.15 Exemple de geste de glissement avec une perte de signal pendant 140 ms. 128
8.16 Prototype final de WatchIt. 128
8.17 Exemples de stimulus lors de l'expérience "eyes-free". a) Stimulus pour un geste de glissement à 2 contacts (geste #12 sur 8.1) ; b) Stimulus pour un élément du menu audio ; c) Retour affiché si le geste demandé est correctement effectué ; d) Retour en cas de geste incorrect. 130
8.18 Taux de réussite pour chaque combinaison de technique $\times$ bracelet. Les barres d'erreur indiquent l'écart type. 132
8.19 Temps d'exécution pour chaque combinaison de technique $\times$ bracelet. Les barres d'erreur indiquent l'écart type. 132
8.20 Taux de réussite moyen pour chaque geste de notre vocabulaire. 133
8.21 Temps d'exécution moyen pour chaque geste de notre vocabulaire. 133
8.22 Exemple de mire. L'élément du milieu de la liste, ici "Bhutan", apparaît sous la mire (en surbrillance cyan). Cet élément sera sélectionné lorsque l'utilisateur cessera son mouvement. 136
8.23 Utilisation d'un smartphone HTC Hero pour simuler l'écran de la montre. 138
8.24 Participant à l'expérience de défilement de listes. 139
8.25 Un exemple de mouvement avec correction. Le geste commence en *A* et finit en *D*. Le geste est ici décomposé en trois sous mouvements (*AB*, *BC* et *CD*). 140
8.26 Temps de navigation en fonction de la distance de la cible. 140
8.27 Comparaison du temps de navigation entre le pointage absolu sur le bracelet et l'interaction classique sur l'écran tactile. Ces temps de navigation moyens tiennent compte de toutes les valeurs de distances testées. Les résultats par valeurs de distance sont présentés en Figure 8.26. 141

© 2013 TELECOM ParisTech

8.28 Interface du logiciel de lecture musicale. Le **rectangle noir** indique l'état du bracelet, avec les sous-états associés aux bracelets externe et interne. Enfin, les 4 sliders indiquent les valeurs individuelles de chaque potentiomètre. Le **rectangle violet** indique l'état de la lecture dans la chanson courante. Le **rectangle rouge** présente les commandes de base (précédent, lecture, suivant), et le **rectangle vert** indique l'état du volume. Enfin, la liste de lecture se trouve sur la partie droite de la fenêtre. 147
8.29 Illustration d'un geste de glissement à 2 contacts simultanés sur le bracelet interne. 148
8.30 Illustration du geste de pointage à 3 contacts. Le geste commence à la position de repos (3 contacts). Il existe trois variantes, selon que l'utilisateur relève puis replace son pouce (comme illustré), son index, ou son majeur. Chaque point rouge représente un point de contact. Par convention, le bracelet externe est représenté en haut de l'image et le bracelet interne en bas. 148

© 2013 TELECOM ParisTech

© 2013 TELECOM ParisTech

Liste des exemples de code

© 2013 TELECOM ParisTech

Liste des tableaux

2.1 Différences entre valeurs théoriques et effectives. L'ID a été calculé selon la Formule 2.2. 23

4.1 Résultats des analyses de variance sur les trois instructions centrales, ou tout le jeu, menés sur les deux méthodes de calcul de TP_M (AtC et CtA) 63

6.1 Classification des bijoux selon leur localisation 75

7.1 Décomposition de tâches en sous-tâches et décompte du nombre de commandes nécessaires. 91

8.1 Liste des 15 gestes de notre vocabulaire 123
8.2 Liste des 15 éléments utilisés pour la technique de menu audio. 131
8.3 Distances entre les éléments testés selon la taille de la liste 137
8.4 Liste des commandes de notre application de démonstration. 149

© 2013 TELECOM ParisTech

Chapitre 1

Introduction Générale

SOMMAIRE

1.1 CONTEXTE 4

1.2 ORGANISATION DU MÉMOIRE 5

1.2.1 Loi de Fitts et pointage 6

1.2.2 Bijoux numériques 6

1.1 Contexte

Les dernières avancées technologiques ont permis la miniaturisation des composants électroniques, conduisant à la mise au point de nouveaux dispositifs miniatures plus petits que les téléphones intelligents ("smartphones"). Dès 1998, Steve Mann propose une montre permettant d'utiliser une application de visioconférence (Figure 1.1). En 2001, IBM présente le concept de bijoux numériques [Miner, 2001] puis une montre ordinateur (Figure 1.2) embarquant un système d'exploitation Linux [Narayanaswami *et al.*, 2002].



FIGURE 1.1 – La montre GNUX de Steve Mann propose une application sommaire de vidéoconférence dès 1998.

Au cours de ce travail de thèse, de nouvelles montres interactives sont sorties dans le commerce, comme I'm Watch [I'mWatch, 2013], Pebble [Pebble, 2013] et la SmartWatch de Sony [Sony, 2013], qui sont autant de preuves du dynamisme du domaine des petits dispositifs interactifs miniaturisés.
De tels objets soulèvent de nombreux problèmes en termes d'interaction : petite taille, peu de boutons physiques, écran petit ou inexistant. L'intégration de nouveaux capteurs (accéléromètre, gyroscope, caméra, boussole, capteur de pression...) permettant de détecter les mouvements, l'orientation, la pression ou encore le champ magnétique apporte de nouvelles possibilités d'interaction fondées sur les gestes que l'utilisateur réalise avec son dispositif. De par le facteur de forme (petite taille, poids), la connectivité (Bluetooth, Wifi, GSM) et les spécificités d'usage (l'utilisateur a en permanence le dispositif sur lui) des petits dispositifs mobiles, ce nouveau type d'interaction leur est particulièrement adapté. Nous nous intéressons ici à ce type d'interaction, où la principale préoccupation est d'augmenter la bande passante interactionnelle des bijoux numériques interactifs.

© 2013 TELECOM ParisTech



FIGURE 1.2 – La montre IBM embarque un système d'exploitation Linux en 2001.

La plupart des dispositifs de montres existants ont les mêmes limitations. En effet sur tous ces prototypes, la seule partie interactive pour l'utilisateur se trouve être l'écran ou son contour immédiat. Ceci pose de nombreux problèmes en termes d'interaction :

- L'écran servant à la fois pour l'interaction en entrée et en sortie (affichage), il existe un très fort risque d'occultation de l'écran par le doigt de l'utilisateur. En outre, le doigt étant relativement grand en proportion de l'écran, il est difficile d'être précis en interagissant. Ce problème bien connu en informatique mobile est nommé le "fat finger problem" [Vogel and Baudisch, 2007].
- L'interaction gestuelle n'en étant qu'à son commencement sur de tels dispositifs, existe-t-il des métriques et des modèles utilisables pour des interactions à ce niveau d'échelle ? En l'occurence, la loi de Fitts semble prometteuse puisque largement répandue, y compris dans l'informatique mobile.

1.2 Organisation du mémoire

Les deux problématiques présentées précédemment nous ont conduit à séparer le travail présenté dans ce manuscrit en deux parties complémentaires. En premier lieu, nous avons décidé de nous intéresser à la loi de Fitts. Cette loi empirique est très largement utilisée en IHM — l'informatique mobile n'y fait pas exception— et permet de prédire que le temps moyen (MT) d'acquisition d'une cible dépend de la largeur W de cette cible et de sa distance D :

$$\mu_T = a + b \times log_2 \left(\frac{D}{W} + 1 \right) \tag{1.1}$$

En second lieu, nous avons travaillé sur la classification et la mise au point de nouvelles techniques d'interaction, en particulier pour les montres interactives.

© 2013 TELECOM ParisTech

1.2.1 Loi de Fitts et pointage

Cette partie concerne les Chapitres 2 à 4. Elle débute par un chapitre (Chapitre 2) présentant une introduction au pointage et à la loi de Fitts, avec une présentation des nombreuses notions et métriques, ainsi que des différentes formulations de la loi.

Alors que notre objectif premier était de vérifier spécifiquement la validité de la loi de Fitts dans le cadre de faibles niveaux d'échelle, nous avons entrepris un travail plus en profondeur, en repartant de la formulation de la loi sous la forme d'un compromis vitesse/précision. Dans le Chapitre 3, nous exprimons la loi de Fitts sous la forme d'un compromis temps/erreur et présentons une nouvelle formulation de la loi avec une équation puissance à un seul coefficient ajustable.

Le Chapitre 4 quant à lui, s'intéresse à la notion d'Indice de Performance, qui permet de caractériser les performances globales d'utilisateurs sur tout périphérique de pointage. Alors que cette métrique est réputée invariante, nous montrons qu'il existe des cas particuliers où elle ne l'est plus.

Enfin, un récapitulatif des contributions sur le pointage est présenté dans le Chapitre 5, ainsi que des perspectives à court terme qui permettront de proposer un nouveau modèle et de nouvelles métriques pour le pointage à de très petits niveaux d'échelle.

1.2.2 Bijoux numériques

Cette seconde partie s'intéresse à l'interaction sur les bijoux numériques et à l'abondante littérature sur le sujet.

Dans une brève introduction au Chapitre 6, nous présentons la notion de bijou numérique et le situons dans le contexte de l'informatique mobile.

Le Chapitre 7 présente tout d'abord les résultats d'une enquête portant sur les habitudes de port de bijoux classiques, l'intérêt pour les bijoux numériques ainsi que les tâches que les répondants désireraient pouvoir effectuer sur un bijou interactif. Le chapitre permet aussi la mise en place d'un espace de classification pour les techniques d'interaction sur les bijoux numériques. Cet espace s'intéresse particulièrement à l'interaction gestuelle et se décompose en trois parties :

- une partie sur l'interaction non gestuelle,
- une partie sur l'interaction gestuelle, qui permet de classifier les techniques d'interaction selon les parties mobiles et le référentiel utilisés lors de l'interaction ;
- une section décrivant les modalités de sortie.

© 2013 TELECOM ParisTech

Cet espace permet d'une part d'avoir un aperçu des travaux existants dans le domaine des bijoux numériques et de guider la conception de techniques d'interaction associées.

Le Chapitre 8 présente **WatchIt**, un nouveau concept d'interaction sur les montres et bracelets interactifs. Nous sommes partis d'un constat simple : aucun produit ou prototype existant ne tire partie de la grande surface du bracelet pour interagir. Nous avons donc mis au point un prototype se basant sur des capteurs résistifs pour détecter des gestes sur le bracelet d'une montre interactive. En interagissant sur le bracelet, il est possible d'éliminer l'occultation de l'écran par le doigt, éviter le "fat-finger problem". Il est aussi possible d'interagir avec WatchIt sans regarder le dispositif. Enfin, nous montrons que le bracelet est une surface intéressante pour le défilement de liste et le contrôle continu. Quatre techniques d'interactions que nous avons mises au point sont détaillées.

Enfin, le dernier chapitre conclut ce manuscrit et présente les différentes perspectives de ces travaux.

© 2013 TELECOM ParisTech

© 2013 TELECOM ParisTech

Première partie

Pointage et loi de Fitts

Chapitre 2

État de l'art du pointage

SOMMAIRE

2.1 INTRODUCTION : POINTAGE ET LOI DE FITTS 12
2.1.1 Définition 12
2.1.2 Protocole discret vs. réciproque 14
2.1.3 Applications en IHM 14
2.2 FORMULATION ET TERMINOLOGIE 16
2.2.1 Variantes de l'équation d'origine 16
2.2.2 Indice de Difficulté (ID) d'une tâche 16
2.3 UTILISATION DE PARAMÈTRES EFFECTIFS 17
2.3.1 Illustration des notions présentées par une manipulation 17
2.3.2 Largeur W_e et distance D_e effectives 18
2.3.3 Indice de difficulté effectif 20
2.4 INDICE DE PERFORMANCE (THROUGHPUT) 20
2.4.1 Définition défendue par MacKenzie 21
2.4.2 Définition défendue par Zhai 21
2.4.3 Utilisation de l'Indice de Performance 22
2.5 APPLICATION AUX EXEMPLES PRÉSENTÉS 22
2.6 CONCLUSION 24

2.1 Introduction : Pointage et Loi de Fitts

Dans toutes sortes de situations de la vie quotidienne, nous avons besoin d'effectuer des mouvements destinés à atteindre un point de l'espace. Par exemple pour éteindre la lumière dans une pièce il nous faut atteindre avec la main un interrupteur mural. Le contexte de l'IHM ne fait pas exception. Depuis l'origine de l'interface graphique mise au point dans les années 1980, l'utilisateur s'exprime la plupart du temps au moyen de clics de souris sur diverses cibles graphiques comme des icônes ou des liens hypertexte. De manière générale on appelle pointage l'acte consistant à atteindre un objet identifié comme la cible avec un pointeur (par exemple, le bout du doigt, la pointe d'un stylo ou d'un stylet, ou un curseur d'écran).

Comme on le sait au moins depuis Woodworth [Woodworth, 1899], tout mouvement de pointage se heurte à un problème de conflit vitesse/précision. Un mouvement précis est lent, tandis qu'un mouvement rapide est imprécis. La loi de Fitts [Fitts, 1954], qui lie le temps de mouvement (indice de vitesse) à la difficulté (indice de la précision requise) de la tâche de pointage, est une description mathématique de la relation liant la vitesse et la précision de nos mouvements de pointage.

2.1.1 Définition

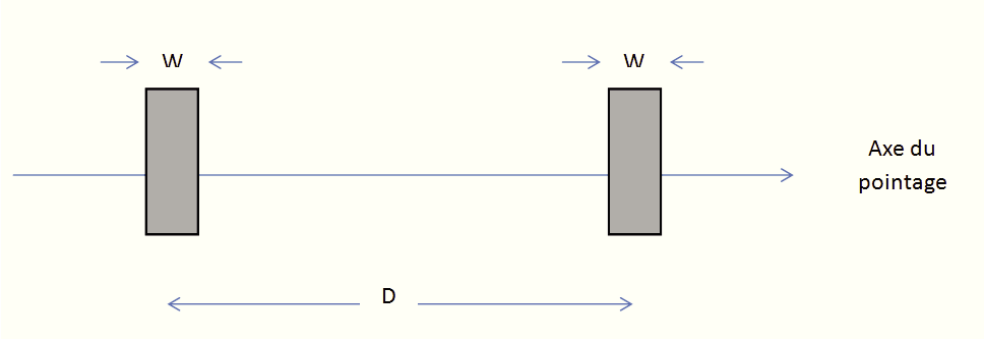


FIGURE 2.1 – Tâche de Fitts dans sa version classique, dite réciproque. Le participant doit atteindre, avec un pointeur d'écran, alternativement la cible gauche et la cible droite le plus grand nombre de fois possible en un temps donné (par exemple, 30s chez (Fitts, 1954)), en commettant le moins d'erreurs possible.

La loi de Fitts décrite par Fitts dès 1954 [Fitts, 1954] permet de prédire le temps moyen d'acquisition (MT) d'une cible en fonction du rapport de la distance à la cible (D) à la largeur de la cible (W) (Figure 2.1). Fitts a initialement proposé l'équation suivante :

$$MT = a + b \times log_2\left(\frac{2D}{W}\right) \tag{2.1}$$

© 2013 TELECOM ParisTech

où a et b dénotent des constantes expérimentales déterminées par régression linéaire (b > 0). MacKenzie [MacKenzie, 1992] a proposé une version révisée de l'équation d'origine, plus conforme à la théorie de l'information de Shannon [Shannon, 1948] :

$$MT = a + b \times log_2\left(\frac{D}{W} + 1\right) \tag{2.2}$$

On notera que l'Équation 2.2 figure dans un standard international [ISO, 2002].
Les équations 2.1 et 2.2 peuvent aussi s'écrire sous la forme générique suivante :

$$MT = f\left(\frac{D}{W}\right) \tag{2.3}$$

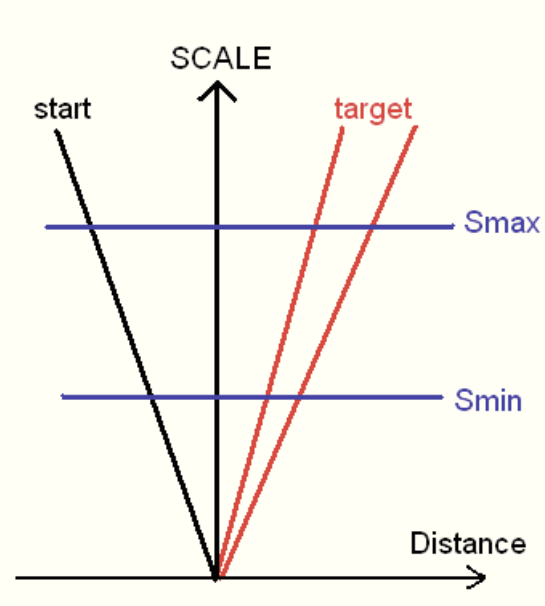


FIGURE 2.2 – Réprésentation de l'intervalle supposé de validité $[S_{min}; S_{max}]$ de la loi de Fitts (Guiard, 1999).

Si l'on analyse de plus près la formule 2.3, il est notable que le temps est influencé uniquement par le rapport $\frac{D}{W}$, et que tant que celui-ci demeure constant, le temps d'acquisition reste aussi constant. Cela implique que les couples {D = 3 m, W = 1 m} et { D = 3 mm, W = 1 mm } donneraient des valeurs de temps moyen comparables, et donc, que la loi de Fitts fonctionne par homothétie comme l'illustre la Figure 2.2. Une autre hypothèse importante est que la loi de Fitts ne peut être valable que dans un intervalle donné :

– En effet, en dessous d'un certain seuil d'échelle (S_{min}), la distance D pour atteindre la cible devient moins importante que la taille W de la cible elle-même [Chapuis and Dragicevic, 2011]. Dans ce cas, on doit supposer que le temps d'acquisition devra plutôt être exprimé sous la forme $MT = f(W)$.

© 2013 TELECOM ParisTech

– Au-dessus d'un certain seuil (Smax), au contraire, c'est la taille W de la cible qui devient un facteur négligeable face à la distance D que l'utilisateur doit parcourir, et par conséquent le temps de mouvement se calculera plutôt comme une fonction de la forme $MT = f(D)$.

Du fait des faibles échelles qu'implique l'interaction sur petits dispositifs mobiles, il est important de vérifier si :

– la borne basse de l'intervalle de validité S_{min} existe ;
– le cas échéant, si cette borne correspond au même ordre de grandeur d'échelle que le pointage sur bijou numérique.

2.1.2 Protocole discret vs. réciproque

Dans l'expérience d'origine de Fitts [Fitts and Peterson, 1964], les participants devaient effectuer des gestes de pointage entre deux cibles en faisant des aller-retours d'une cible à l'autre (cf. Figure 2.1). Cette manière de faire les gestes est appelée protocole **réciproque**.

Au cours des travaux présentés dans ce manuscrit, nous utiliserons une alternative qui consiste à effectuer les gestes de pointage toujours dans le même sens (de la gauche vers la droite). Dans cette configuration, il n'y a donc qu'une cible de largeur W située à une distance D de la ligne de départ. Par rapport à la Figure 2.1, on substitue donc la cible de gauche à une simple ligne. Ce protocole dit **discret** offre deux propriétés intéressantes par rapport au protocole réciproque :
D'une part, le point de départ étant fixe, l'erreur de pointage terminale ne pourra être attribuée qu'à l'exécution du mouvement, alors que dans le protocole réciproque cette erreur est également attribuable, dans une proportion inconnue, à l'erreur de positionnement initial du mouvement héritée du mouvement précédent.
D'autre part, le processus dont on mesure la durée est mieux défini : il s'agit de la pure exécution d'un mouvement, non compliquée par la nécessité de préparer le ou les mouvement(s) à suivre.

2.1.3 Applications en IHM

Depuis sa description en 1954, et plus particulièrement grâce aux travaux de Card [Card *et al.*, 1978] et MacKenzie ([MacKenzie, 1992],[Soukoreff and Mackenzie, 2004]), la loi de Fitts a été beaucoup utilisée pour évaluer expérimentalement de nombreux dispositifs d'entrée parmi lesquels :

– la souris, le plus courant ([Card *et al.*, 1978], [Bacon and Vu, 2011], [MacKenzie and Isokoski, 2008]),
– le joystick (parfois francisé en "manche à balai", qui permet de contrôler un curseur en mode vitesse ([Card *et al.*, 1978], [Epps, 1986], [Kantowitz and Elvers, 1988], [Casiez and Vogel, 2008]...),

© 2013 TELECOM ParisTech

- les touches de direction ([Card *et al.*, 1978]),
- les pédales pour les pieds, agissant comme des flèches de direction gauche et droite ([Drury, 1975]),
- les surfaces tactiles ([Bacon and Vu, 2011]),
- les pavés tactiles (touchpad) ([Epps, 1986]),
- les boules de commande (trackball) ([Epps, 1986]),
- les tablettes graphique ([Guiard *et al.*, 2011]),
- les dispositifs de suivi du regard (eye-tracker) ([Ware and Mikaelian, 1987])

Tous ces dispositifs sont utilisables par différentes parties du corps, comme la main, le pied ou les yeux. Ils peuvent être des périphériques de pointage **direct** (écran tactile, où l'utilisateur indique précisément sur le dispositif d'affichage le point qu'il vise) ou **indirect** (le contrôle du curseur se fait sur un dispostif distinct de l'écran). De la même façon, les pointages sont **absolus** (l'utilisateur pointe une coordonnée pour y placer le curseur), ou **relatifs** (l'utilisateur imprime un mouvement au dispositif d'entrée qui fait se déplacer le curseur dans une direction).

En informatique et en IHM en particulier, la loi de Fitts est massivement appliquée à des tâches où l'utilisateur doit positionner un curseur sur une cible à l'écran. D'après sa formulation originelle, elle s'applique spécifiquement dans les cas suivants :

1. Elle s'applique uniquement au mouvement dans une dimension unique et non pas à un mouvement en deux dimensions (même si des extensions ont été proposées, par MacKenzie [MacKenzie and Buxton, 1992] ou par Accot et Zhai —loi de Steering— [Accot and Zhai, 1997] [Accot and Zhai, 2003]).
2. Elle s'applique à des tâches effectuées avec ou sans entraînement
3. Elle est aussi très utilisée pour l'étude de la saisie de texte, sur clavier physique ou virtuel ([MacKenzie and Zhang, 1999] [Zhai *et al.*, 2002]).

La loi de Fitts permet de déduire des recommandations cruciales pour la conception d'interfaces graphiques :

1. Les boutons et autres contrôles actifs, graphiques ou physiques doivent être d'une taille suffisante, puisqu'il est difficile de cliquer sur de petits contrôles.
2. Les bords et les coins de l'écran d'ordinateur sont faciles à atteindre, parce qu'une fois que le pointeur a atteint le bord, il y reste indépendamment de la distance parcourue avec la souris, ce qui peut se traduire par une largeur de cible (W) infinie, donc un temps d'acquisition tendant vers 0. Dans ce genre de cas, des problèmes peuvent se poser, quand le curseur de la souris "glisse" le long des bords par exemple [Appert *et al.*, 2008]. Cela explique la position du menu "Démarrer" dans les version récentes de Windows, ou du Dock sous Mac OS X. Dans le cas d'un écran tactile, cette assertion n'est pas toujours vraie, parce que la taille du doigt peut rendre l'acquisition de cible dans un angle ou trop près d'un bord particulièrement pénible.

© 2013 TELECOM ParisTech

3. De la même façon, un menu placé sur un bord de l'écran (sous Mac OS) est plus facilement pointable qu'un menu placé sur une fenêtre au milieu de l'écran.

2.2 Formulation et terminologie

Depuis sa formulation par Fitts en 1954 [Fitts, 1954], de nombreuses formules ont été proposées. Nous allons d'abord passer en revue les principales variantes proposées, puis la notion d'indice de difficulté sera explicitée. Enfin nous présenterons une limitation des notions de distance et largeur, fixées dans le protocole expérimental, qui sont remplacées par la distance et largeur effectives, déterminées expérimentalement.

2.2.1 Variantes de l'équation d'origine

Depuis 1954 [Fitts, 1954] et la formulation de Fitts 2.1, il y a eu nombre de variantes proposées. Dès 1956, Crossman suggère une modification mineure de la formule d'origine [Crossman, 1956].

$$MT = a + b \times log_2\left(\frac{D}{W}\right) \tag{2.4}$$

Comme Welford [Welford *et al.*, 1969] a proposé par ailleurs la variante $MT = a + b \times log_2(\frac{D}{W} + \frac{1}{2})$, et MacKenzie [MacKenzie, 1992] la variante $MT = a + b \times log_2(\frac{D}{W} + 1)$, on voit qu'il existe une famille générale de modèles logarithmiques de la forme

$$MT = a + b \times log_2\left(\frac{D}{W} + k\right) \tag{2.5}$$

où k, égal à 0 (Crossman [Crossman, 1956]), $\frac{1}{2}$ (Welford [Welford *et al.*, 1969]) ou 1 (MacKenzie [MacKenzie, 1992]), est un paramètre fixé une fois pour toutes à partir de considérations théoriques.

Plus récemment, mais avant MacKenzie [MacKenzie, 1992], Meyer et al [Meyer *et al.*, 1990] ont proposé une autre formule, puissance au lieu d'être logarithmique :

$$MT = a \times \left(\frac{D}{W}\right)^b \tag{2.6}$$

Les différentes formules présentées ont le point commun d'utiliser le rapport $\frac{D}{W}$ comme paramètre unique permettant de prédire le temps de mouvement.

2.2.2 Indice de Difficulté (ID) d'une tâche

Étant donné que, dans la gamme d'échelles optimales où la loi de Fitts est valide, le rapport $\frac{D}{W}$ semble déterminer à lui tout seul le temps d'acquisition d'une cible, ce rapport peut aussi exprimer

© 2013 TELECOM ParisTech

la difficulté d'une tâche de pointage. Selon l'équation choisie (celle originale de Fitts 2.1 ou celle de MacKenzie 2.2), il y a plusieurs manières de définir l'indice de difficulté d'une tâche (ID). Mais de manière générique, on peut reformuler l'équation de la loi de Fitts en fonction de l'ID :

$$MT = a + b \times ID \tag{2.7}$$

De la même manière, on peut écrire l'ID sous la forme suivante :

$$ID = log_2(f\left(\frac{D}{W}\right)) \tag{2.8}$$

Avec un ID qui est un logarithme en base 2 dans 2.8, la difficulté d'une tâche de pointage peut être exprimée en bits d'information. En ce qui concerne l'expression exacte de l'ID, Mackenzie [MacKenzie, 1995] suggère d'utiliser la notation $ID = log_2(\frac{D}{W} + 1)$ qui :

1. donne de meilleurs résultats en termes de qualité de l'ajustement linéaire,
2. correspond mieux à la théorie de l'information telle que formulée par Shannon [Shannon, 1948],
3. permet d'obtenir un ID toujours strictement positif (alors qu'avec la formulation de Fitts, si $W = 2 \times D$ alors $ID = 0$.

2.3 Utilisation de paramètres effectifs

Dans une expérience de pointage standard, les variables D et W sont fixées par le protocole expérimental. Toutefois, selon les couples de valeurs choisis pour D et W, il est possible que les utilisateurs aient tendance à cibler les bords de la cible plutôt que le centre de la cible. Il est aussi possible que les points soient distribués dans une zone beaucoup plus petite que la largeur de la cible ne l'autorise.

Pour illustrer ces problèmes, nous allons présenter trois exemples de tâches. Ces exemples possèdent la même valeur pour D (D=1000 pixels). Seule change la valeur de W qui se trouve être respectivement de 100, 1 et 1000 pixels. Sur les graphiques présentés ci-après, le point 0 indique le centre de la cible et chaque point représente le point où l'utilisateur a validé son mouvement (par un clic de souris). Les axes vont de l'extrêmité gauche à l'extrêmité droite de la cible, afin de montrer la totalité de l'espace accessible à l'utilisateur pour valider un mouvement.

2.3.1 Illustration des notions présentées par une manipulation

Nous allons présenter un certain nombre de notions relatives à la loi de Fitts dans ce chapitre. La plupart sont des notions étroitement liées (Distance et Amplitude, Largeur et Largeur effective). C'est pourquoi nous avons réalisé une rapide manipulation que nous allons maintenant décrire.

© 2013 TELECOM ParisTech

Poursuivant un simple but d'illustration, cette manipulation a été effectuée avec une seule participante (30 ans, droitière). Nous avons utilisé ici le protocole discret au lieu de réciproque. La ligne de départ et la cible étaient affichées en rouge, avec une valeur de D fixée à 1000 pixels. Trois conditions ont été testées :

1. Une condition avec une valeur W confortable (W = 100 pixels), soit un ID de Shannon de 3,46 bits.
2. Une condition avec une valeur W très faible (W = 1 pixel), soit un ID de Shannon de 9,97 bits.
3. Une condition avec une valeur W très élevée (W = 1000 pixels), soit un ID de Shannon de 1 bit.

L'expérience était divisé en 3 blocs (1 par condition). La participante a effectué 100 gestes par bloc. L'ordre des blocs est le même que celui des conditions ci-dessus.

2.3.2 Largeur W_e et distance D_e effectives

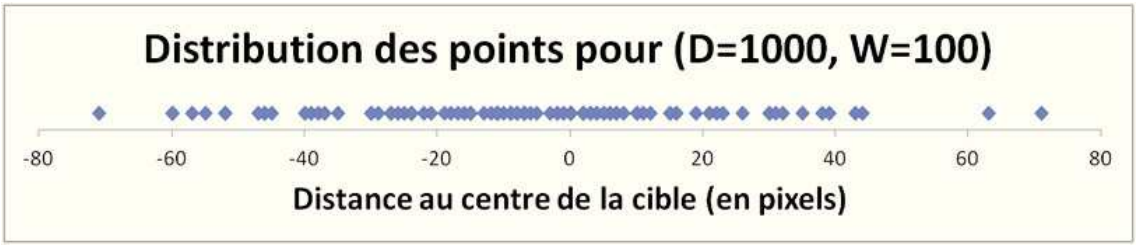


FIGURE 2.3 – Exemple de distribution de mouvements pour une tâche de difficulté moyenne où D=1000 pixels et W=100 pixels (ID de Shannon = 3,46 bits). Les valeurs négatives sont des undershoots.

Dans l'exemple de la Figure 2.3, les points d'arrivée de mouvement sont distribués à peu près autour du centre de la cible, en particulier dans un l'intervalle [-60 ; 40], laissant quelques rares points vers les extrémités. Dans l'exemple présenté dans la Figure 2.4, la distribution des points est beaucoup moins homogène. Tout d'abord, presque tous les points se trouvent dans un intervalle [-500 ; -200] (avec un seul point près du centre de la cible). Cela signifie que l'utilisateur a, lors de cette session, visé un centre "effectif" de cible beaucoup plus à gauche que le centre réel de la cible, ce qui lui permet de minimiser le temps d'acquisition (puisque la distance à parcourir se retrouve amoindrie). Dans l'exemple présenté dans la Figure 2.5 où la difficulté est extrêmement élevée, les points sont centrés sur la cible, mais l'intervalle de dispersion fait près de 35 fois la largeur théorique : les points sont dispersés dans un intervalle [-20 ;+15].

Dans ce cas, est-il encore possible de considérer dans l'exemple W=1 pixel (Figure 2.5) que le paramètre de taille de cible d'un pixel est réaliste ? Manifestement, la dispersion des points excède très largement la tolérance disponible. Dans le second exemple (Figure 2.4) non seulement la taille

© 2013 TELECOM ParisTech



FIGURE 2.4 – Exemple d'une distribution de mouvements pour une tâche extrêmement facile de paramètres D=1000 pixels et W=1000 pixels (ID de Shannon = 1 bit).



FIGURE 2.5 – Exemples de mouvements pour une tâche très difficile de paramètres D=1000 pixels et W=1 pixel (ID de Shannon = 9,97 bits).

nominale de cible de 1000 pixels, mais aussi la distance nominale de 1000 pixels ne correspondent pas au mouvement réellement effectué.

Largeur effective

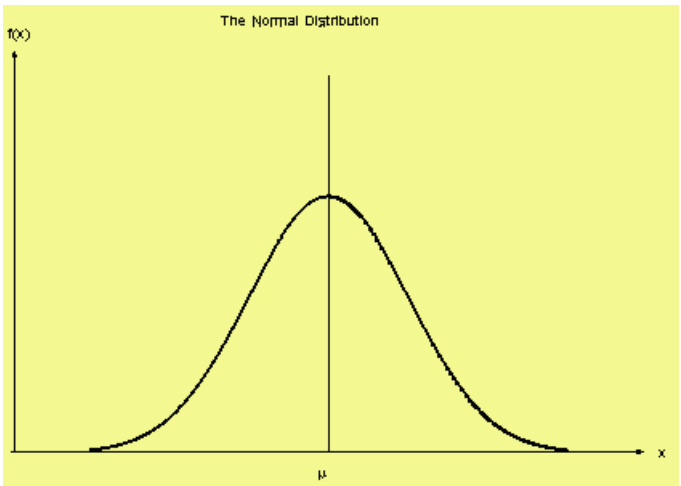


FIGURE 2.6 – Distribution normale des points (avec en Y la fréquence des points).

Dans [MacKenzie, 1992], MacKenzie suggère de normaliser la taille de la cible après expérience, afin de refléter ce que le participant a effectivement visé (output condition), plutôt que ce

© 2013 TELECOM ParisTech

à quoi l'expérimentateur s'attendait qu'il ne vise (input condition). Pour cela, il définit la largeur effective de la cible (notée W_e, qu'il calcule d'après la variabilité des coordonnées des points d'arrivée de mouvement. En notant σ l'écart type des points à la moyenne, et en se basant sur une distribution normale des points (en gaussienne, illustrée en Figure 2.6, il est possible de prédire que 96% des points vont se trouver dans l'intervalle $[-2,066 \times \sigma; +2,066 \times \sigma]$.

On peut donc définir la largeur effective de la cible, notée W_e, ainsi :

$$W_e = 4,133 \times \sigma \tag{2.9}$$

Distance effective

Tout comme il est possible de déterminer la largeur effective de la cible a posteriori, il est aussi possible de déterminer la distance effective du mouvement de la même façon. Pour cela, on définit la distance effective (notée D_e) comme étant la moyenne des coordonnées des points d'arrivée de mouvements. Si l'on note μ cette moyenne, alors la distance effective (parfois aussi appelée amplitude effective) est notée comme suit :

$$D_e = \mu_A \tag{2.10}$$

2.3.3 Indice de difficulté effectif

Puisque les notions de largeurs et de distances effectives ont été définies, il convient de proposer aussi une métrique pour noter l'indice de difficulté effectif d'une tâche. Pour cela, on reprend les formulations proposées dans l'Équation 2.8. On préférera formuler l'ID comme préconisé par MacKenzie [MacKenzie, 1992], ce qui donne la formulation suivante :

$$ID_e = log_2\left(\frac{D_e}{W_e} + 1\right) \tag{2.11}$$

2.4 Indice de performance (Throughput)

Une métrique existe pour définir la difficulté d'une tâche (cf sections 2.2.2 et 2.3.3). Il est souhaitable, de la même façon, de définir une métrique pour décrire la qualité d'une performance pour une tâche donnée. Il serait alors possible de classifier et comparer différentes techniques et dispositifs de pointage, ou même différentes catégories de participants, etc.

En se basant sur l'Équation 2.7, on sait que le temps d'acquisition dépend linéairement de la difficulté de la tâche. Ces deux mesures, ayant pour unité respectivement des secondes et des bits d'information peuvent être combinées pour noter un Indice de Performance (Index of Performance, IP), "bande passante" (bandwidth) ou Throughput. L'IP est défini comme étant l'inverse de la pente de la régression linéaire. Pour cela, on modifie l'Équation 2.7 ainsi :

© 2013 TELECOM ParisTech

$MT = a + b \times ID$
$\Leftrightarrow MT - a = b \times ID$
$\Leftrightarrow \frac{MT-a}{ID} = b$; (b exprimé en "secondes par bits")
$\Leftrightarrow \frac{1}{b} = \frac{ID}{MT-a}$
D'où le résultat suivant, avec IP exprimé en bits par seconde.

$$IP = \frac{ID}{MT - a} \tag{2.12}$$

Il existe deux formulations concurrentes pour l'Index de Performance (Throughput). Même si la formulation reste globalement la même (cet indice se calcule par le rapport $\frac{ID}{MT}$), le paramètre a, ordonnée à l'origine de la fonction de Fitts, est soit laissé de côté, soit pris en compte.

2.4.1 Définition défendue par MacKenzie

La première formulation suppose que l'ordonnée à l'origine a tend normalement vers zéro et peut être considérée comme négligeable. Le calcul de l'IP se fait donc directement en divisant l'Indice de Difficulté, par le temps de mouvement. En IHM, cette formulation est soutenue par MacKenzie [MacKenzie, 1992] et se trouve notée ainsi :

$$TP_M = \frac{ID}{MT} \tag{2.13}$$

(Le M en indice désignant MacKenzie.)

2.4.2 Définition défendue par Zhai

Par opposition à 2.13, la seconde formulation, soutenue par Zhai et étudiée en 2004 [Zhai, 2004] insiste que la variable a n'est que très rarement nulle et doit donc faire partie intégrante du calcul d'Indice de Performance, d'où la notation suivante (le Z en indice renvoyant à Zhai) :

$$TP_Z = \frac{ID}{MT - a} \tag{2.14}$$

Plus récemment, Guiard et Olafsdottir [Guiard and Olafsdottir, 2011] ont fait valoir que la question de savoir si l'ordonnée à l'origine de la loi de Fitts doit ou non valoir zéro est indécidable parce que l'échelle de l'ID, dans toutes ses variantes publiées, ne comporte pas de vrai zéro physique. Il n'y a aucun sens à discuter de la valeur du temps de mouvement pour ID=0 puisque cette abscisse ne correspond généralement à aucune tâche de pointage concrètement praticable.

© 2013 TELECOM ParisTech

2.4.3 Utilisation de l'Indice de Performance

À l'instar de l'Indice de Difficulté (ID), il est possible de calculer l'Indice de Performance en utilisant l'Indice de Difficulté effectif (ID_e) qui reflète mieux les performances réelles des participants. Si l'on reprend la formulation de Zhai (2.14) l'IP_e se calcule de cette façon :

$$TP_{eZ} = \frac{ID_e}{MT - a} \tag{2.15}$$

Dans la littérature, l'IP a été utilisé pour comparer les performances de dispositifs de pointage variés. C'est avec ce calcul que Card [Card *et al.*, 1978] a pu montrer que la souris offrait de meilleures performances de pointage qu'un joystick.
La notion même d'indice de performance indique qu'en théorie, pour chaque couple <utilisateur, dispositif de pointage>, il existe une valeur d'IP constante qui caractérise la performance d'un utilisateur. Cette notion de bande passante, mesurée en bits/s et propre à chaque utilisateur est globalement acceptée, et certaines études (comme [MacKenzie and Isokoski, 2008]) tendent à prouver que cette valeur se conserve effectivement même en changeant les instructions de vitesse et de précision données aux utilisateurs en cours d'expérience. Nous verrons toutefois dans le Chapitre 4 que la procédure décrite dans le papier souffre d'imprécisions, et montrerons que selon la méthode de calcul, cet Indice de Performance ne se conserve pas forcément.

2.5 Application aux exemples présentés

Nous avons présenté dans les sections précédentes les paramètres et métriques de la loi de Fitts, avec les variantes. Nous allons maintenant calculer les largeurs, distances et indices de difficulté théoriques et effectifs et comparer ces valeurs entre elles.

Pour rappel, trois couples de conditions [D,W] ont été testés : [D=1000 pixels, W=100 pixels], [D=1000 pixels, W=1 pixel] et [D=1000 pixels, W=1000 pixels].

En ce qui concerne le temps, et vu la distribution des échantillons, la valeur MT est la moyenne des 100 temps de mouvements pour chaque condition.

La Figure 2.7 représente le tracé qui permet de déterminer les coefficients a et b de la loi de Fitts. Sur l'axe des abscisses est présenté l'Indice de Difficulté effectif (Équation 2.11), et en ordonnées le temps moyen (MT). Vu le très faible nombre de conditions (3), les résultats ne sont fournis qu'à titre d'illustration et pour mettre en avant les potentielles différences entre valeurs théoriques et valeurs effectives.

Le Tableau 2.1 fait apparaître l'écart entre les valeurs nominales ou théoriques, fixées par l'expérimentateur, et les valeurs effectives, qui caractérisent la performance réelle du participant. Dans

© 2013 TELECOM ParisTech

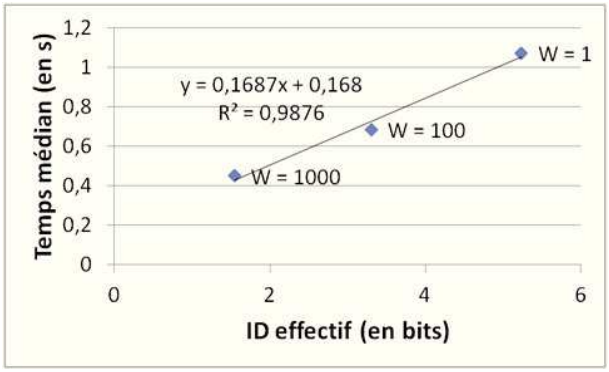


FIGURE 2.7 – Calcul de la loi de Fitts avec les valeurs effectives pour les 3 exemples présentés.

Paramètres	W confortable	W très faible	W très élevée
D (pix.)	1000		
W (pix.)	100	1	1000
ID (bits)	3,46	9,97	1
D_e (pix.)	993,60	999,38	617,45
W_e (pix.)	111,97	27,28	321,28
ID_e (bits)	3,30	5,23	1,54
MT (secs.)	0,685	1,07	0,45
TP_{eZ} (bits/s)	6,38	5,80	5,48
TP_{eM} (bits/s)	4,82	4,89	3,43

TABLE 2.1 – Différences entre valeurs théoriques et effectives. L'ID a été calculé selon la Formule 2.2.

la condition de difficulté moyenne (notée "W confortable"), la largeur effective W_e est proche de la largeur W (12% d'écart). Il y a aussi un très faible écart entre D et D_e (6,4%) et entre l'ID et l'ID_e.

Dans le cas d'une tâche de difficulté extrêmement élevée ("W très faible"), on note aussi que l'amplitude D_e est pratiquement égale à D (à 0,62% près). En revanche, l'écart entre largeur effective et théorique est énorme : W_e est en effet 27 fois plus grand que W.

Enfin, dans le cas d'une tâche de difficulté extrêmement faible, on observe à la fois un grand écart entre W et W_e puisque W_e est environ 3 fois plus petit que W, mais on observe aussi un effet intéressant. En effet, dans la mesure où la cible est très grande dans cette condition, la participante tend à limiter ses mouvements dans la partie gauche de la cible, et donc effectue des mouvements de moindre amplitude. Cela se voit sur la valeur de D_e qui ne vaut que 61,7% de D.

Ces différences entre valeurs théoriques et mesurées expliquent à leur tour les différences observables au niveau de l'Indice de Difficulté, surtout dans l'exemple "W très faible" où celui-ci diminue de 48%. Les indices de performances souffrent d'une relative variabilité, mais avec un seul participant et trois conditions on ne peut évidemment conclure sur ce point. On note que les

© 2013 TELECOM ParisTech

deux expressions de l'*IP* donnent des résultats moyens assez différents (5,89 contre 4,38). De la même façon, pour un même participant, et selon la condition, les valeurs d'indice de performance varient ici presque du simple au double (de 3,43 bits/s au minimum jusque 6,38 bits/s).

Cette rapide présentation par le biais de deux exemples montre qu'il peut y avoir un écart très fort entre valeurs théoriques et effectives. Il convient donc, afin de décrire au plus près le comportement "réel" de l'utilisateur, de privilégier les valeurs effectives.

2.6 Conclusion

En conclusion, la loi de Fitts offre de nombreuses variantes en termes de métriques et de formules. Nous avons présenté les variantes les plus répandues et utilisées. Toutefois, cette multiplicité de notations met en avant certaines zones d'ombre du domaine (formules alternatives de la loi de Fitts, notation et propriétés de l'indice de performance) auxquelles nous avons tenté d'apporter des solutions dans ce travail de thèse. Le développement de nombreuses études sur la loi de Fitts a aussi permis de changer progressivement les variables utilisées. Là où Fitts a à l'origine utilisé des paramètres fixés en amont par l'expérimentateur (nommément D et W [Fitts, 1954]), les auteurs suivants ([MacKenzie, 1992]) ont préféré utiliser des paramètres reflétant mieux les mouvements réellement effectués par l'utilisateur (D_e et W_e) et toutes les métriques dérivées associées.

© 2013 TELECOM ParisTech

© 2013 TELECOM ParisTech

© 2013 TELECOM ParisTech

Chapitre 3

Expression de la loi de Fitts comme un compromis temps/erreur

SOMMAIRE

3.1 MOTIVATION 28
3.2 TEMPS ET ERREUR 28
3.2.1 Le temps n'est pas une vitesse 28
3.2.2 La précision : Ni information ni difficulté 28
3.2.3 Distance relative ($\frac{D}{W}$) vs. Tolérance relative ($\frac{W}{D}$) 30
3.2.4 Géométrie de la tâche contre performance du mouvement 30
3.3 LA LOI DE FITTS COMME UNE THÉORIE D'AFFECTATION DES RESSOURCES 32
3.4 MISE EN ÉVIDENCE DU COMPROMIS TEMPS/ERREUR DANS LES DONNÉES DE FITTS (1954) 33
3.4.1 Une relation en loi puissance entre temps de mouvement et erreur relative relative (RVE) 34
3.4.2 Quantité de ressources 34
3.4.3 Affectation des ressources : le déséquilibre stratégique 36
3.4.4 Discussion 38
3.5 DONNÉES EXPÉRIMENTALES SUR LE COMPROMIS TEMPS/ERREUR . 38
3.5.1 Méthode 39
3.5.2 Résultats et discussion 41
3.6 IMPLICATIONS POUR LA RECHERCHE FONDAMENTALE ET L'IHM . 47

3.1 Motivation

Nous introduisons une nouvelle formulation de la loi de Fitts loi qui permet de caractériser le compromis vitesse/précision de cette loi, tel que traditionnellement supposé dans la littérature IHM [MacKenzie, 1992] et psychologique [Meyer *et al.*, 1990] [Plamondon and Alimi, 1997]. Un compromis se définit comme une dépendance mutuelle entre deux quantités qui se trouvent en conflit l'une avec l'autre, parce qu'elles s'appuient toutes deux sur la même réserve limitée de ressource disponible : plus la performance augmente sur une des deux quantités, plus elle diminue sur l'autre ([Norman and Bobrow, 1975] [Norman and Bobrow, 1976]).

Si la littérature a depuis toujours postulé que la loi de Fitts est l'expression d'un compromis, ou d'une fonction d'échange, entre la vitesse et la précision du mouvement dirigé vers une cible, le consensus sur ce que recouvre ces expressions est assez vague. Comprendre avec un peu plus de précision comment ce concept s'applique dans le cadre de tâches de Fitts paraît primordial.

Une équation de la loi de Fitts permet d'exprimer que le temps de mouvement moyen (que l'on notera μ_T pour faire apparaître que l'on a affaire à une statistique de tendance centrale, typiquement une moyenne de temps) nécessaire pour acquérir une cible de difficulté ID dépend de la quantité $\frac{D}{W}$ qui est le rapport entre la distance de la cible D et sa taille W. Quelques-unes des nombreuses formulations possibles de la loi de Fitts ont été détaillées précédemment (Section 2.2, Formules 2.1, 2.2, 2.4 et 2.6). On observera qu'à proprement parler aucune de ces formules n'exprime un compromis entre la vitesse et la précision des performances.

3.2 Temps et erreur

3.2.1 Le temps n'est pas une vitesse

Tout d'abord, la variable dépendante μ_T est une mesure du temps. En général, cette quantité est corrélée négativement avec la vitesse moyenne de mouvement : plus le temps est élevée, plus la vitesse moyenne est faible. Toutefois, les dimensions de ces deux quantités sont totalement différentes, respectivement du temps $[T]$ et un rapport longueur sur temps $[LT^{-1}]$.

3.2.2 La précision : Ni information ni difficulté

D'autre part, la manière dont le quotient $\frac{D}{W}$, qui détermine l'Indice de Difficulté (défini en Section 2.2.2), permet de mesurer la précision n'est pas claire. À la lumière de la théorie de l'information [Shannon, 1948], Fitts [Fitts, 1954] a supposé que l'information véhiculée par un mouvement est $log_2(\frac{2D}{W})$, une formule que MacKenzie [Mackenzie, 1989] [MacKenzie, 1992] a corrigé en $log_2(\frac{D}{W}+1)$. L'information et la précision des mouvements sont certainement liées d'une manière

© 2013 TELECOM ParisTech

ou d'une autre, mais à notre connaissance ce lien n'a pas été clairement décrit.

On peut supposer que les fonctions de $\frac{D}{W}$ présentes dans les Équations 2.1, 2.2 et 2.4 expriment des estimations de la difficulté d'un mouvement en même temps que de l'information sur un mouvement, mais ces équations ne permettent pas de mesurer la précision d'un mouvement. Traditionnellement, pour les partisans de l'approche se basant sur la théorie de l'information de Shannon [Shannon, 1948], MacKenzie en tête [MacKenzie, 1992], la difficulté d'une tâche se mesure en bits d'information et se trouve calculée par des mesures sur la tâche, à savoir le rapport $\frac{D}{W}$. Mais ce n'est que de l'information, et faute d'une définition propre, il est difficile de voir comment la difficulté de la tâche pourrait avoir un rapport avec la précision.

Si l'on souhaite caractériser la difficulté comme un effort subjectif [Rosenbaum and Gregory, 2002], on se heurterait au fait qu'aucune des réponses proposées pour l'*ID* n'exprime cet effort de manière convenable. Dans le spectre haut de l'*ID* (4 bits ou plus selon la formulation dite de Shannon), il est incontestable que plus l'*ID* augmente, plus la tâche apparaîtra difficile aux participants. Toutefois, dans le spectre bas (2 bits ou moins), les participants rencontrent des difficultés pour bien répartir leurs mouvements sur l'intégralité de la cible, et ont tendance à les concentrer dans une sous-zone de la cible [Crossman, 1956] [Fitts and Radford, 1966] [MacKenzie, 1992], comme illustré par les exemples présentés en Section 2.5. Une tâche de Fitts devient donc difficile non seulement avec un *ID* très grand, mais aussi (dans un sens différent) avec des *ID* très faibles. Le non respect par les participants des instructions dans les tâches à faible *ID* reflète leur réticence ou l'incapacité de produire des mouvements rapides à cause de leur excessif coût énergétique. Cette observation tend à être négligé dans une approche exclusivement basée sur la théorie de l'information de Shannon.

Mais à partir du moment où il est reconnu qu'un mouvement implique non seulement des bits d'information, mais aussi de l'énergie, il devient clair que la difficulté de mouvement, caractérisée comme effort subjectif, n'entretient pas une relation linéraire avec la variable connue sous le nom d'*ID* dans le domaine de la loi de Fitts [Guiard and Ferrand, 1998]. L'information, telle qu'estimée par l'*ID*, ne peut pas être prise comme un indice de difficulté subjectif.

Ainsi, une équation de la loi de Fitts typique exprime une relation, non pas entre une vitesse et une précision, mais plutôt entre un temps de mouvement et un rapport sans dimension dont la relation avec précision et difficulté n'est pas clair. Nous présentons maintenant quelques distinctions importantes pour reformuler la loi de Fitts comme un compromis explicite.

© 2013 TELECOM ParisTech

3.2.3 Distance relative ($\frac{D}{W}$) vs. Tolérance relative ($\frac{W}{D}$)

Fitts [Fitts, 1954] (p. 266) a présenté son indice de difficulté sous la forme $ID = -log_2(\frac{W}{2D})$, plutôt que $ID = log_2(\frac{2D}{W})$. Ce sont deux formulations mathématiques différentes de la même chose, et donc l'utilisation de l'une ou de l'autre pourrait être considérée comme une question futile. En fait, cette distinction est critique car ces deux quotients désignent des mesures différentes dans le monde physique. Le quotient de $\frac{D}{W}$ est une mesure de distance relative (relative target distance, RTD), c'est-à-dire une distance exprimée comme un nombre de cibles. En revanche, le quotient de $\frac{W}{D}$est une mesure de tolérance relative (relative target tolerance, RTT), c'est-à-dire une tolérance exprimée comme un pourcentage de la distance.

Bien qu'il ait été une tradition de formuler la loi de Fitts comme une équation de la forme $\mu_T = f(\frac{D}{W})$, il y a lieu de préférer l'écriture inverse $\mu T = f(\frac{W}{D})$ [Guiard and Olafsdottir, 2011]. Tout d'abord, il y a un problème au niveau de l'échelle de mesure [Stevens, 1946] : la distance relative à la cible ($\frac{D}{W}$) manque d'un zéro physique, parce que le cas-limite où $D = 0$ et $W > 0$, donc $\frac{D}{W} = 0$, viole la définition même d'une tâche de Fitts, parce que si $D = 0$, aucun mouvement n'est nécessaire [Guiard and Olafsdottir, 2011]. En revanche, la tolérance relative de la cible $\frac{W}{D}$ possède un vrai zéro physique : le cas-limite où $W = 0$ et $D > 0$, donc $\frac{W}{D} = 0$, correspond à une tâche avec une tolérance nulle à l'erreur, ce qui fait sens et a d'ailleurs été étudié [Schmidt *et al.*, 1979]. Ainsi, seul $RTT = \frac{W}{D}$, et non $RTD = \frac{D}{W}$, fonctionne du point de vue métrique comme une échelle de rapport [Stevens, 1946]. Ceci est important car un niveau plus élevé de mesure de variables expérimentales signifie un cadre plus contraignant pour tester des hypothèses théoriques [Roberts and Pashler, 2000]. Par exemple, l'ordonnée à l'origine d'une droite de régression empirique n'est interprétable que si la variable x possède un zéro physique [Guiard and Olafsdottir, 2011].

3.2.4 Géométrie de la tâche contre performance du mouvement

Cette section attire l'attention sur une distinction évidente qui n'a toutefois reçu que peu d'attention dans la littérature. D'une part, les expérimentateurs ont un contrôle total sur D et W, deux variables déterministes qui caractérisent la disposition géométrique des cibles et qui servent à spécifier aux participants respectivement, l'amplitude moyenne de mouvement requise et la variabilité des points d'arrivée du mouvement. D'autre part, il convient de caractériser la performance réelle des participants, qui ne répond pas nécessairement aux spécifications, et qu'il convient de caractériser.

Les mesures élémentaires (considérant un mouvement individuel) sont la durée du mouvement T et son amplitude A, à partir de laquelle une valeur d'erreur peut être calculée, définie comme $E = A - D$. Contrairement à D et W, les variables T et A (ainsi que E) sont des variables aléatoires, ce qui reflète la variabilité naturelle des actions humaines. Nous devons faire une distinction

© 2013 TELECOM ParisTech

claire entre d'un côté T, A et E, qui se mesurent au niveau du mouvement individuel, et de l'autre les statistiques de tendances centrales comme les moyennes μ_T, μ_A et μ_E, qui se calculent sur des échantillons de mouvements.

Les équations formulées précédemment (en particulier dans la Section 2.2 sont délibérement écrites sous la forme $MT = f(\frac{D}{W})$ plutôt que $MT = f(\frac{A}{W})$ comme c'est l'usage dans la littérature depuis Fitts [Fitts, 1954]. Cette dernière notation est en effet logiquement bancale. Si W désigne sans ambiguïté une propriété de la disposition géométrique des cibles, la signification de A est généralement peu claire, elle peut en effet correspondre à D, se rapportant aussi à la disposition géométrique, ou à μ_A qui se réfère spécifiquement au mouvement effectué par l'utilisateur. L'écriture de la loi de Fitts est particulièrement ambigue à cet égard lorsque W est remplacée par W_e (la largeur effective définie en Section 2.3.2) pour désigner la répartition des points d'arrivée de mouvement. Dans ce cas W_e sert à noter une variable aléatoire du mouvement, alors que W dénote clairement une propriété de la tâche.

En fait, la question de la précision peut être abordée dans le paradigme de Fitts sous deux angles différents, également légitimes. Dans une première approche, la loi de Fitts porte sur la dépendance de μ_T au rapport sans dimension $\frac{W}{D}$ (ou son inverse $\frac{D}{W}$), comme suggéré dans les formulations standard. Dans cette approche, μ_T est prédite à partir de géométrie de la tâche, et le problème de la précision doit être exprimé en fonction de $\frac{D}{W}$ ou $\frac{W}{D}$. Dans l'autre approche, la loi de Fitts se définit comme la dépendance mutuelle de deux variables aléatoires : le temps de mouvement moyen et l'erreur variable relative RVE représentée par le rapport $\frac{\sigma_A}{\mu_A}$, un coefficient de variation, avec σ_A et μ_A désignant respectivement l'écart-type et la moyenne de l'amplitude du mouvement [Guiard and Olafsdottir, 2011]. En d'autres termes la loi de Fitts peut être écrite sous la forme $\mu_T = f(\frac{W}{D})$, comme l'expression de la dépendance causale d'une variable aléatoire de temps sur une variable déterministe géométrique, l'alternative étant de l'écrire sous la forme $\mu_T = f(\frac{\sigma_A}{\mu_A})$, exprimant cette fois la dépendance mutuelle de deux variables aléatoires. Ces deux possibilités sont ce que nous appelons la version géométrique et la version stochastique de la loi de Fitts.

Les chercheurs en IHM, qui ont souvent besoin d'évaluer ou de prédire les performances pour diverses configurations d'interface, ont naturellement adopté la première alternative, en supposant que la performance de mouvement est causalement dépendante des propriétés de la cible. C'est l'autre approche, cependant, qui ouvre la voie à une analyse en termes de compromis vitesse/précision. On écrira la loi sous la forme d'une dépendance mutuelle, entre le temps de mouvement et l'erreur variable relative. Dans ce cas, peu importe si la loi est écrite $\mu_T = f(\frac{\mu_A}{\sigma_A})$ ou réciproquement, $\frac{\sigma_A}{\mu_A} = g(\mu_T)$.

© 2013 TELECOM ParisTech

3.3 La loi de Fitts comme une théorie d'affectation des ressources

Ci-dessous sont énumérés une série d'hypothèses de base nécessaires pour exprimer la loi de Fitts comme une théorie d'affectation des ressources. Notez que le compromis considéré n'est pas entre la vitesse et la précision, mais, à proprement parler, entre le temps de mouvement moyen ou médian μ_T et l'erreur relative (RVE).

1. Utilité. Le temps de mouvement et l'erreur relative relative sont deux utilités négatives, c'est-à-dire des quantités qui doivent être minimisées : plus μ_T est faible, plus la performance est bonne ; idem pour RVE.

2. Compromis. Les efforts de minimisation des deux quantités entrent en conflit l'une avec l'autre : si l'on diminue une utilité négative, l'autre augmente. Il s'agit d'un compromis de type "min-min".

3. Quantité de ressources limitées. Les compromis résulte du fait que les deux efforts concurrents de minimisation tirent partie de la même réserve de ressources disponible, et cette réserve est limitée. Cette hypothèse est la contrepartie, dans le paradigme de Fitts "classique" [Fitts, 1954], de l'hypothèse de la capacité limitée du canal d'interaction. On peut désigner le contenu de la réserve hypothétique, dont la nature est inconnue, comme "l'effort". Il suffit juste de supposer, en utilisant une analogie économique, qu'une devise générique est convertible en vitesse et/ou en précision, et que le montant disponible de cette monnaie est fini, ce qui est une caractéristique de chaque individu placé dans une situation donnée. Concevoir une méthode pour estimer ce montant est notre premier défi important.

4. Exploitation des ressources inférieure au total disponible. Dans les expériences portant sur la loi de Fitts, les participants sont chargés de faire constamment de leur mieux, c'est-à-dire d'investir 100% de leurs ressources. L'effort humain, cependant, est soumis à des fluctuations aléatoires, ce qui implique que le montant des ressources effectivement disponibles pour un individu à un instant donné peut être moindre, mais jamais plus élevé que ces 100%. La réserve de ressources limitées, en d'autres termes, doit être considéré comme une borne supérieure. Nous croyons que cette hypothèse réaliste, qui a échappé à l'attention des chercheurs jusqu'à récemment [Soukoreff and MacKenzie, 2009] est obligatoire dans toute approche de la loi de Fitts, y compris l'approche basée sur la théorie de l'information.

5. Stratégie d'affectation de ressources. Face à la rareté des ressources dans une tâche de Fitts, les participants peuvent délibérément moduler l'équilibre entre leurs efforts concurrents de minimisation du temps et de l'erreur. Quantifier ce déséquilibre, estimer sa gamme de variation, et comprendre sa dépendance à l'égard des conditions expérimentales systématiquement manipulées —géométrie de la tâche dans l'expérience de Fitts [Fitts, 1954](Section 4), ou différentes instructions verbales dans la nôtre (Section 5)— constituent le second défi de cette analyse.

© 2013 TELECOM ParisTech

3.4 Mise en évidence du compromis temps/erreur dans les données de Fitts (1954)

Cette section a pour but de montrer que les données de Fitts peuvent en effet être reformulées explicitement comme un compromis entre deux utilités concurrentes. En se concentrant sur le compromis "min-min" compromis entre le temps de mouvement μ_T et l'erreur relative $RVE = \frac{\sigma_A}{\mu_A}$, nous allons présenter une méthode géométrique simple pour caractériser quantitativement la taille de la réserve de ressources ainsi que le déséquilibre stratégique.

À première vue, la pertinence du protocole expérimental de Fitts dans le cadre d'une analyse de compromis peut sembler discutable. En effet, Fitts n'a pas demandé à ses participants de minimiser le temps de mouvement et l'erreur relative en même temps, il leur a demandé de minimiser une seule variable, à savoir μ_T, en utilisant un certain nombre de contraintes sur la tolérance relative de la cible, qui tenait lieu de facteur de précision systématique. Il convient de garder à l'esprit qu'avec un tel protocole, qui est encore aujourd'hui le plus populaire, l'erreur reste de fait une utilité négative (une quantité à minimiser), tout comme le temps de mouvement. C'est dans le but d'obtenir des participants des niveaux différents de RVE que les expérimentateurs vont varier la tolérance relative (RTT). La manipulation de la RTT (comme dans [Fitts, 1954]), et des instructions (comme dans [Fitts and Radford, 1966]) peuvent être considérées comme deux méthodes avec le même objectif. Dans le premier cas, les participants doivent minimiser μ_T avec plusieurs contraintes de RVE, tandis que dans le second, ils doivent conjointement minimiser μ_T et RVE sous une variété de compromis vitesse / précision. Mais les deux méthodes se résument à des instructions, formulées respectivement de manière visuelle ou avec des mots, servant à manipuler la capacité des participants à faire varier le dilemme vitesse / précision.

Nous allons examiner les données de Fitts [Fitts, 1954] obtenues dans sa célèbre expérience de pointage réciproque, présentées dans sa Table 1 (p. 264, stylet léger). Le tableau indique les temps de déplacement en moyenne sur 16 participants, pour chacune des 16 combinaisons de D et W. Cependant, Fitts n'a pas réellement enregistré la position des points d'arrivée de mouvement, mais juste la proportion d'essais où la cible a été manquée. En nous appuyant sur le rapport de Fitts (p. 265), qui confirme que les erreurs dûes à une sur-estimation de la longueur du mouvement (overshoot) ou au contraire des sous-estimations de cette longueur (undershoot) sont à peu près aussi fréquentes l'une que l'autre (dans l'expérience avec le stylet léger), en supposant que $\mu_A = D$. Nous en déduisons les écarts des points d'arrivée de mouvements des pourcentages d'erreur, en utilisant la technique décrite par MacKenzie [MacKenzie, 1991] (Section 2.5). Pour chaque combinaison de D et W, nous pouvons calculer la largeur effective (avec une contrainte sur la valeur d'erreur fixée à 4%, et avec l'hypothèse d'une distribution gaussienne des points d'arrivée de mouvement) et déduisons $\sigma_A = \frac{W_e}{4.133}$.

© 2013 TELECOM ParisTech

Notez que nos analyses ci-dessous séparent les différents niveaux d'échelle, caractérisés par D ou μ_A, d'après la recommandation de Guiard [Guiard, 2009]. Nous supposons que la forme et la taille de la cible affichée sont exprimées par $RTT = \frac{W}{D}$ et D respectivement, et que la forme et la taille du mouvement visé sont exprimées par RVE et μ_A, respectivement.

3.4.1 Une relation en loi puissance entre temps de mouvement et erreur relative relative (RVE)

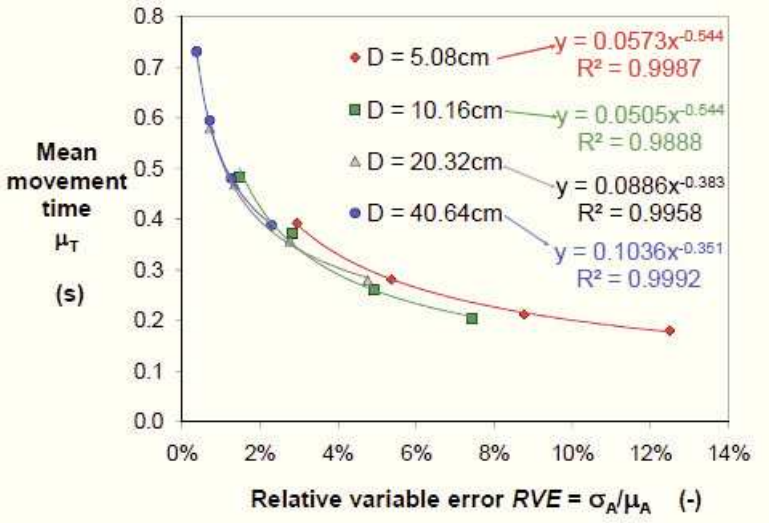


FIGURE 3.1 – Compromis entre μ_T et RVE dans les données de Fitts

Comme le montre la Figure 3.1, les données de Fitts sont bien approximées par une fonction puissance, et ce, pour chaque niveau d'échelle ($0,989 < r^2 < 0,999$) :

$$\mu_T = q \times RVE^p \tag{3.1}$$

où p et q représentent des coefficients réglables ($p < 0, q > 0$). Notez que l'ajustement logarithmique ($r^2 = 0,993$ en moyenne sur les quatre échelles) était presque aussi bon que l'ajustement puissance ($r^2 = 0,996$).

3.4.2 Quantité de ressources

L'Équation 3.1 peut être réécrite sous la forme

$$\mu_T \times RVE^{-p} = q \tag{3.2}$$

© 2013 TELECOM ParisTech

ou, puisque nous définissons RVE par le rapport $\frac{\sigma_A}{\mu_A}$,

$$\mu_T \times (\frac{\sigma_A}{\mu_A})^{-p} = q \tag{3.3}$$

L'Équation 3.3 est l'expression d'un produit constant : au sein de chaque niveau d'échelle, le produit de μ_T et de RVE à la puissance $-p$ est conservé dans l'expérience de Fitts en dépit du changement systématique de la taille de la cible et par conséquent de μ_T. La conservation de la quantité q est illustré dans la Figure 3.2. Pour chacune des quatre conditions d'échelle, la pente de la droite de régression linéaire est pratiquement nulle —alors que le temps de mouvement varie d'un intervalle de 2 :1, q demeure remarquablement stable—.

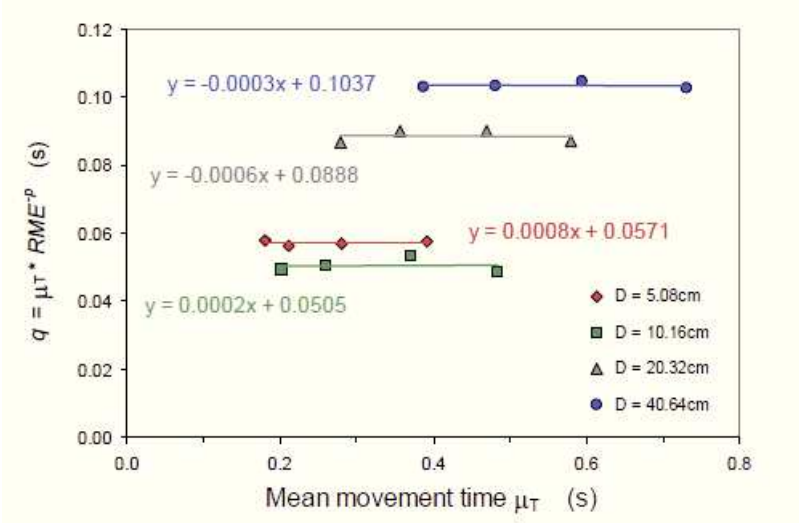


FIGURE 3.2 – Conservation du produit q de l'Équation 3.3 à travers la variation de μ_T, pour les différentes conditions d'échelle

À la lumière de la théorie du compromis décrit à la Section 3.3, il est clair que la constante q spécifie la quantité moyenne de ressources disponibles pour les participants de Fitts. Notez que la constante q est indicative, non d'une quantité de ressources, mais d'une rareté des ressources : plus le produit des deux utilités négatives est élevé, meilleures sont les performances.

Les différentes élévations des quatre courbes planes de la Figure 3.2 montrent que la quantité de ressources disponibles pour les participants de Fitts dépendait de l'échelle. La constante q atteint un minimum pour $D = 10,16cm$, sans doute une échelle optimale dans les conditions particulières de l'expérience de Fitts.

La Figure 3.3 trace l'Équation 3.3 pour $D = 40,64cm$, dont le meilleur ajustement est $\mu_T = \frac{0,1036}{RVE^{0,3509}}$ ($r^2 = 0,9992$, cf Figure 3.1). Si l'on considère le rectangle obtenu en traçant les droites de projection sur les axes horizontaux et verticaux par rapport aux axes de tout point de la courbe, qu'ils aient été choisis au sein de l'intervalle de valeurs x comme les points A, B, C, et D, ou

© 2013 TELECOM ParisTech

extrapolé sur la courbe comme le point E, celui-ci présente une surface constante (si $y = \frac{q}{x}$, alors $x \times y = q$). Cette zone n'est autre que le coefficient q de l'Équation 3.3, dont l'estimation dans cette condition échelle particulière est 0,1036s.

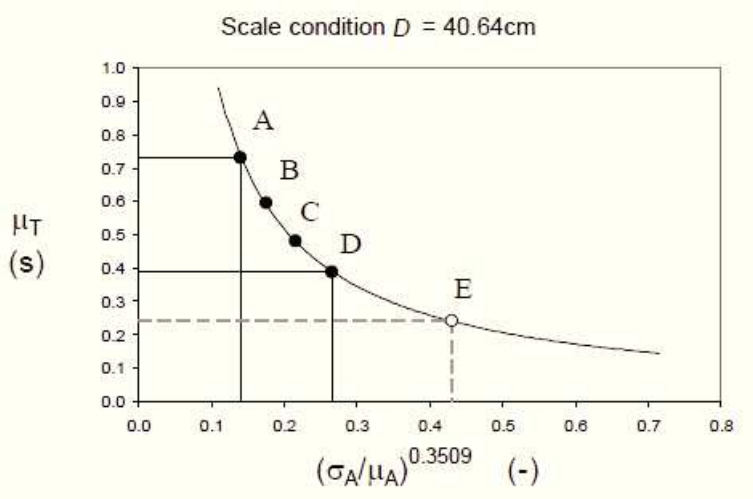


FIGURE 3.3 – Un tracé de l'Équation 3.3 pour la condition d'échelle $D = 40,64cm$ échelle, où l'exposant p vaut $-0,3509$. ABCD sont quatre points correspondants à des données réelles, E est une extrapolation arbitraire le long de la courbe. Tous les rectangles ont la même surface.

3.4.3 Affectation des ressources : le déséquilibre stratégique

Si différents points le long de la courbe de la Figure 3.3 correspondent à une seule et même quantité de ressources, ils précisent différents degrés de déséquilibre entre les efforts de minimisation du temps et de l'erreur. Alors que le produit $x \times y$ (la surface rectangulaire sur la Figure 3.3) est conservé tout au long de la courbe, reflétant les ressources disponibles, le rapport $\frac{y}{x}$ (le rapport d'aspect du rectangle) change progressivement, reflétant différentes options d'affectation des ressources. Pour chaque point de données de la courbe, le déséquilibre stratégique effectif ("strategic imabalance", aussi abbrégé *SI*) des participants peut être quantitativement caractérisé par ce rapport d'aspect, c'est-à-dire

$$SI = \frac{\mu_T}{RVE^{-p}} \tag{3.4}$$

ou, si l'on rappelle que $RVE = \frac{\sigma_A}{\mu_A}$,

$$SI = \frac{\mu_T}{(\frac{\sigma_A}{\mu_A})^{-p}} \tag{3.5}$$

Avec cette définition du rapport d'aspect, que nous avons choisi de calculer comme $\frac{y}{x}$, le déséquilibre stratégique *SI* diminue dans la Figure 3.3 de gauche à droite : moins le mouvement est prudent (et donc plus rapide), plus cet indice augmente. Ainsi *SI* est corrélé positivement avec la force relative de la composante de minimisation d'erreur du participant.

La Figure 3.4 montre la dépendance entre la stratégie d'affectation des ressources (*SI*) des participants de Fitts et RTT, la caractéristique utilisée par Fitts pour forcer le changement de stratégie.

© 2013 TELECOM ParisTech

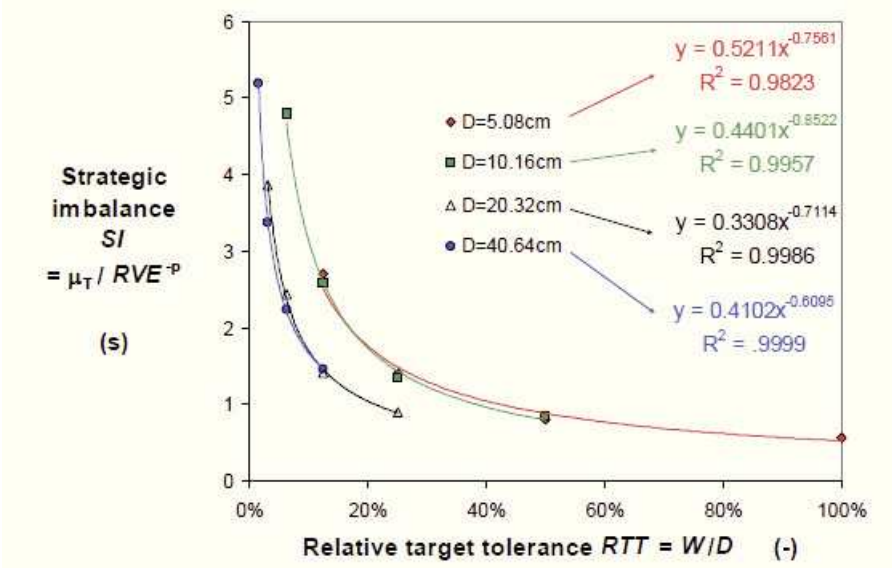


FIGURE 3.4 – *SI* en fonction de RTT dans les données de Fitts

La dépendance est fortement non-linéaire, ce qui suggère que la technique de manipulation de la disposition des cibles de Fitts, introduite dans son étude de 1954 ne lui a donné qu'un contrôle médiocre sur la stratégie de ses participants. Une supposition qu'il est facile de confirmer avec la Figure 3.5 : même si Fitts a fait varié RTT jusqu'au point extrême où ses deux cibles se touchaient (c'est-à-dire $W = D$ donc $RTT = 100\%$), et pourtant on voit que RVE ne dépassait guère 10%.

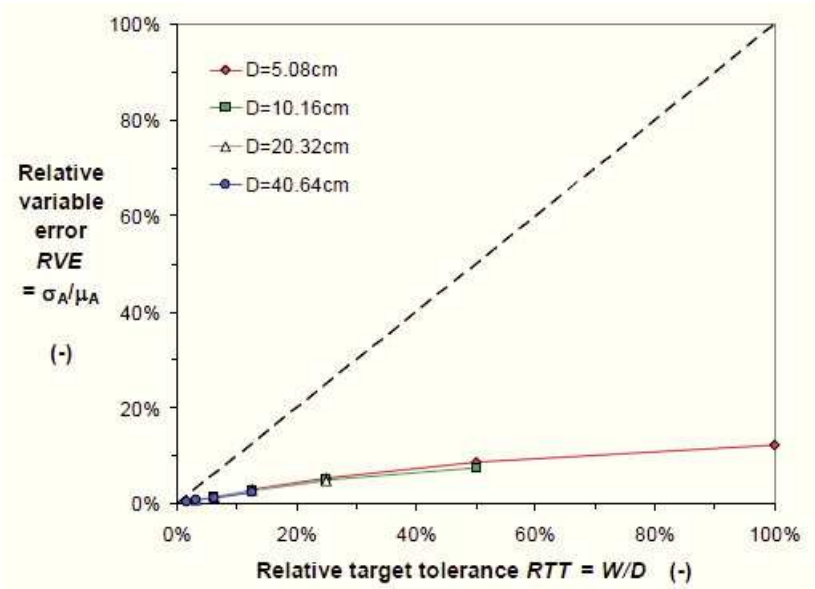


FIGURE 3.5 – RVE en fonction de RTT. La ligne en pointillés représente l'égalité théorique $RVE = RTT$

En observant à nouveau la Figure 3.4, on remarque que les participants de Fitts, confrontés à quatre niveau d'échelle, ont adopté deux positions différentes en termes de stratégie. La première

© 2013 TELECOM ParisTech

position est valable pour $D = 20cm$ et $D = 40cm$, et la seconde plus prudente, à plus petite échelle pour les conditions $D = 5cm$ et $D = 10cm$. La fiabilité statistique de ce résultat ne peut pas être testée du fait de l'absence de données individuelles, mais le modèle semble cohérent. Une hypothèse serait que parce que des vitesses élevées ne peuvent être atteintes sur de plus petites amplitudes, une réduction d'échelle pourrait avoir encouragé les participants à adopter une stratégie relativement plus prudente.

Alors que la tendance est tout à fait remarquable dans le tracé de la Figure 3.4, elle est pratiquement indétectable dans le tracé plus classique μ_T vs ID (indice de difficulté). Notez également qu'il n'était pas non plus possible de voir que la quantité de ressources est maximale pour les mouvements de 10cm (Figure 3.2). Le rapport d'aspect (ou quotient de $\frac{\mu_T}{(RVE)^{-p}}$ et la surface (ou produit $q = \mu_T \times RVE^{-p}$) des rectangles de la Figure 3.3 sont deux quantités mathématiquement indépendantes.

3.4.4 Discussion

Ce qui précède confirme que les données classiques de Fitts (1954) peuvent aussi être interprétées comme un compromis entre deux utilités négatives, de temps et d'erreur. Ainsi, non seulement nous pouvons voir la loi de Fitts comme la démonstration que l'indice de performance (cf Section 2.4) —qui est l'inverse de la pente, exprimé en bits/s— est conservé alors que l'indice de difficulté (ID) de la tâche varie, on peut tout aussi bien considérer la loi comme preuve qu'une certaine quantité de ressources est conservée à travers la variation du déséquilibre stratégique (SI). Tant l'approche basée sur la théorie de l'information et celle basée sur la notion de compromis peuvent nous aider l'une et l'autre à comprendre la loi de Fitts.

3.5 Données expérimentales sur le compromis temps/erreur

Cette section présente une expérience simple qui introduit une variation des instructions données aux participants afin d'induire une variation systématique du déséquilibre stratégique des efforts simultanés de minimisation du temps et de l'erreur. L'amplitude du mouvement demandé reste fixe à $150mm$.

Parmi nos motivations pour le lancement d'une nouvelle expérience, il y a eu le fait que les données individuelles de Fitts [Fitts, 1954] ne sont pas disponibles. Du point de vue de la théorie de l'affectation des ressources, on s'attend à ce que certaines quantités —notamment le coefficient q de l'Équation 3.1— se comportent comme des constantes intra-participant, tout en variant de participant à participant. On s'intéresse aussi à la variabilité du déséquilibre stratégique (SI) entre et au sein des individus. Que l'expérimentateur manipule la disposition des cibles, comme cela a été coutumier depuis Fitts, ou des instructions sur la vitesse et la précision, il fait face à des êtres humains avec styles de stratégie tous différents. Aucun participant n'interprétera les instructions de

© 2013 TELECOM ParisTech

la même façon que les autres. De la même façon, les participants ne montrent pas le même degré de flexibilité en réponse aux changement d'instructions.

Notre discussion sur les données de Fitts ci-dessus ne fait pas référence à la notion d'exploitation des ressources inférieure au total disponible (hypothèse $n°4$ de notre théorie de l'affectation des ressources, dont l'illustration et la validation nécessitent des données individuelles. Ci-dessous nous allons voir que cette hypothèse est très utile pour évaluer les compromis individuels.

Il y a deux différences notables entre notre protocole et celui et Fitts. Tout d'abord, notre tâche de pointage était discrète, plutôt que réciproque, nos participants devant donc revenir à une position de départ fixe après chaque mouvement. Cette option rend possible de clarifier le statut des mesures temporelles et spatiales. Alors que dans le protocole réciproque μ_T est le temps qu'il faut non seulement pour effectuer un mouvement, mais également pour évaluer l'erreur héritée du mouvement précédent et pour préparer le prochain mouvement [Fitts and Peterson, 1964], dans le protocole discret μ_T mesure uniquement la durée du processus d'exécution d'un mouvement. En outre, la signification de la variabilité des points d'arrivée de mouvement σ_A est interprétable de manière plus sûre dans le cas discret, puisque la variabilité est seulement générée par l'exécution du mouvement, tandis que, dans le cas inverse σ_A doit également tenir compte, dans une mesure inconnue, de la variabilité du point de départ [Fitts and Peterson, 1964]. Enfin, la plupart des actions de pointage dans le monde monde réel sont discrètes.

L'autre différence notable est que nous n'avons pas visuellement spécifié de tolérance W. Nous avons juste précisé D avec deux lignes indiquant le point de départ et le point final souhaité du mouvement, la cible étant ainsi affiché sur une seule ligne. Nous avons manipulé l'équilibre entre les deux efforts de minimisation au moyen d'un ensemble d'instructions qui demandaient aux participants de couvrir l'ensemble de leur spectre des déséquilibres stratégiques, d'une vitesse maximale (en minimisant μ_T) à un maximum de précision (en minimisant RVE).

3.5.1 Méthode

Participants

Seize bénévoles dont quatre femmes ont participé à notre expérience (tous droitiers, d'âge médian 27,5 ans, interquart : 2,5 ans, intervalle interquartile).

Consignes vitesse/précision

Nous avons utilisé cinq consignes : 1) vitesse maximale, 2) emphase sur la vitesse, 3) équilibre vitesse/précision, 4) accent sur la précision, et 5) précision maximale. Dans la condition de vitesse max, les participants devaient simplement minimiser le temps de mouvement, la seule exigence

© 2013 TELECOM ParisTech

en termes de précision étant de s'abstenir de commettre une erreur systématique : peu importe la dispersion des points d'arrivée de mouvement, les participants devaient **en moyenne** parvenir à terminer leurs mouvements à peu près sur la cible.

À l'extrême opposé, l'instruction précision max demandait aux participants d'essayer d'amener le curseur exactement à la cible (erreur de zéro pixel), en faisant autant de sous-mouvements de correction et en prenant tout le temps nécessaire, mais pas plus. Ces deux extrêmes étant définis, nous avons simplement inséré trois niveaux intermédiaires d'instructions, un non-biaisé (équilibre vitesse/précision) et deux biaisés (emphase sur la vitesse ou la précision).

Matériel

L'expérience s'est déroulée sur un moniteur de $1280 \times 1024 pixels$ ($34.0 \times 27.1 cm$) et une tablette graphique Wacom Intuos3 connectée à un PC sous la distribution Linux Ubuntu. Deux lignes verticales, s'étendant de haut en bas, étaient affichées à l'écran, séparées de $150mm$, l'une marquant le point de départ (à gauche), et l'autre la cible (à droite) du mouvement. Les deux lignes, de largeur minimale d'1 pixel, étaient de couleur rouge sur un fond blanc. Un curseur d'un pixel d'épaisseur en forme de croix de couleur noire, était présent à l'écran. Son mouvement était contrôlé par le stylet. La tablette est utilisée en mode absolu avec un gain de 1, la main devait donc parcourir 150mm à partir de sa position d'origine pour atteindre l'objectif.

Le participant était assis à une table, à une distance d'observation d'environ 50 cm. Pendant les essais d'échauffement, les participants ont été autorisés à optimiser l'orientation de la tablette dans le plan horizontal pour faciliter l'exécution des mouvements, la majorité des participants ayant tendance à incliner la tablette dans le sens antihoraire. Sur la tablette a été fixé une règle horizontale de 8 mm d'épaisseur en plastique, le long de laquelle la pointe du stylet peut librement coulisser, ce qui permet un mouvement strictement à une dimension. La règle proposait une butée mécanique à son extrémité gauche de sorte que la position de départ du stylet soit facile à atteindre. Quand le stylet était bien placé, un message "OK" apparaissait sur l'écran.

Nous avons développé notre propre librairie, en utilisant Lib USB, pour l'acquistion des données de la tablette, afin de minimiser la latence d'affichage par rapport aux événements envoyés et aussi d'exploiter la pleine résolution de notre dispositif d'entrée (5080dpi). Les coordonnées de la tablette étaient ensuite traduites en pixels (en valeurs flottantes comme recommandé dans [Roussel *et al.*, 2012]) pour maximiser la précision du retour visuel. Le taux d'échantillonnage de la tablette était d'environ 100 Hertz (dans une gamme 85-125 Hz).

Algorithmes de mesure du mouvement et procédure

L'expérience a consisté en 25 blocs de 15-20 mouvements, chaque bloc étant exécuté avec une consigne donnée. Les cinq instructions étaient présentées dans l'ordre croissant ou décroissant,

© 2013 TELECOM ParisTech

l'ordre étant inversé d'un groupe de cinq blocs à l'autre. L'expérience durait environ 40mn par participant, comprenant 10min d'entraînement.

Au début de chaque essai, le participant immobilisait le curseur à l'écran sur la ligne de départ en positionnant le stylet contre la buttée de la règle pendant quelques secondes. Lorsqu'il était prêt, le participant déplaçait le stylet vers la cible en le faisant glisser contre la règle, puis stabilisait sa position d'arrêt quelques instants, afin de lever le stylet et, après un repos de quelques secondes, de procéder à l'essai suivant.

Le point de départ du mouvement correspondait à l'endroit et instant où la croix quittait sa position initiale tout ayant une accélération strictement positive (vers la droite). La détermination du point de fin de mouvement dans le temps et l'espace est un problème subtil et des explications détaillées sur l'algorithme de traitement a posteriori (offline) faisaient partie des instructions reçues par le participant. Nous avons utilisé deux critères différents, en fonction des conditions d'instruction. Pour l'instruction vitesse max, où la précision n'était pas pertinente, notre algorithme prenait comme point de fin de mouvement le moment où la vitesse s'annulait ou changeait de signe, ignorant ainsi tout sous-mouvement, qu'il soit délibéré (correction) ou accidentel (par exemple, un rebond mécanique à cause de l'élasticité du bras). Pour les quatre autres conditions le point de fin de mouvement était défini comme le début de la dernière période de pause, ce qui signifie que l'algorithme prenait en compte tous les sous-mouvements correctifs éventuels. Le critère d'un arrêt est défini par une pause d'au moins 100 ms, à au moins 50mm de distance du point de départ.

3.5.2 Résultats et discussion

L'inspection des distributions des temps de mouvement a révélé une certaine asymétrie, en particulier pour l'instruction de vitesse max, d'où notre recours à la médiane, au lieu de la moyenne, pour exprimer la tendance centrale du temps de mouvement (toujours notée μ_T).

Erreur systématique, erreur variable

En moyenne, sur l'ensemble des participants, l'erreur constante ($\mu_A - 150mm$) était inférieure à 1 pixel de l'écran pour toutes les instructions, sauf une : pour l'instruction de vitesse maximale, nous avons trouvé un dépassement significatif de 5.5mm ($t_{15} = 4,50, p < 0,0005$), un petit effet (3,7%), que nous laisserons de côté ci-dessous.

Plutôt que l'erreur constante $\mu_A - D$, c'est évidemment l'erreur variable ($RVE = \frac{\sigma_A}{\mu_A}$) qui a été influencée, avec μ_T, par les instructions.

En augmentant l'accent sur la précision, μ_T augmente de manière linéaire, alors que RVE diminue non linéairement (Figure 3.6). Même si l'instruction de vitesse max n'imposait aucune

© 2013 TELECOM ParisTech

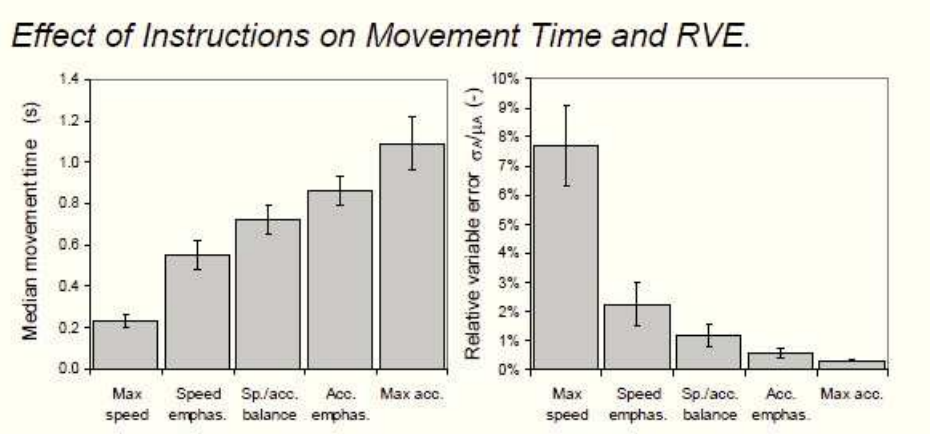


FIGURE 3.6 – Effet de la manipulation des instructions sur le temps médian μ_T et l'erreur variable (RVE), avec les intervalles de confiance à 95% basés sur les écart-types intra-participants

contrainte au niveau de la précision, RVE atteint difficilement 0,08 (ou 8%), ce qui est consistant avec les résultats de Fitts (voir Figure 3.5).

Front convexe de performance

La Figure 3.7 illustre le compromis entre μ_T et RVE pour un participant représentatif. La partie A de la figure montre toutes les données du participants (un point par bloc). Le meilleur ajustement est une fonction puissance avec un coefficient de corrélation r^2 de 0,87. Mais voyons plutôt comment notre hypothèse $n^\circ 4$ sur l'affectation des ressources nous permet d'exploiter nos données de manière plus approfondie.

© 2013 TELECOM ParisTech

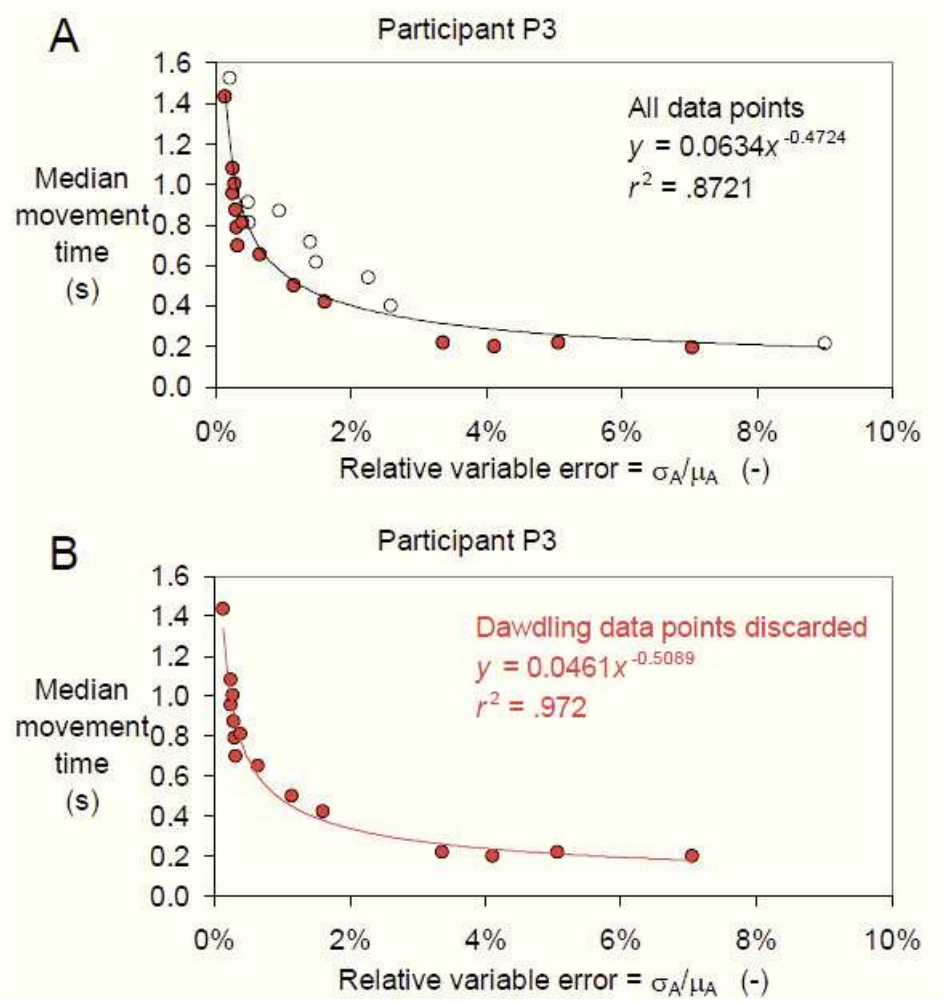


FIGURE 3.7 – Front convexe de performance. A) une courbe de type puissance courbe est tracée sur tous les points de données du participant ; les points sous la courbe (cercles pleins) sont ensuite sélectionnés. B) une nouvelle courbe d'ajustement est tracée sur le sous-ensemble sélectionné

Les participants devaient minimiser μ_T et RVE dans des proportions différentes. Les points de données peuvent être comparés avec des particules attirées par deux champs "magnétiques" situés à l'Ouest (μ_T et au Sud (RVE) dont la force est modulée par les instructions. Si la réserve de ressources est limitée (Hypothèse $n^{\circ}3$), alors les points situés sous la courbe (les plus attirés par les deux champs) semblent être contraints par une limite infranchissable. Cette limite sépare ce qui est possible (au dessus de la courbe) pour le participant de ce qui ne l'est pas (en dessous). Les points au dessus de la courbe qui sont trop éloignés de la courbe sont vus comme des points de moindre performance où le participant n'a pas utilisé toutes les ressources à sa disposition (Hypothèse n°4). Comme le montre la Figure 3.7-B, en limitant l'ajustement aux points les mieux placés permet d'améliorer grandement la qualité du coefficient de corrélation r^2(pour ce participant, de 0,87 à 0,97).

© 2013 TELECOM ParisTech

Un meilleur ajustement avec une fonction puissance, après l'éliminations de points de moindre performance, a été observée chez les 16 participants ($t_{15} = 8,83, p < 0,0001$), le r^2 augmentant en moyenne de 0,852 à à 0,972. Nous avons vérifié que, au contraire, limiter l'ajustement à ces points de moindre performance (au dessus donc de la première courbe) n'a pas amélioré l'ajustement de quelque manière que ce soit, avec un changement de r^2 en moyenne sur l'ensemble participants de 0,852 à 0,853 ($t_{15} = 0,03, p = 0,97$).

Les points de données qui forment le cadran Sud-Ouest de l'enveloppe convexe du nuage de points (illustré en tant que disques pleins dans la Figure 3.7-A) sont d'une importance particulière : ils caractérisent les meilleures performances d'un participant. Ces points doivent avoir, plus que les autres, leur emplacement affecté par la limitation des ressources. Dans le reste de ce chapitre, nous nous concentrerons sur ce point particulier, que nous appelons le **front convexe de performance**, supposé être le plus instructif sur l'emplacement de la courbe de compromis que nous recherchons.

Ajustements logarithmique, exponentiel, et puissance

Nous avons testé plusieurs modèles à deux coefficients qui peuvent s'adapter à la courbure convexe de nos tracés μ_T vs RVE : logarithmique, exponentiel, et puissance. Le test des trois modèles sur l'ensemble des données individuelles (25 blocs par participant, 16 participants) s'est traduite par une meilleure performance du modèle puissance dans 10 cas (Moyenne $r^2 = 0,853$ sur tous les participants), suivi du modèle exponentiel meilleur dans quatre cas (moyenne $r^2 = 0,803$) et finalement le modèle logarithmique dans deux cas (moyenne $r^2 = 0,803$). En général, la courbure était insuffisante avec les modèles logarithmique et exponentiel. En ajustant ces trois modèles avec le front convexe de performance, le modèle puissance devient meilleur pour tous les participants (le participant 11, P11). Le r^2 varie alors entre 0,923 et 0,992 (en moyenne $r^2 = 0,972$, comparé à $r^2 = 0,937$ et $r^2 = 0,880$ pour le log et l'exponentiel). Par conséquent, nous a conservé une fonction de type puissance pour la modélisation du compromis, comme dans l'Équation 3.1.

Examen des exposants : vers un modèle à un unique coefficient

Ainsi, une relation puissance s'est avérée tout à fait à même de décrire avec précision le compromis temps/erreur à la fois dans les données de l'expérience de Fitts et avec celles de notre expérience, en dépit des différences dans le protocole expérimental. Mieux, l'exposant p des fonctions puissances obtenues était similaire, si l'on considère les deux conditions d'échelle de Fitts qui se rapprochaient des nôtres. En effet, dans les données de Fitts, l'exposant était de -0,54 pour $D = 10cm$ et -0,38 pour $D = 20cm$ (cf Figure 3.1, et dans nos données, avec $D = 15cm$, l'exposant était en moyenne de -0,47. Nous nous sommes également penché sur cette question en nous demandant comme l'exposant varie avec la qualité de l'ajustement et de la valeur prise par q, l'autre coefficient réglable de l'Équation 3.1 (voir Figure 3.8).

© 2013 TELECOM ParisTech

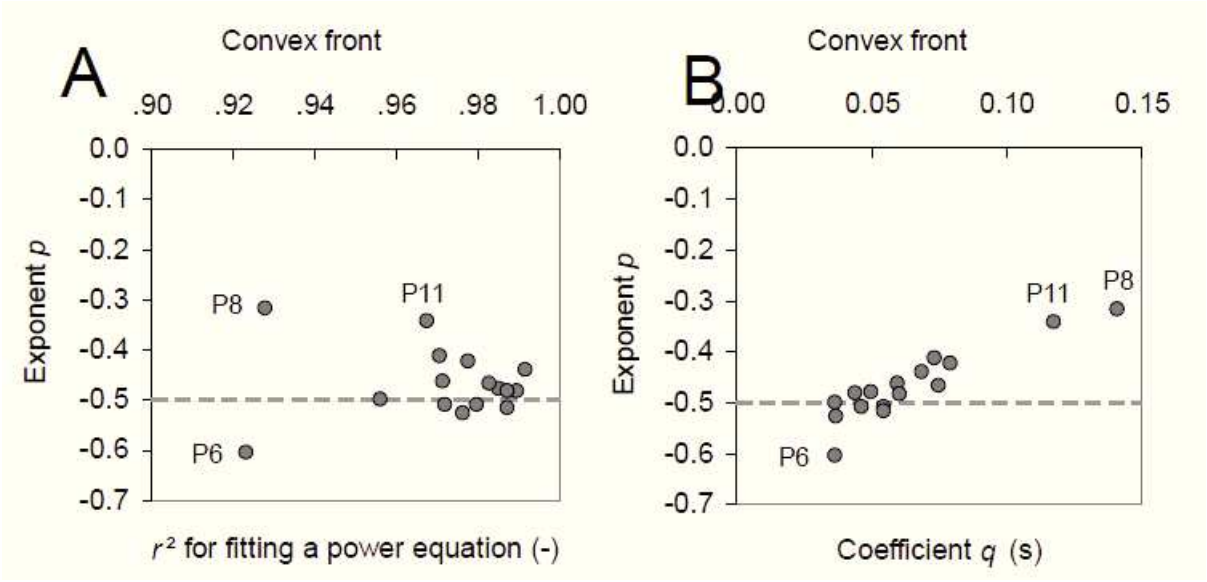


FIGURE 3.8 – Exposant p de l'Équation 3.1 en fonction : A) du r^2 de l'ajustement du modèle puissance, et B) de la valeur du coefficient q, indicatif de la quantité de ressources. Un point par participant.

Il convient de rappeler que chaque participant produit un mélange de bonnes et moindres performances (Hypothèse $n^{\circ}4$), mais il y a une infinité de façons de fournir une performance médiocre et, en principe, seules les meilleures performances (front convexe) de ce participant sont informatives. Cet argument fonctionne de manière similaire si l'on passe d'une logique intra-individus à une logique inter-individus, différents participants n'ayant pas réussi (ou voulu) se focaliser assez sur une tâche de pointage répétitive, il y a tout lieu de se concentrer sur les données des meilleurs participants dans cette recherche d'une loi quantitative cohérente En gardant cela à l'esprit, deux résultats se dégagent des données :

1. La valeur de l'exposant p tend vers $-\frac{1}{2}$ quand le r^2 de l'ajustement augmente (cf Figure 3.8-A) ;
2. La valeur de l'exposant p tend également vers $-\frac{1}{2}$ quand la valeur de q diminue, signalant une meilleure performance globale (cf Figure 3.8-B).

Trois estimations individuelles de l'exposant divergent sensiblement de $-\frac{1}{2}$, à savoir celles des participants P6, P8, et P11 ($p = -0,60$, $-0,34$, et $-0,32$, respectivement), mais ces participants se sont avérés être les estimations les moins crédibles : P6 et P8 ont été des participants pour lesquels l'ajustement avec une fonction puissance était typiquement inférieure à la moyenne (voir Figure 3.8-A) ; et pour P11, on peut voir sur la Figure 3.8-B qu'il est classé au 15ème rang sur 16 pour la performance, à côté de P8, dernier au classement.

Ainsi, en se concentrant sur les meilleures performances (c'est-à-dire le front convexe de performances) de nos meilleurs participants (en fait 13 de nos 16 participants), nous avons constaté

© 2013 TELECOM ParisTech

que le compromis entre μ_T et RVE peut être modélisé de manière satisfaisante dans nos données par une équation racine carrée à une seule constante ajustable q :

$$\mu_T = q \times (RVE)^{-\frac{1}{2}} \text{ ou}$$

$$\mu_T = \frac{q}{\sqrt{\frac{\sigma_A}{\mu_A}}} \tag{3.6}$$

où la constante multiplicative q indique la quantité de ressources investies par le participant.

Quantité de ressources constante et variabilité du déséquilibre stratégique (*SI*)

Une conséquence immédiate de l'Équation 3.6 est que la quantité $q = \mu_T \times \sqrt{\frac{\sigma_A}{\mu_A}}$ est conservée quand les participants modulent leur stratégie vitesse/précision (Section 3.4.2). Mais ce déséquilibre stratégique peut être quantifié, tout simplement, comme le rapport $SI = \frac{\mu_T}{\sqrt{\frac{\sigma_A}{\mu_A}}}$ (voir Section 3.4.3).

La Figure 3.9, qui utilise les données du même participant que sur la Figure 3.7, montre le résultat de l'ajustement obtenu avec le modèle à un coefficient de l'Équation 3.6 et de la conservation intra-participant de q à travers la variation de μ_T. En moyenne, sur nos 13 meilleurs participants, le modèle proposé dans l'Équation 3.6 donne un $r^2 = 0,964$ (compris entre 0,889 et 0,986). Cette valeur était significativement inférieure au $r^2 = 0,967$ obtenue avec l'Équation 3.1 ($t_{12} = 3,61, p = 0,002$), mais la différence entre ces r^2 (0,003) est excessivement faible, surtout si l'on considère que ce nouveau modèle permet de s'affranchir d'un coefficient.

La partie B de la Figure 3.9 montre qu'il n'y aucune corrélation visible entre q et μ_T. En effet, compte tenu de nos 13 jeux de données fiables, la pente de cette relation (-0.0034s en moyenne) n'est pas significativement différente de zéro ($t_{12} = -1,42, p = 0,182$).

Sur la Figure 3.10 sont représentées deux courbes obtenues chez deux participants différents, dont les coefficients q ont des valeurs distinctes. Il est facile de voir que P12 a investi plus de ressources dans la tâche que P13 ($q_{P12} = 0,0425$ et $q_{P13} = 0,0621$, respectivement). Mais le graphique, en présentant différentes distributions de points de données le long de leurs courbes respectives, révèle également que P12 et P13 ont des préférences stratégiques différentes pour l'affectation des ressources. En réponse à notre instruction de précision max, P13 est monté plus haut sur sa courbe que P12 sur la sienne ($SI_{max} = 22,5$ vs $18,9$), tandis que sur l'instruction de vitesse max, il n'a pas exploré sa courbe aussi loin que P12 vers le bas ($SI_{min} = 1,07$ vs $0,35$). Ainsi, la comparaison indique que malgré le fait que P12 a investi plus de ressources que P13, il a mis plus d'accent sur la vitesse, ces deux observations étant indépendantes.

© 2013 TELECOM ParisTech

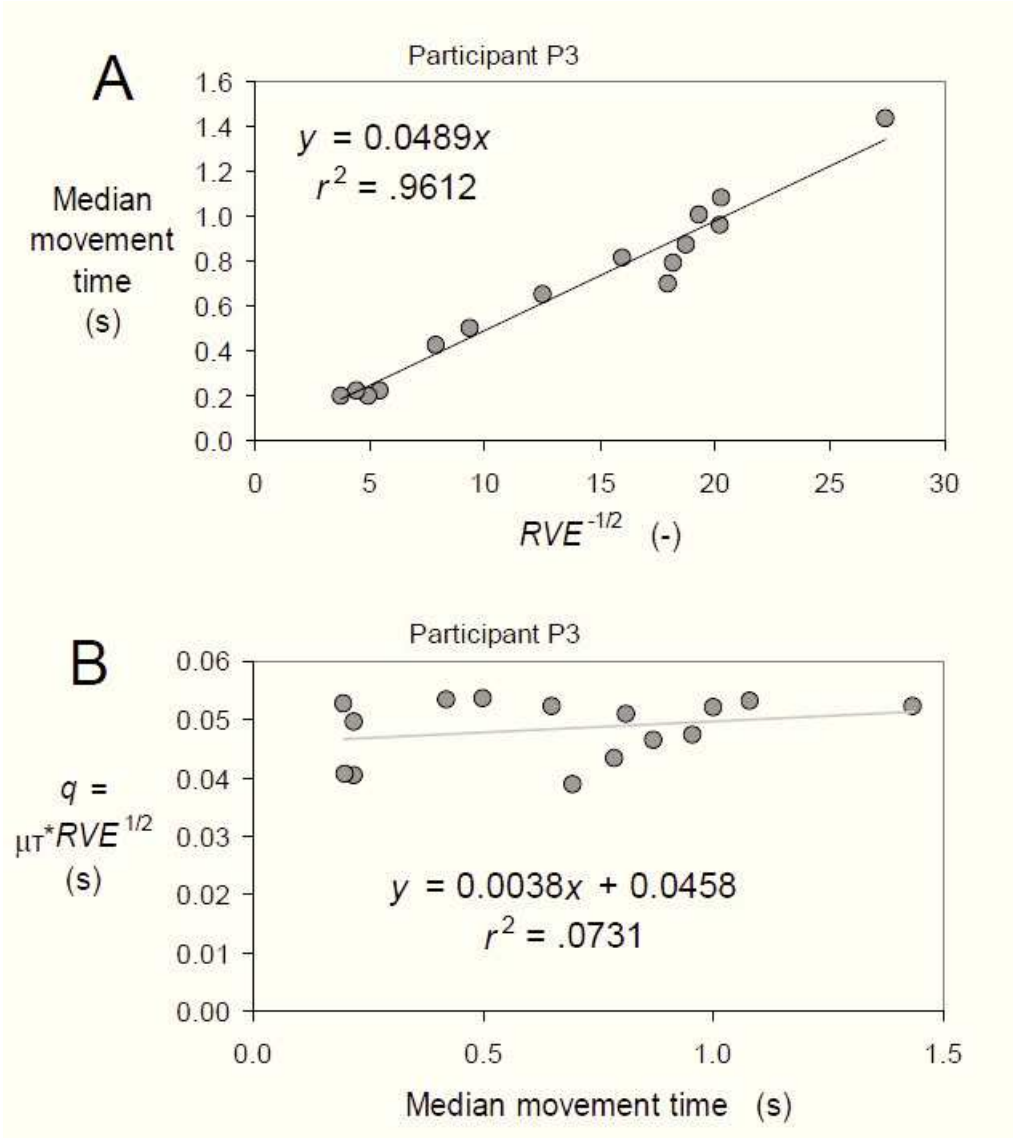


FIGURE 3.9 – Un exemple représentatif de A) l'ajustement du modèle à un coefficient de l'Équation 3.6 et B) la conservation de q à travers une variation de μ_T

3.6 Implications pour la recherche fondamentale et l'IHM

Dans ce chapitre, nous avons essayé de formuler avec une certaine rigueur la loi de Fitts comme un compromis vitesse/précision. Les données montrent en effet que la loi peut être reformulée comme compromis entre deux variables aléatoires, le temps nécessaire pour atteindre une cible et la dispersion relative des points d'arrivée de mouvement. Notez que le compromis que nous avons décrit implique du temps et de l'**imprécision**, plutôt que de la vitesse et de la précision. Le fait que la loi de Fitts puisse être reformulée strictement en termes de vitesse et de précision reste une question ouverte, avec quelques difficultés non négligeables compte tenu des nombreuses défini-

© 2013 TELECOM ParisTech

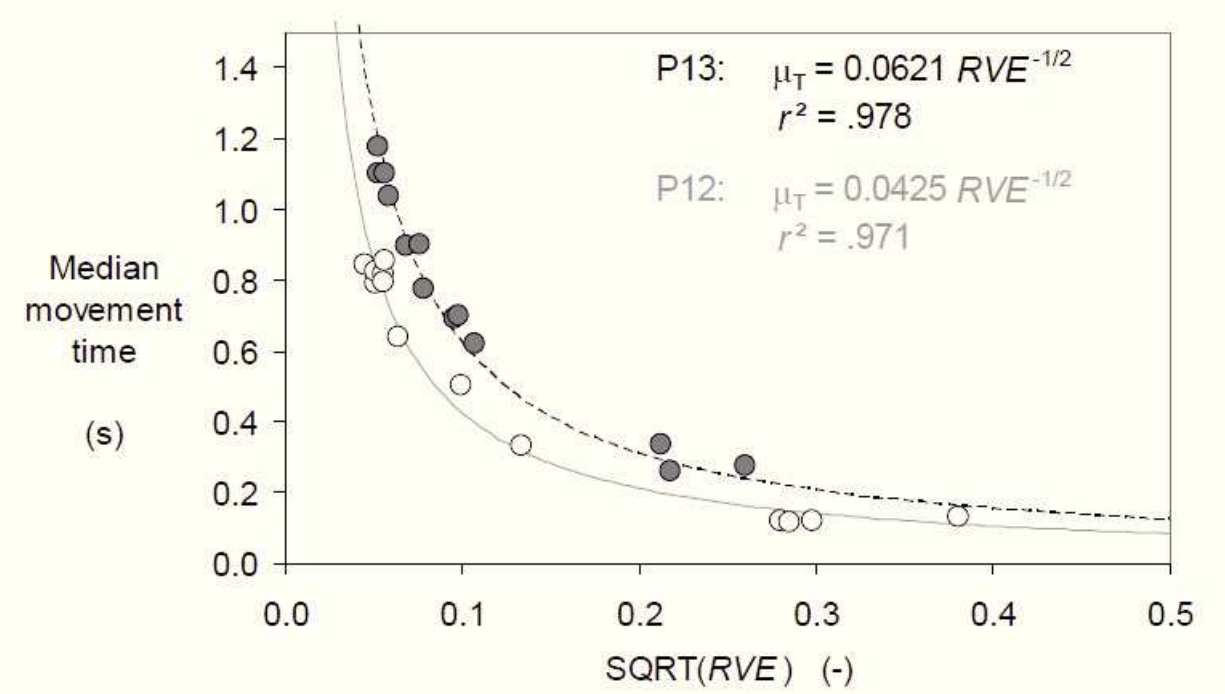


FIGURE 3.10 – Comparaison de deux différentes courbes représentant le compromis. Chaque courbe représente un participant.

tions possibles de chacun de ces deux termes.

L'un des résultats potentiellement important de cette recherche est la suggestion que la description mathématique de la loi de Fitts peut être simplifiée, sans pour autant sacrifier la qualité de la modélisation, en une équation impliquant une racine carrée et un unique coefficient. Pour les chercheurs en général, moins un modèle a de coefficient, mieux c'est. En se basant sur notre travail, notre hypothèse est que ce modèle n'est valide que pour des échelles optimales de mouvement.

La théorie de l'affectation des ressources aide à comprendre que, pour obtenir une compréhension totale de la notion de performance dans l'acquisition de cible, il y a besoin à la fois d'une caractérisation intensive et d'une caractérisation qualitative. Si l'aspect intensif est explicitement abordée par l'indice de performance (ou throughput), il semble que l'approche basée sur la théorie de l'information a peu à offrir en ce qui concerne l'aspect qualitatif. Le fait que l'équilibre vitesse/-précision soit variable a été considéré comme une complication inquiétante appelant à une correction —la substitution de la largeur effective à la largeur nominale [Crossman, 1956] [MacKenzie, 1992] (section 2.3.2)— de manière à aboutir à une seule mesure synthétique de la performance. Cette correction effectuée, l'indice de performance (throughput) est peu sensible aux variations du déséquilibre vitesse/précision [Fitts and Radford, 1966] [MacKenzie, 1992]. Mais le fait que l'indice de performance (tout comme le coefficient q présenté dans ce chapitre) est conservé malgré la variation de *SI* ne veut pas dire que ces derniers sont sans importance, une conclusion qu'une

© 2013 TELECOM ParisTech

lecture rapide de [MacKenzie, 1992] pourrait suggérer. Le contrôle cognitif induit par les instructions vitesse/précision, qui modulent fortement l'équilibre des temps de mouvements et les écarts de point d'arrivée de mouvement, est en effet un facteur important, ce qui n'influe pas sur l'indice de performance, mais influence un autre aspect de la performance, le déséquilibre stratégique *SI*.

Réduire les données de l'expérience de Fitts à une mesure unique, l'indice de performance, tel que recommandé dans [Soukoreff and Mackenzie, 2004], est pratique pour un chercheur du domaine, mais cela entraîne un coût. Supposons que, en comparant deux techniques d'interaction A et B, on trouve un meilleur indice de performance (en bits/s) avec la technique de A, tout en trouvant un plus fort taux d'erreurs. La conclusion que A surpasse B est peut être vraie, mais une bonne moitié de l'histoire a été oubliée dans la procédure. Dans certains contextes de recherche, en particulier ceux où les questions de sécurité sont critique, il peut être très utile de ne pas ignorer que différentes configurations d'une interface, ou des techniques d'interaction différentes peuvent induire des stratégies vitesse/précision très différentes.

Les approches basées sur la théorie de l'affectation de ressources et sur la théorie de l'information ne sont certainement pas incompatibles, comme l'ont reconnu Fitts et Radford [Fitts and Radford, 1966] qui, même s'ils n'ont pas théorisé le déséquilibre stratégique, ont manipulé des instructions vitesse/précision. Le membre droit de l'Équation 3.6 réécrit en $log_2(\mu_T)$ moins une constante $-\frac{1}{2}log_2(\frac{\sigma_A}{\mu_A})$ permet de manipuler des bits d'information. Mais le membre gauche de cette équation est susceptible de faire appel à un modèle impliquant plutôt des Joules d'énergie. Ainsi, un résultat intéressant de la présente analyse est la suggestion que la théorie de l'information seule n'est pas suffisante pour une compréhension totale de la loi de Fitts.

© 2013 TELECOM ParisTech

© 2013 TELECOM ParisTech

Chapitre 4

Étude de l'invariance de l'Indice de Performance

SOMMAIRE

4.1 INTRODUCTION 52
4.2 INVARIANCE DANS LA LOI DE FITTS 52
4.3 RAPPELS SUR L'INDICE DE PERFORMANCE (*IP*) 53
4.4 ORDRE DES OPÉRATIONS POUR LE CALCUL DE L'*IP* : UN PROBLÈME LIÉ À L'INÉGALITÉ DE JENSEN 56
4.5 RÉÉDITION DU TEST DE MACKENZIE ET DE ISOKOSKI 59
4.5.1 Méthode 60
4.5.2 Analyse des données 61
4.5.3 Résultats et discussion 61
4.6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES 65

4.1 Introduction

Les humains ont d'innombrables occasions dans la vie de tous les jours de déplacer la main vers un emplacement-cible, par exemple pour atteindre un interrupteur sur un mur ou saisir un objet à proximité. Dans le contexte spécifique de l'interaction homme-machine (IHM), les gens expriment presque toutes leurs décisions en atteignant et en cliquant sur des objets cibles tels que les icônes, les éléments de menu ou des liens hypertextes. Dans tous ces cas, les utilisateurs sont confrontés à compromis vitesse/précision (ou temps/erreur comme explicité dans le Chapitre 3).

Dans le présent chapitre, nous nous intéressons à la fois à la cohérence mathématique et à la validité empirique de la modélisation de la loi de Fitts, en nous concentrant sur une invariance spécifique à la loi de Fitts : si la théorie est correcte, une certaine quantité, appelée l'Indice de Performance IP (présenté en Section 2.4, aussi appelé *throughput*, débit) doit se conserver à travers les variations de l'équilibre vitesse/précision. Nous allons discuter, à la lumière de certaines données, de deux problèmes qui ont freiné le progrès dans la compréhension de cette conservation. Le premier concerne l'ordonnée à l'origine de la fonction de Fitts classique, tandis que le second porte sur l'influence involontaire de l'ordre dans lequel on calcule l'indice de performance.

Il existe de nombreuses manières de formuler la loi de Fitts, dont certaines sont présentées dans la Section 2.2, et tous les modèles proposés n'utilisent pas la notation logarithmique telle que conseillée par [MacKenzie, 1992]. L'équation retenue dans la plupart des cas pour exprimer la loi de Fitts, déjà présentée comme l'Équation 2.2 est donc la suivante :

$$MT = a + b \times log_2(\frac{D}{W} + 1) \tag{4.1}$$

Cette formulation est donc la plus courante, et possède l'avantage, outre de s'ajuster à la plupart des jeux de données, de faire partie du standard ISO [ISO, 2002]. Nous allons réexaminer le calcul de l'Indice de Performance IP et attirer l'attention sur une difficulté méthodologique précédemment inaperçue qui peut nuire à l'évaluation empirique du modèle.

4.2 Invariance dans la loi de Fitts

La loi de Fitts est habituellement écrite en utilisant le modèle dit de Shannon, comme dans l'Équation 4.1, qui prévoit une loi de variation de la forme $y = a + bx$. Autrement dit, y varie linéairement avec x. Mais le modèle peut tout aussi bien être formulé comme une invariance, que ce soit sous la forme

$$\frac{y-a}{x} = b \tag{4.2}$$

Ou

$$y - b \times x = a \tag{4.3}$$

© 2013 TELECOM ParisTech

soulignant que les deux quantités, a et b, sont invariantes à travers les variations de x.

Il est à noter que, en dépit de leur équivalence mathématique, la formulation de la loi de variation de l'Équation 4.1 et les formulations d'invariance des Équations 4.2 et 4.3 placent le modèle dans des positions très différentes en ce qui concerne le risque de falsification empirique [Platt, 1964] [Popper, 1962]. L'équation de Shannon (Équation 4.1) a en fait très peu de chances d'être réfutée par des données empiriques : au pire, on obtiendra un ajustement décevant, se demandant si l'on doit continuer à faire confiance au modèle avec un $r^2 < 0,8$ ou moins. Mais prenez l'affirmation selon laquelle $\frac{y-a}{x}$ doit être indépendant de x, qui a la forme d'une hypothèse nulle (H_0) : si les données plaident pour le rejet de H_0, alors on fait face à une falsification empirique de l'Équation 4.3 et, par voie de conséquence, de l'Équation 4.1. Conformément à l'épistémologie de Popper classique [Platt, 1964] [Popper, 1962], cette façon plus difficile de tester empiriquement la théorie est monnaie courante dans les sciences dites "dures" comme la physique [Meehl, 1967].

4.3 Rappels sur l'Indice de Performance (IP)

L'Indice de Performance (IP [1]) est une norme de mesure largement utilisée dans la communauté IHM comme un outil pour quantifier les performances des utilisateurs avec des périphériques d'entrée et des techniques d'interaction différents.

Dans une expérience de pointage utilisant le paradigme classique de Fitts, les utilisateurs sont priés d'exécuter leurs mouvements aussi rapidement que possible avec un certain niveau de précision (idéalement constant). Bien que de nombreux facteurs, tels que l'humeur, la fatigue, la vigilance puissent influer sur la performance globale, et donc l'Indice de Performance (IP), le modèle dit de Shannon indique que cet IP doit se conserver chez chaque participant, à travers les variations de difficulté de la tâche (ID nominal, basé donc sur D et W) et la précision du mouvement (ID_e) [2]. Parce que l'IP est un indice global de performance qui prend en compte à la fois la vitesse et la précision, son utilité pratique dans le contexte de la recherche en IHM est indéniable.

[MacKenzie and Isokoski, 2008] ont récemment testé la robustesse de l'IP en utilisant un jeu de trois instructions distinctes :

1. Accent sur la vitesse,
2. Équilibre vitesse/précision,
3. Accent sur la précision.

1. Pour rappel, les notations IP et TP sont équivalentes. La première se réfère à l'Index of Performance, traduit par Indice de Performance, et la seconde à Throughput, qui désigne le même indice. On désignera donc de manière générique l'IP, mais on se réfèrera à TP pour distinguer les différentes manières de calculer cette quantité.

2. Pour rappel, le Chapitre 2 présente ces deux notions d'Indice de Difficulté, l'une basée sur les valeurs fixées arbitrairement par l'expérimentateur (Section 2.2.2, l'autre basée sur les performances réelles du participant (Section 2.3.3).

© 2013 TELECOM ParisTech

Alors que, sans surprise, la vitesse et la précision des performances des participants étaient toutes deux fortement affectées par le changement d'instruction, le principal résultat a été l'échec de la détection d'un effet significatif de la manipulation d'instruction sur l'indice de performance. [MacKenzie and Isokoski, 2008] ont fait valoir que ce résultat est une preuve de la robustesse du modèle de Shannon pour la loi de Fitts.

Notre but, dans ce chapitre est double :

1. Tout d'abord, nous allons ré-analyser les données de notre étude du Chapitre 3 [Guiard *et al.*, 2011] pour tester l'hypothèse nulle d'invariance de l'*IP* à travers les variations de vitesse et précision. Il nous a semblé que parce que [MacKenzie and Isokoski, 2008] n'ont fait varier leurs instructions que sur une gamme limitée, leur test du modèle de Shannon est trop clément. Ainsi, bien que notre analyse ci-dessous reproduise le test de [MacKenzie and Isokoski, 2008] sur de nouvelles données, nous allons également présenter les résultats d'un test beaucoup plus exigeant dans lequel la stratégie vitesse/précision de nos participants va varier dans tout son spectre, d'une vitesse maximale à une précision maximale.
2. Notre second objectif est d'attirer l'attention sur une difficulté méthodologique que de nombreux auteurs ont potentiellement remarquée, sans y prêter beaucoup d'attention, mais que les résultats de la présente étude nous ont obligés à prendre au sérieux. La difficulté provient du fait que l'ordre dans laquelle on fait les différentes opérations nécessaires pour le calcul de l'*IP* affecte les résultats. Nous allons montrer que le problème est dû à un résultat mathématique connu sous le nom d'inégalité de Jensen.

Vingt ans se sont écoulés depuis que [MacKenzie, 1992] a proposé de remplacer l'équation originale de Fitts $MT = a + b \times log_2(\frac{2D}{W})$ avec l'Équation 4.1. MacKenzie a convaincu la communauté IHM que la formule de Shannon est théoriquement et empiriquement prédictive, mais il n'existe toujours pas d'accord sur la définition exacte de l'Indice de Performance (*IP*) [3].

Même si [Zhai, 2004] a identifié trois définitions distinctes dans la littérature, la controverse du calcul de l'*IP* se résume à une simple dichotomie mathématique : il s'agit en effet de savoir si, dans le calcul de l'*IP*, il faut prendre en compte l'ordonnée à l'origine (coefficient a) de l'équation de Shannon (Équation 4.1) et donc de calculer l'*IP* comme :

$$TP_Z = \frac{1}{b} = \frac{ID}{MT - a} \tag{4.4}$$

ou au contraire, s'il faut ignorer ce coefficient, et en accord avec [Fitts, 1954] calculer l'*IP* comme

$$TP_M = \frac{ID}{MT} \tag{4.5}$$

L'Équation 4.4 est une dérivation immédiate de l'Équation 4.1. Elle donne une définition de l'*IP* que [Card *et al.*, 1978] ont utilisé dans leur étude pionnère de la loi de Fitts dans le contexte

3. Dans le Chapitre 2, les différentes manières de calculer l'*IP* ont été présentées dans la Section 2.4.

© 2013 TELECOM ParisTech

de l'IHM. Plus récemment, cette définition a été vigoureusement défendue par [Zhai, 2004], d'où l'indice *Z*.

Comme l'a souligné Zhai, l'Équation 4.5 est incompatible avec l'Équation 4.1, puisque l'ordonnée à l'origine est laissée de côté. Néanmoins, cette définition de l'*IP* a été préconisée par MacKenzie (d'où l'indice *M*), en se basant sur l'argument selon lequel, en principe, cette ordonnée à l'origine devrait être nulle ([Soukoreff and Mackenzie, 2004]). Récemment, [Guiard and Olafsdottir, 2011] ont fait valoir qu'aucune hypothèse raisonnable —quant à la valeur de ce coefficient— ne peut être établie car l'*ID* fonctionne sur une échelle de mesure de type non-ratio, ce qui signifie que la valeur de l'ordonnée à l'origine est arbitraire et ininterprétable. Mais le fait est que le TP_M n'a jamais cessé d'être populaire parmi les chercheurs en IHM et sa crédibilité est maintenant renforcée par une norme ISO [ISO, 2002].

Dans une étude récente, [Wobbrock *et al.*, 2011] mettent en garde contre les comparaisons entre les deux catégories d'*IP*, qui nécessairement produisent des estimations plus ou moins divergentes (la Section 2.5 propose une illustration de cette divergence). Mais malheureusement, il y a de la place au sein d'une même approche pour un tout autre genre de divergence. Pour aller plus avant sur ce point, nous nous en tiendrons à la définition de MacKenzie (TP_M, Équation 4.5). Considérons les Équations 4.6 et 4.7, deux implémentations statistiques concrètes de la formule mathématique de l'Équation 4.5 :

$$\overline{TP}_{M,CtA} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} TP_i \tag{4.6}$$

$$\overline{TP}_{M,AtC} = \frac{\overline{ID}}{\overline{MT}} = \frac{log_2(1+\frac{\overline{A}}{4{,}133\times\sigma_A})}{\overline{MT}} \tag{4.7}$$

La seule différence réside dans l'ordre dans lequel on effectue le calcul des quantités : dans l'Équation 4.6 on calcule d'abord l'Indice de Performance de chaque participant, puis on fait la moyenne de ces indices individuels pour obtenir sa valeur globale (on note cette manière *CtA*, à savoir "Compute then Average", soit "Calcul puis Moyenne"), tandis que dans l'Équation 4.7, on calcule d'abord les moyennes des *ID* et des temps *MT* pour tous les participants, et on obtient le résultat final en divisant ces deux moyennes (on note cette manière *AtC* soit "Average then Compute", ou "Moyenne puis Calcul"). Les deux équations semblent être mathématiquement et statistiquement valables et les chercheurs qui ont utilisé les deux versions peuvent les avoir considérées comme équivalentes. La description de l'*IP* proposée par la norme internationale ISO [ISO, 2002] hésite entre les deux.

© 2013 TELECOM ParisTech

4.4 Ordre des opérations pour le calcul de l'*IP* : un problème lié à l'inégalité de Jensen

Comme nous l'avons déjà expliqué, le calcul de l'*IP* implique deux sortes d'opérations. La première est une moyenne, une opération statistique qui permet de compresser un ensemble de nombres en une valeur synthétique unique. L'autre est un calcul simple (par exemple, le calcul du quotient d'une fraction), une opération arithmétique qui combine des nombres en un seul résultat. Malheureusement, la valeur finale de l'*IP* dépend de l'ordre dans lequel ces deux opérations sont effectuées.

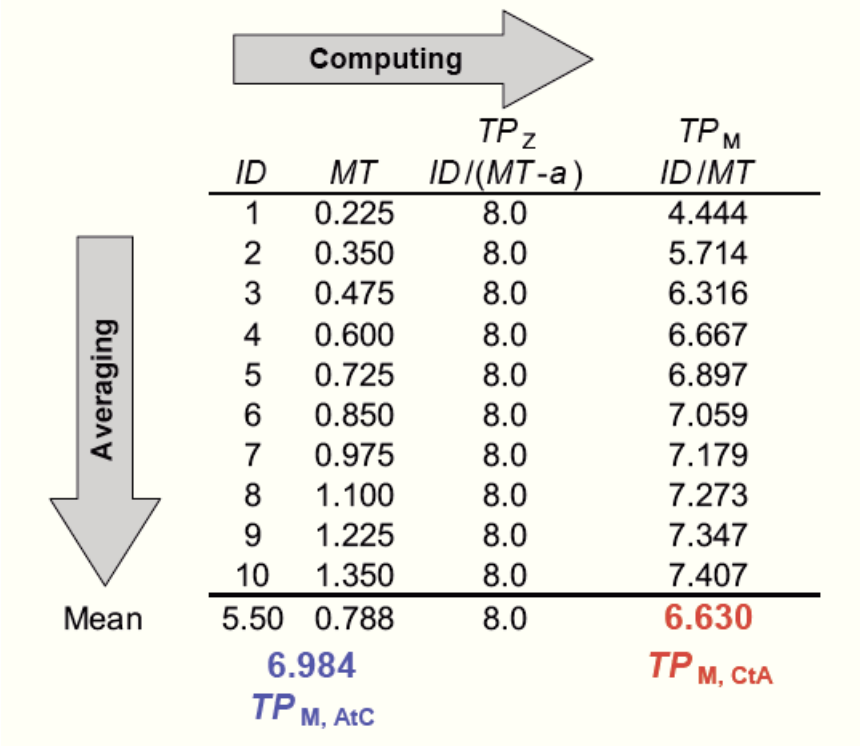


FIGURE 4.1 – Deux façons de calculer le TP_M sous l'hypothèse que la loi de Fitts suit la formule de Shannon, avec $a = 0,1$ s et $b = 0,125$ s/bit . La troisième colonne $TP_Z = \frac{ID}{MT-a}$ est constante par hypothèse.

La Figure 4.1 montre un ensemble hypothétique de dix valeurs MT calculées à partir de l'Équation 4.1 dont les coefficients ont été fixés à des valeurs arbitraires mais plausibles, $a = 0,1$ s et $b = 0,125$ s/bit ([Zhai, 2004]). Cette figure aide à comprendre qu'il existe bien deux manières d'obtenir la valeur globale de TP_M de dix paires d'ID et MT. Une solution consiste à commencer par le calcul de TP_M dans chaque ligne, pour ensuite calculer la moyenne des dix valeurs de TP_M au bas de la colonne de droite - c'est ce que nous appelons la manière *CtA*). Avec les données hypothétiques de la Figure 4.1, on obtient $TP_M = 6,63$ bits/s.

© 2013 TELECOM ParisTech

L'alternative est de commencer par calculer les moyennes des dix valeurs de ID et de MT, en suivant les colonnes, puis ensuite de calculer TP_M une seule fois à partir des ces deux moyennes —c'est ce que nous appelons la méthode *AtC*—. Avec cette méthode et les données de la Figure 4.1, on obtient $TP_M = 6,98$ bits/s, ce qui est plus (+5,3%) que les $6,63$ bits/s obtenus avec la méthode *CtA*.

Le seul problème est l'inégalité de Jensen, qui stipule que pour toute fonction convexe f

$$f(\overline{x}) \leq \overline{f(x)} \tag{4.8}$$

ou inversement si la fonction est concave (la barre supérieure dénotant l'opération de moyennage).

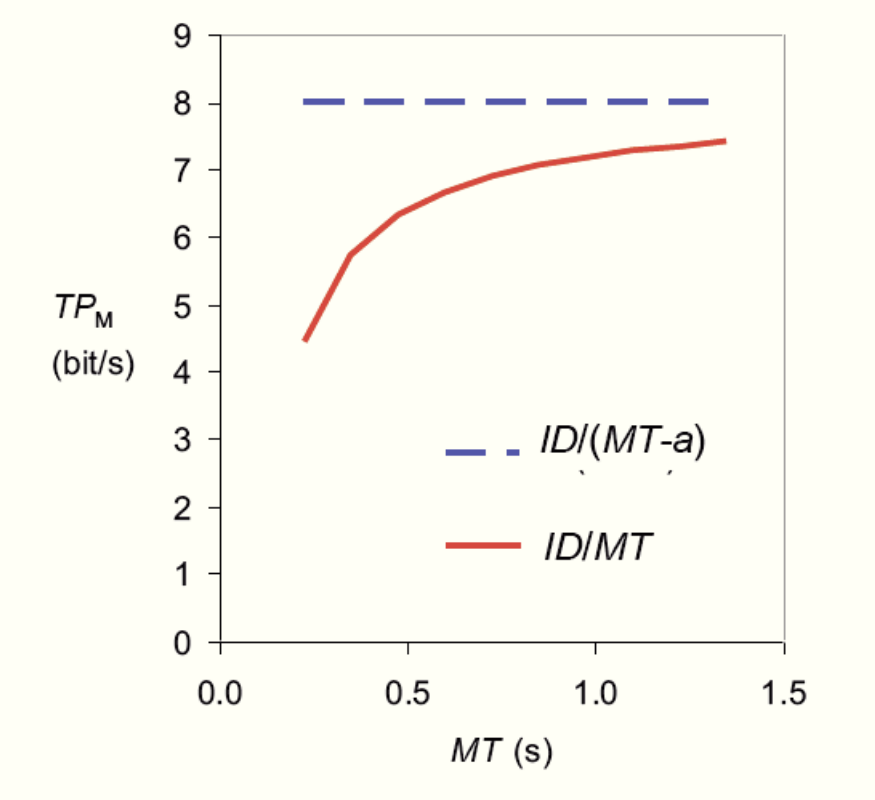


FIGURE 4.2 – La fonction $TP_M = f(MT)$ avec le modèle Shannon.

La Figure 4.2, qui représente graphiquement les données de la Figure 4.1, montre que la fonction $TP_M = f(MT)$, ou $f(MT) = \frac{1-a}{MT}$, est concave, ce qui permet de déduire l'inégalité suivante :

$$\overline{TP}_{M,AtC} \geq \overline{TP}_{M,CtA} \tag{4.9}$$

© 2013 TELECOM ParisTech

Revenons à des formules plus concrètes comme celles des Équations 4.6 et 4.7. L'impact de l'inégalité de Jensen est complexe et assez difficile à deviner pour deux raisons.

En premier lieu, puisque le calcul du TP_M implique une fonction de la forme :

$$\frac{log_2(1+\frac{x}{\sqrt{y}})}{t} \tag{4.10}$$

nous avons affaire à un calcul à cinq étapes successives, représentés de gauche à droite dans la Figure 4.3.

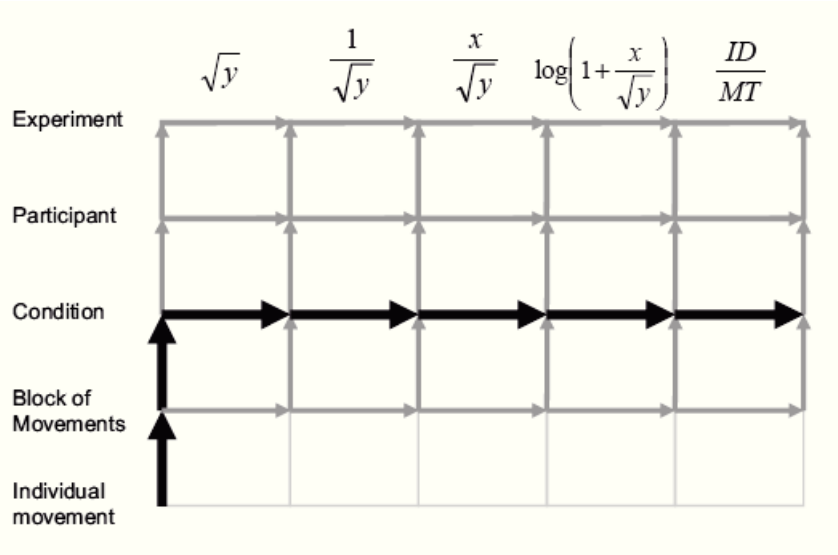


FIGURE 4.3 – Les étapes successives de calcul de TP_M, (de gauche à droite) et les niveaux d'agrégation statistique (de bas en haut). Un exemple de chemin est mis en relief, qui fournit la valeur globale du TP_M pour un participant particulier placé dans une condition donnée.

Deuxièmement, comme l'illustre la Figure 4.3, un jeu de données implique normalement plus de deux étapes de calcul. En réalité, le calcul du TP_M d'un participant peut exiger jusqu'à quatre niveaux d'agrégation statistique du type moyennage. En réalité, le calcul du TP_M peut exiger jusqu'à quatre opérations d'agrégation dans une expérience de Fitts typique, si l'on va jusqu'au calcul d'un TP_M collectif. En partant des mesures individuelles de MT, on a quatre moyennages à faire, représentés sur la Figure 4.3 par des flèches montantes, pour obtenir successivement :

- les moyennes de blocs, dont chacune résume un certain nombre de mesures individuelles ;
- les moyennes de conditions, dont chacune résume les performances pour un certain nombre de blocs ;
- les moyennes de participants, dont chacune résume les performances pour un certain nombre de conditions, et
- la moyenne sur l'ensemble de l'expérience, qui résume les performances de tous les participants.

© 2013 TELECOM ParisTech

Le fait important est que, contrairement à l'impression qui pourrait découler de la simple comparaison des Équations 4.6 et 4.7, il y a bien plus de deux façons d'organiser les nombreuses étapes de calcul et d'agrégation entrant en compte pour l'estimation de TP_M. Le nombre de chemins possibles est le nombre de façons possibles d'insérer 3 objets dans 6 places.

$$\binom{6}{3} = \frac{6 \times 5 \times 4}{3 \times 2 \times 1} = 20 \tag{4.11}$$

Ainsi, avec cinq étapes de calcul et quatre opérations de moyennage, il existe 20 parcours possibles, qui offrent tous des estimations différentes du TP_M [4]. Ainsi, l'inégalité de Jensen a de nombreuses occasions d'intervenir, ce qui a l'inconvénient d'introduire une dose problématique de variabilité non-contrôlée dans le traitement des données.

L'exemple concret de la section suivante montrera que ce biais peut être très dommageable. Selon l'ordre de calcul *CtA* ou *AtC*, nous avons constaté que notre test peut échouer ou réussir à reproduire le résultat de [MacKenzie and Isokoski, 2008].

4.5 Réédition du test de Mackenzie et de Isokoski

Cette section présente les résultats d'un nouveau test de l'hypothèse d'invariance de l'*IP* basé sur une nouvelle analyse des données de notre expérience du Chapitre 3. Notre test expérimental diffère de [MacKenzie and Isokoski, 2008] —et en même temps de la plupart des tests de la littérature Fitts— de trois manières.

Tout d'abord, nous avons utilisé un protocole discret plutôt que des mouvements alternatifs, de manière à obtenir une estimation plus fiable des MT. Comme noté par [Fitts and Peterson, 1964], le protocole discret permet un contrôle des variables plus rigoureux que ce qui est possible avec le protocole réciproque. Ce point a déjà été explicité en section 3.5.

Deuxièmement, la cible du pointage a été affichée comme une ligne d'un pixel, plutôt que comme une bande de largeur W. Cette différence est aussi explicitée dans la section 3.5. Notre stratégie consiste à oublier une fois pour toute la notion de tolérance et à considérer la dispersion réelle des points d'arrivée du mouvement.

En troisième lieu, et peut-être plus important encore, nos manipulations ont couvert la gamme complète de la stratégie vitesse/précision, ce qui nous permet de tester de manière plus stricte et

4. Ce calcul prend en compte le fait que la toute première opération ne peut consister en un agrégat, du fait que l'écart type de l'amplitude du mouvement est non défini en dessous de l'échelle du bloc de mouvements.

© 2013 TELECOM ParisTech

donc plus informative la validité du modèle de Shannon [Shannon, 1948] préconisé par MacKenzie.

4.5.1 Méthode

Plus de détails sur la méthode et l'expérience sont rapportés dans la Section 3.5. Pour rappel, les seize participants ont reçu un jeu de cinq instructions quant aux mouvements qu'ils devaient effectuer. Ce jeu d'instructions forme une variable indépendante de niveau ordinal :

- Vitesse maximale
- Accent sur la vitesse
- Équilibre vitesse/précision
- Accent sur la précision
- Précision maximale.

Dans la condition "Vitesse maximale", l'exigence en termes de précision est de terminer les mouvements en moyenne dans le voisinage de la cible. À l'autre extrêmité du continuum des instructions, pour l'instruction de "Précision maximale", les participants devaient amener le curseur exactement sur la cible (avec une erreur de zéro pixel), avec pour seule contrainte de temps de ne pas gaspiller du temps (prendre tout le temps nécessaire, mais pas davantage). Les trois instructions centrales, l'une non-biaisée ("Équilibre vitesse/précision") et les deux autres biaisées ("Accent sur la vitesse" et "Accent sur la précision") étaient tout à fait similaires à celles de [MacKenzie and Isokoski, 2008].

Configuration matérielle

L'expérience a été réalisée sur un moniteur de $1280 \times 1024 pixels$ ($34.0 \times 27.1 cm$) et une tablette graphique Wacom Intuos3 connectée à un PC sous la distribution Linux Ubuntu. Deux lignes verticales, s'étendant de haut en bas, étaient affichées à l'écran, séparées de $150mm$, l'une marquant le point de départ (à gauche), et l'autre la cible (à droite) du mouvement. Les deux lignes, de largeur minimale d'1 pixel, étaient de couleur rouge sur un fond blanc. Un curseur d'un pixel d'épaisseur en forme de croix de couleur noire, était présent à l'écran. Son mouvement était contrôlé par le stylet. La tablette est utilisée en mode absolu avec un gain de 1, la main devait donc parcourir 150mm à partir de sa position d'origine pour atteindre l'objectif.

Procédure

Chacun des 16 participants a effectué cinq blocs de 15-20 mouvements pour tout le jeu d'instruction (25 blocs en tout). En somme cette expérience a consisté en 15 mouvements $\times$ 25 blocs $\times$ 16 blocs participants = 6000 mouvements au minimum.

© 2013 TELECOM ParisTech

4.5.2 Analyse des données

Nous avons fait deux tests d'analyse de variance à un facteur (within-participant one-way ANOVAs) sur la variable TP_M. Dans l'un d'eux, qui vise à reproduire le test de [MacKenzie and Isokoski, 2008], le facteur "instruction" a été limité à ses trois niveaux centraux [5]. Dans l'autre ANOVA nous avons examiné les cinq niveaux d'instructions, fournissant ainsi un test beaucoup plus difficile de l'hypothèse d'invariance de l'IP.

Les mesures sur les mouvements individuels étaient le temps (MT, en secondes) et l'amplitude (A, en mm). Pour chacun des 25 blocs, nous avons calculé les trois ingrédients nécessaires pour calculer l'IP, à savoir, la médiane de MT et la moyenne et l'écart-type de l'amplitude (respectivement notés μ_A et σ_A). Nous avons ensuite calculé les valeurs de TP_M pour chaque instruction en utilisant les méthodes AtC et CtA, débouchant ainsi sur deux variables dépendantes à soumettre au test ANOVA, à savoir $TP_{M,CtA}$ et $TP_{M,AtC}$. Les figures ci-dessous montrent les moyennes calculées sur les 16 participants.

4.5.3 Résultats et discussion

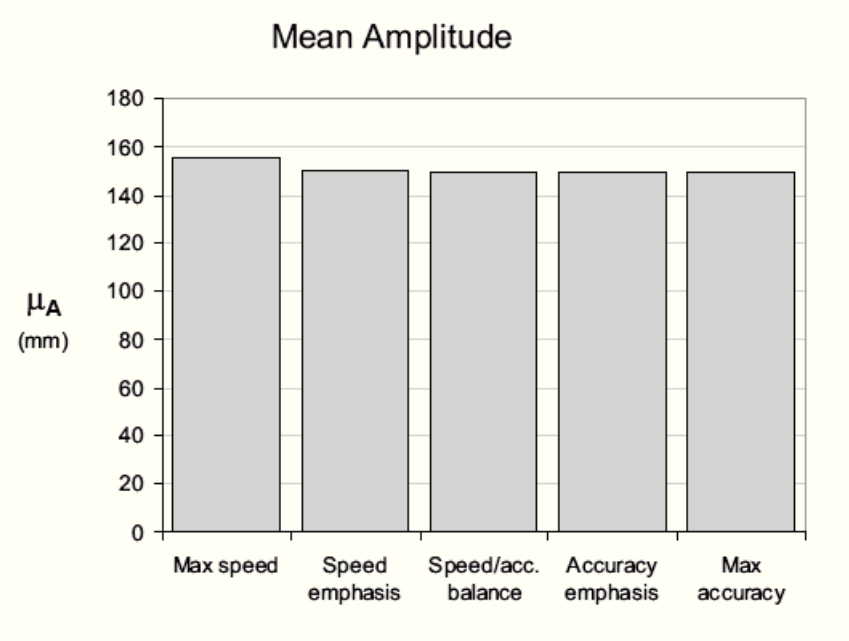


FIGURE 4.4 – Amplitude moyenne en fonction des consignes.

Comme le montre la Figure 4.4, l'amplitude moyenne du mouvement (μ_A) était très proche de 150 mm. Les participants étaient en mesure de produire essentiellement des mouvements non

5. Les instructions centrales sontles instructions "Accent sur la vitesse", "Équilibre vitesse/précision" et "Accent sur la précision".

© 2013 TELECOM ParisTech

biaisés, la seule exception étant un dépassement moyen de 5,5 mm pour l'instruction de "Vitesse maximale" ; bien qu'il existe un effet statistiquement significatif ($t_{15} = 4,50$, $p < 0,001$) il s'agit d'un biais remarquablement faible de +3,7%, ce dont nous ne discuterons pas ici.

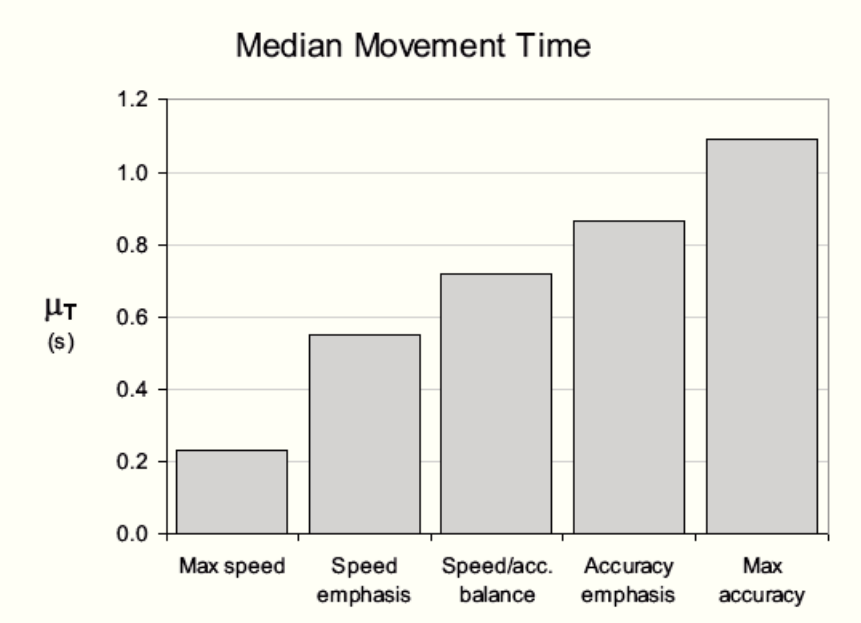


FIGURE 4.5 – Temps de mouvement médian en fonction des consignes.

Plutôt que de l'amplitude du mouvement, ce que notre manipulation des instructions a influencé est, sans surprise, la vitesse et la précision de leurs performances, deux effets très forts, comme observé par [MacKenzie and Isokoski, 2008]. La Figure 4.5 montre l'augmentation progressive du temps de mouvement médian (μ_T), de la condition "Vitesse maximale" (environ 200 ms) à la condition "Précision maximale" (plus d'une seconde), avec un temps quintuplé. Évidemment, un allongement monotone du temps de mouvement à un niveau constant d'amplitude signifie une chute monotone de la vitesse moyenne, comme l'illustre la Figure 4.6.

Une autre preuve que nos instructions ont joué un rôle dans la modulation de la stratégie des participants est visible sur la Figure 4.7, qui montre la distribution des points de mouvement, mesurée par l'écart type de l'amplitude (σ_A), a diminué graduellement de la condition "Vitesse maximale" (avec un écart type de l'amplitude σ_A de 13 mm, soit 8% de la moyenne) à la condition "Précision maximale" (0,5 mm, soit 0,3% de l'amplitude moyenne).

Le résultat essentiel de cette expérience est présenté dans la Figure 4.8, qui représente $TP_{M,CtA}$ et $TP_{M,AtC}$, les deux variantes de l'estimation de l'IP, en fonction des instructions.

Rappelons que selon MacKenzie et ses collègues TP_M ne devrait pas varier selon les variations de la stratégie de la vitesse/précision. Testé sur notre jeu complet d'instructions noté "Tough test"

© 2013 TELECOM ParisTech

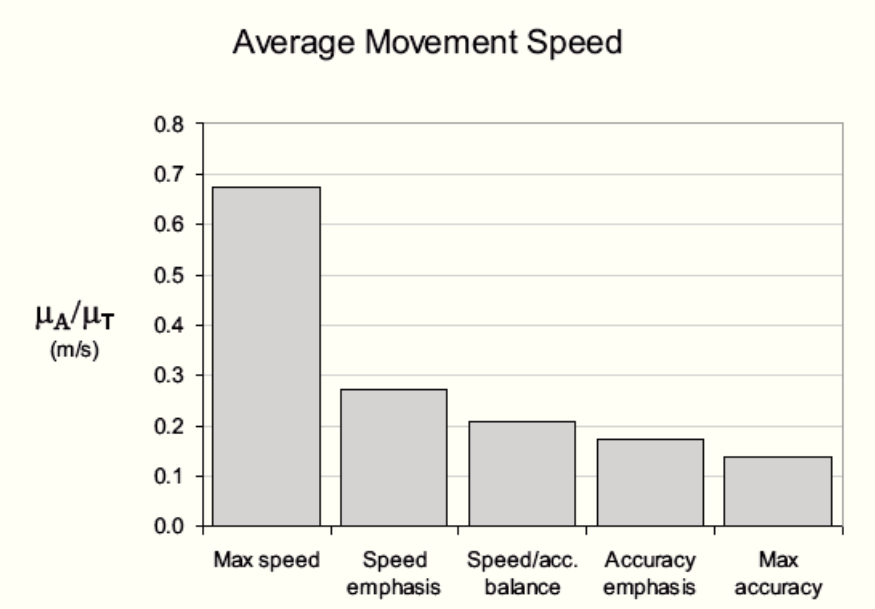


FIGURE 4.6 – Vitesse moyenne en fonction des consignes.

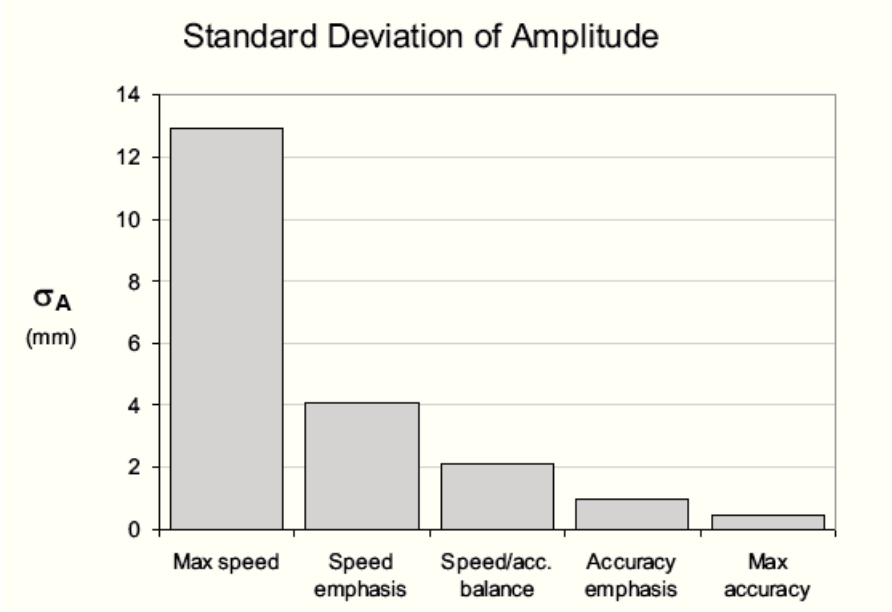


FIGURE 4.7 – Écart type des points de mouvements en fonction des consignes.

	5 instructions (Tough test)			Instructions centrales (Mild test)		
	F	df	p	F	df	p
CtA	23,54	4	< 0,001	5,03	2	0,013
AtC	19,69	4	< 0,001	1,86	2	0,173

TABLE 4.1 – Résultats des analyses de variance sur les trois instructions centrales, ou tout le jeu, menés sur les deux méthodes de calcul de TP_M (*AtC* et *CtA*)

© 2013 TELECOM ParisTech

sur la Figure 4.8, l'hypothèse d'invariance de TP_M a nettement échoué. Que ce soit calculé avec la méthode *CtA* ou *AtC*, TP_M chute, passant d'environ 10 bits/s à environ 6 bits/s, respectivement pour l'instruction "Vitesse maximale" pour pour "Précision maximale". C'est un effet substantiel, puisqu'il s'agit d'une réduction de 42% de TP_M, qui est d'ailleurs statistiquement significatif (cf table 4.1).

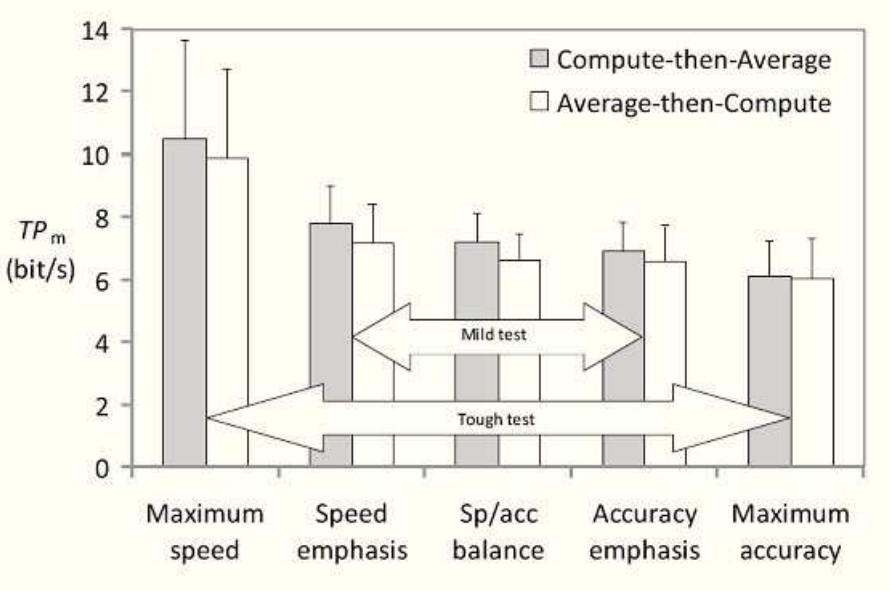


FIGURE 4.8 – TP_M en fonction des instructions. Les barres d'erreur indiquent les intervalles de confiance à 95% sur la base écarts-types entre-participants.

Intéressons nous d'abord au test le plus clément, à savoir celui portant sur les 3 instructions centrales, comme l'ont fait [MacKenzie and Isokoski, 2008]. Si l'on considère la méthode de calcul *AtC* de TP_M, alors on constate un non-rejet de l'hypothèse nulle H_0 [6] ($p > 0,05$). Avec la méthode *CtA*, cependant, il y a bien rejet de H_0 ($p < 0,02$). Dans ce cas, on peut affirmer que TP_M ne se conserve pas à travers les variations d'instruction. Cette indécision, qui donne un résultat différent selon la méthode de calcul, est une complication gênante induite, à notre avis, par l'inégalité de Jensen.

À notre avis, ce n'est pas nécessairement le modèle de Shannon de l'Équation 4.1 qui doit être remis en question à la lumière des résultats actuels, mais plutôt l'Équation 4.5, qui fait l'hypothèse que l'ordonnée à l'origine (coefficient a de la loi de Fitts) est nulle —une hypothèse intenable compte tenu de l'échelle de mesure de type non-ratio utilisée pour $\frac{\mu_A}{\sigma_A}$ ou $\frac{D}{W}$ ([Guiard and Olafsdottir, 2011])—.

6. L'hypothèse nulle étant qu'il n'y aurait pas de différence significative entre les valeurs de TP_M calculés pour chaque instruction.

© 2013 TELECOM ParisTech

Ce test aurait-il réussi si nous avions considéré TP_Z à la place de TP_M ? Nous avons constaté avec une simulation sur notre ensemble de données que l'effet des instructions sur le TP_Z aurait été faible et peu significatif. Ce résultat est douteux, cependant, parce que le test de l'invariance de $TP_Z = \frac{1}{b}$ à travers les variations de la stratégie vitesse/précision nécessite l'utilisation du coefficient a, à savoir l'ordonnée à l'origine. Cela suppose que l'équation de Shannon doit être calculée à l'avance, et la validité du test est questionnable. Un autre genre de test expérimental est nécessaire pour évaluer l'invariance de TP_Z.

4.6 Conclusion et perspectives

Le calcul de l'Indice de Performance IP en utilisant TP_M est une norme établie en IHM, qui s'est encore renforcé depuis 2002 par la norme officielle ISO [ISO, 2002]. Il n'y a pas de doute que la standardisation, qui facilite les comparaisons, est utile [Soukoreff and Mackenzie, 2004]. Vingt années de consensus sur le modèle de Shannon, ont certainement été un atout pour la recherche sur la loi de Fitts en IHM. Cependant, le fait de ne pas reconnaître la démonstration de [Zhai, 2004], qui montre que la méthode standard de mesure de IP (Équation 4.5) est incompatible avec le modèle de Shannon (Équation 4.1) a été un handicap. Nos données, qui montrent que le TP_M ne parvient pas à passer un test strict d'invariance difficile, et passe à peine un test plutôt clément, confirme la suggestion de [Zhai, 2004] que les chercheurs devraient revenir à la définition mathématiquement correcte de l'IP montré dans l'Équation 4.4.

Une autre leçon importante à tirer de cette étude est qu'un sérieux travail de méthodologie est nécessaire pour tenter de maîtriser la variabilité cachée induite par l'inégalité de Jensen. À notre connaissance, l'impact de cette difficulté méthodologique sur le traitement des données n'a pas encore été bien comprise et nous croyons que ce problème général vaut une investigation systématique. Il y a des raisons de croire qu'il s'agit d'un problème méthodologique général dont la portée s'étend bien au-delà de l'étude de la loi de Fitts. Que la solution porte sur certains principes mathématiques ou statistiques ou peut-être sur certaines conventions arbitraires est une question ouverte que nous étudions actuellement.

© 2013 TELECOM ParisTech

© 2013 TELECOM ParisTech

Chapitre 5

Récapitulatif du Pointage

SOMMAIRE

5.1 RAPPEL DES CONTRIBUTIONS 68
5.1.1 Loi de Fitts comme un compromis temps/erreur 68
5.1.2 Invariance de l'Indice de Performance 68
5.2 VERS UN MODÈLE ET DES MÉTRIQUES POUR LES PETITS NIVEAUX D'ÉCHELLE 68
5.3 VERS UNE NOUVELLE APPROCHE 69

5.1 Rappel des contributions

Les contributions présentées dans cette partie sur le pointage sont un nouveau modèle pour la loi de Fitts, ainsi qu'une étude sur l'invariance de l'Indice de Performance.

5.1.1 Loi de Fitts comme un compromis temps/erreur

Lors de ce chapitre, nous avons exprimé la loi de Fitts comme un compromis temps/erreur, au lieu de vitesse/précision, comme préconisé initialement. Nous avons aussi découvert une nouvelle formulation pour la loi sous la forme suivante :

$$\mu_t = \frac{q}{\sqrt{\frac{\sigma_A}{\mu_A}}} \tag{5.1}$$

Cette formulation n'utilise qu'un coefficient ajustable (q) qui exprime aussi une quantité de ressources disponibles. Ce travail a fait l'objet d'une publication (papier long) à la conférence CHI 2011 [Guiard *et al.*, 2011].

5.1.2 Invariance de l'Indice de Performance

Le travail présenté dans ce chapitre met à jour un biais affectant le calcul de l'Indice de Performance (IP) lié à l'ordre dans lequel sont effectuées les opérations d'agrégation statistique (comme le moyennage) et de calcul numérique (comme par exemple la division). Ce biais lié à l'inégalité de Jensen a été largement ignoré par les chercheurs en IHM et peut induire une variabilité dans les résultats. En outre, nous avons aussi repris l'expérience de MacKenzie et Isokoski [MacKenzie and Isokoski, 2008] sur l'invariance de l'Indice de Performance. En utilisant un protocole proche basé sur des consignes, nous montrons que selon la méthode de calcul choisie, l'invariance de cet indice n'est pas garantie. Ce travail a été publiée à la conférence BCS HCI 2012 et a été élu "best paper" [Olafsdottir *et al.*, 2012a], ce qui lui a valu d'être réédité dans le journal "Interfaces" [Olafsdottir *et al.*, 2012b].

5.2 Vers un modèle et des métriques pour les petits niveaux d'échelle

L'objectif initial de cette partie du travail de thèse était de vérifier la validité du modèle de Fitts sur de petits niveaux d'échelle. En entamant ce travail, nous nous sommes rapidement rendu compte qu'il existait un modèle plus robuste pour prédire les temps de mouvement à niveau d'échelle confortable —c'est-à-dire dans des conditions d'échelle proches de l'ordre de 10-20 cm, comme les manipulations effectuées sur un ordinateur de bureau—.

En effet, le modèle à un unique coefficient que nous avons proposé au Chapitre 3 possède plusieurs avantages :

© 2013 TELECOM ParisTech

1. Notre modèle n'utilise qu'un unique coefficient ajustable q au lieu de deux (a et b).
2. Le temps prédit par notre modèle est strictement supérieur à 0, ce qui peut ne pas être le cas dans le modèle classique logarithmique.

En outre, le travail présenté au Chapitre 4 a permis de mettre en avant le fait que le calcul de l'Indice de Performance pouvait donner des résultats variant sensiblement, et surtout que l'hypothèse d'invariance de cette indice n'est pas toujours vérifiée.

Il parait donc intéressant, dans la continuité de ces travaux de vérifier la robustesse du modèle proposé dans le Chapitre 3 et de l'adapter à des niveaux d'échelle plus petits. De nouvelles expériences ont été conduites, et les premiers résultats suggèrent qu'un modèle sous la forme suivante pourrait émerger :

$$\mu_T = q \times \left(\frac{\sigma_A}{\mu_A} \right)^{f(s)} \tag{5.2}$$

où f(s) est une fonction dépendant de l'échelle. D'après les travaux de [Chapuis and Dragicevic, 2011], on sait aussi supposer que l'échelle motrice (le geste que l'utilisateur doit effectuer pour acquérir la cible) et l'échelle visuelle (ce que l'utilisateur voit à l'écran) jouent un rôle sur les performances globales.

En se basant sur ce modèle, il conviendrait dans un second temps de déduire des métriques proches de l'Indice de Difficulté (ID) et l'Indice de Performance (IP) afin d'évaluer les tâches de pointage à de petits niveaux d'échelle.

5.3 Vers une nouvelle approche

Au cours des travaux présentés dans les chapitres précédents, nous nous sommes basés sur un axe théorique. Dans la seconde partie du manuscrit, nous avons opté pour un axe plus applicatif en nous intéressant directement à l'interaction sur les bijoux numériques, qui sont un exemple particulier des petits dispositifs miniaturisés de l'informatique mobile.

Tout d'abord, nous introduisons dans le Chapitre 6 la notion de "bijou numérique" avec ses caractéristiques et propriétés intéressantes. Nous caractérisons ensuite l'interaction gestuelle sur ces dispositifs (Chapitre 7), puis présentons WatchIt (Chapitre 8), un nouveau concept d'interaction sur montres et bracelets.

© 2013 TELECOM ParisTech

© 2013 TELECOM ParisTech

Deuxième partie

Bijoux numériques

Chapitre 6

Introduction aux bijoux numériques

SOMMAIRE

6.1 BIJOUX CLASSIQUES 74
6.1.1 Fonctions des bijoux 74
6.1.2 Localisation des bijoux 75
6.1.3 Propriétés 75
6.2 PRÉSENTATION DU DOMAINE 76
6.2.1 Informatique mobile 77
6.2.2 Informatique portée (wearable computing) 77
6.2.3 Bijoux numériques 78

Nous présenterons d'abord les bijoux "classiques" et leurs propriétés, puis nous situerons les bijoux numériques dans le cadre de l'informatique mobile, avec ses contraintes propres.

6.1 Bijoux classiques

Les bijoux peuvent prendre de nombreuses formes. Ils peuvent être placés partout sur le corps de leur porteur dont :

- La tête, avec les diadèmes, épingles à cheveux, boucles d'oreilles.
- Le cou, avec les colliers, chaînes et pendentifs.
- Le torse, avec les badges, broches, épingles de cravate
- Le poignet, avec les bracelets, les montres, les boutons de manchette.
- Les doigts, avec les bagues et anneaux.
- La cheville, avec certains bracelets.
- À n'importe quel endroit du corps, avec les piercings.

6.1.1 Fonctions des bijoux

Les bijoux ont de multiples fonctions. De par leur conception en matériaux rares, les bijoux ont servi à attester d'une certaine *richesse*. Ils peuvent aussi servir à montrer un *statut social* : l'alliance placée sur le doigt par exemple sert à indiquer que son porteur est marié. De par leur transmission au sein d'une famille, les bijoux acquierent aussi une fonction *sentimentale*.

Les bijoux permettent aussi d'affirmer une appartenance à une communauté notamment religieuse, comme un pendentif en forme de croix (Figure 6.1).



FIGURE 6.1 – Exemple de bijou permettant d'affirmer son appartenance à une communauté religieuse : un pendentif en forme de croix.

© 2013 TELECOM ParisTech

Enfin, certains bijoux ont une fonction **utilitaire**, comme par exemple des bagues portant un sceau servant à cacheter des lettres, ou une montre qui indique l'heure.

6.1.2 Localisation des bijoux

Dans la littérature IHM, les bijoux considérés se concentrent sur les boucles d'oreille, les colliers, les broches, les bracelets, les montres, les anneaux et les bagues. Ce sont aussi ces bijoux qui possèdent le plus de propriétés intéressantes en termes d'accessibilité et visibilité, comme nous allons le voir dans la section suivante.

Localisation	Bijou
Lobe de l'oreille	Boucles d'oreille
Cou, haut du torse	Colliers, broches
Poignet	Bracelets, montres
Doigt	Anneau
Cheville	Bracelets

TABLE 6.1 – Classification des bijoux selon leur localisation

Les bijoux se catégorisent essentiellement d'après leur localisation sur le corps (Tableau 6.1). Le tableau suggère que les bijoux les plus courants sont portés sur la partie supérieure du corps, à savoir la tête, le thorax, et le long du bras (doigt, poignet, et rarement le haut du bras).

6.1.3 Propriétés

En plus d'être présents en permanence sur l'utilisateur, les bijoux classiques ont des propriétés intéressantes pour l'interaction. Tout d'abord, ils sont facilement accessibles, et selon leur emplacement facilement visibles.

Accessibilité

Un bijou numérique doit être accessible pour la main. Il est très facile de toucher n'importe quelle partie de l'avant-bras ou la main avec l'autre main. Kim et al. [Kim *et al.*, 2010] ont montré que les utilisateurs apprécient l'utilisation d'une montre-bracelet pour commander un appareil audio portable (cf. Figure 6.2). Ashbrook et al. [Ashbrook *et al.*, 2008b] ont rapporté que le temps d'accès est plus court sur le poignet par rapport à la hanche et la poche, quel que soit le contexte de mobilité (debout ou en marchant).

© 2013 TELECOM ParisTech

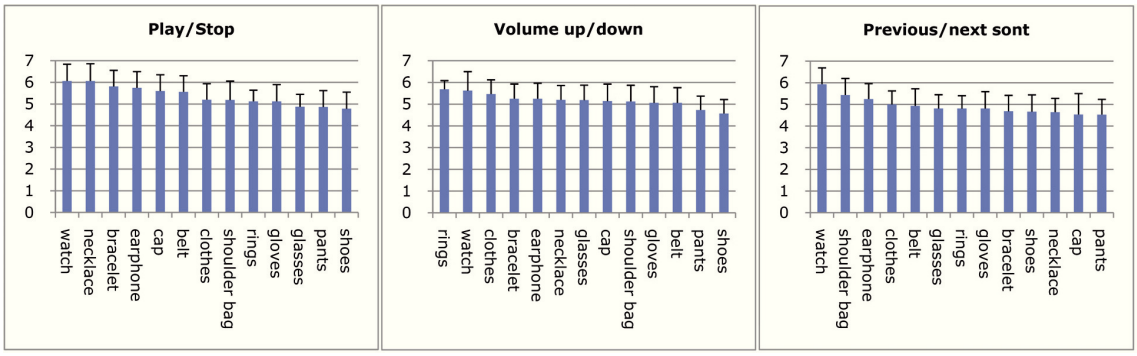


FIGURE 6.2 – Préférences subjectives des utilisateurs pour le placement des différentes commandes d'un baladeur.

Visibilité

Harrison et al. [Harrison *et al.*, 2009] ont étudié le temps qu'il faut pour détecter un message, puis accéder à un dispositif porté sur sept différentes parties du corps, de l'épaule au pied. Leurs participants ont eu à réagir à des stimuli visuels présentés sur chaque emplacement testé. L'expérience requiert que les participants agissent normalement, comme dans la vie quotidienne. Leurs résultats suggèrent que les meilleurs emplacements sont le poignet, suivi de près par la partie supérieure du bras. La chaussure était le pire choix (cf. Figure 6.3).

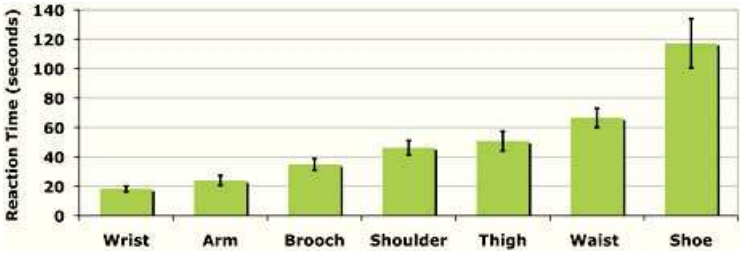


FIGURE 6.3 – Temps de réaction moyen pour détecter l'allumage d'une diode selon la localisation du dispositif. Extrait d'(Harrison et al., 2009).

6.2 Présentation du domaine

La joaillerie numérique est un sous-domaine de l'informatique portée (wearable computing), lui-même un sous-domaine de l'informatique mobile.

© 2013 TELECOM ParisTech

6.2.1 Informatique mobile

D'après [Forman and Zahorjan, 1994], l'informatique mobile désigne l'utilisation d'un ordinateur portable [7] possédant des capacités de communication sans fil. Ce type de dispositif est facilement transportable et peut donc être utilisé dans des situations de mobilité. Les usages de ces dispositifs ne sont donc pas les mêmes que ceux d'un ordinateur de bureau classique [Beaudouin-lafon, 2000]. Un des soucis majeurs est la consommation électrique. D'un point de vue IHM, la faible taille rend l'interaction plus difficile et limitée que sur un ordinateur standard : les écrans disponibles sont plus petits et limitent donc les capacités d'affichage, mais aussi l'interaction en entrée, avec le "fat finger problem" [Vogel and Baudisch, 2007].



FIGURE 6.4 – Exemple de dispositif mobile : un Palm Pilot. Ce type de PDA est apparu dans le courant des années 1990.

6.2.2 Informatique portée (wearable computing)

L'informatique portée est un sous domaine de l'informatique mobile dont elle partage les contraintes d'énergie et de faible taille. Ce terme désigne spécifiquement des dispositifs qui sont portés directement sur l'utilisateur sur/sous ses vêtements ou directement sur sa peau. D'après Steve Mann, "un ordinateur porté est un ordinateur présent directement dans l'espace personnel de l'utilisateur, contrôlé par lui et qui est toujours allumé et toujours accessible. En outre, c'est un dispositif qui est toujours avec l'utilisateur, de sorte que ce dernier peut toujours entrer des com-

7. Ce terme est utilisé ici au sens large et peut donc aussi désigner tout système interactif portable, comme un PDA (Figure 6.4), un smartphone, ou un bijou interactif

© 2013 TELECOM ParisTech

mandes et les exécuter, que ce soit en marchant ou en effectuant d'autres activités" [Mann, 2013].

Cette définition met en avant le fait que ces dispositifs sont toujours allumés et accessibles, ce qui n'est pas forcément le cas d'un dispositif de l'informatique mobile comme un netbook ou un ordinateur portable. En outre, ils sont personnels et ne sont normalement utilisables que par leur porteur.

En plus des bijoux numériques, ce domaine comprend aussi les vêtements interactifs, les lunettes augmentées.

6.2.3 Bijoux numériques

Un bijou numérique est un bijou standard qui a été augmenté avec des capteurs qui permettent de rendre le bijou interactif. Les bijoux numériques sont un cas particulier de l'informatique portée, dont ils conservent les propriétés (toujours allumés et accessibles). Ils ont en outre la particularité d'avoir une taille forcément réduite, puisqu'ils sont limités à la taille d'un bijou classique. Cette contrainte entraîne aussi des problèmes esthétiques, dans la mesure où un bijou même augmenté doit être agréable à regarder.

En termes d'interaction, les bijoux numériques sont généralement dépourvus d'écran ou proposent un écran de très petite taille —traditionnellement moins d'1,5 pouce de diagonale—, ce qui limite la transmission d'informations. En outre, leur taille encore plus petite rend l'interaction plus compliquée à mettre en place et généralement moins riche. En contrepartie, ils bénéficient de propriétés intéressantes du fait de leur placement sur le corps humain.

© 2013 TELECOM ParisTech

© 2013 TELECOM ParisTech

© 2013 TELECOM ParisTech

Chapitre 7

Vers un un espace de caractérisation de l'interaction sur bijoux numériques

SOMMAIRE

7.1 ENQUÊTE 83
7.1.1 Démographie 83
7.1.2 Connaissance et intérêt pour les bijoux numériques 84
7.1.3 Habitudes de port de bijoux classiques 84
7.1.4 Tâches 86
7.2 PRÉSENTATION DE L'ESPACE DE CARACTÉRISATION 92
7.3 MODALITÉS NON GESTUELLE 93
7.3.1 Modalité vocale 93
7.3.2 Modalité passive 95
7.4 MODALITÉ GESTUELLE 95
7.4.1 Matériel pour l'interaction gestuelle 96
7.4.2 Le dispositif comme référentiel d'interaction 99
7.4.3 Le dispositif se déplace dans un autre référentiel 101
7.4.4 Résumé sur l'interaction gestuelle 102
7.5 MODALITÉS DE SORTIE 102
7.5.1 Modalité visuelle 102
7.5.2 Modalité audio 104
7.5.3 Modalité tactile 106
7.5.4 Dispositifs déportés 107
7.5.5 Conclusion sur les sorties 108
7.6 VUE D'ENSEMBLE DE L'INTERACTION 108
7.6.1 Boucles d'oreilles 108
7.6.2 Pendentifs, colliers 108
7.6.3 Broches 109

7.6.4 Bracelets, montres 109
7.6.5 Anneaux, bagues 109

© 2013 TELECOM ParisTech

Afin de développer de nouvelles techniques d'interaction pour bijoux numériques, nous souhaitions tout d'abord obtenir plusieurs types d'informations, à savoir la vision du domaine de potentiels utilisateurs, en connaissant par exemple leurs habitudes de port de bijoux, leur intérêt pour les bijoux numériques, et enfin les potentielles tâches qu'ils souhaiteraient faire. Dans un second temps, nous avons classifié la littérature existante en classant l'interaction par modalités.

7.1 Enquête

En travail préliminaire, nous avons mis au point un questionnaire en ligne (par le biais de Google Docs) afin d'obtenir des informations sur trois sujets :

1. Les fréquences de ports de bijoux "classiques",
2. L'intérêt d'un public technophile pour les bijoux numériques,
3. Les tâches jugées les plus intéressantes et susceptibles d'être pratiquées sur ces dispositifs.

7.1.1 Démographie

Le questionnaire a été mis en ligne et envoyé par le biais de réseaux sociaux (Facebook, Twitter, forums), ou directement par courrier électronique aux amis immédiats du doctorant et leurs proches. 68 personnes ont répondu à l'enquête, soit 30 hommes et 38 femmes, âgés de 19 à 52 ans, avec un âge médian de 25 ans (+/- 5 ans). L'enquête concerne donc un public assez jeune, et du fait de son mode de diffusion, plutôt technophile. Parmi les répondants, 33 personnes possèdent un téléphone dit intelligent (de type iPhone ou Android), 33 autres un téléphone plus "classique", et 2 aucun des deux.

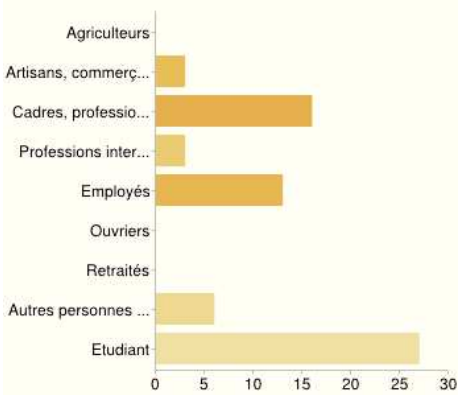


FIGURE 7.1 – Répartition des réponses à l'enquête, par catégories socioprofessionnelles

La Figure 7.1 montre une surreprésentation des étudiants (40% contre 8,4% en 2010 [INSEE, 2013]) et des cadres (24% contre 9% en 2010 [INSEE, 2013]). La taille de l'échantillon et cette

© 2013 TELECOM ParisTech

surreprésentation font que les résultats de notre enquête ne pourront donner que des tendances globales.

7.1.2 Connaissance et intérêt pour les bijoux numériques

La notion de "bijou numérique" reste à l'heure actuelle plutôt cantonnée au monde de la recherche et peu connue du grand public. Comme en atteste la Figure 7.2, malgré le profil technophile de l'échantillon, 48 personnes (71%) ne connaissaient pas l'existence des bijoux numériques. Enfin, parmi les 20 personnes qui connaissaient, seuls 3 en possèdent un.

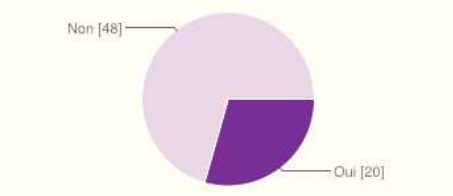


FIGURE 7.2 – Familiarité des répondants avec la notion de "bijou numérique"

Après une présentation du concept, 60% des personnes interrogées semblaient intéressées par l'utilisation quotidienne d'un bijou numérique comme en atteste la Figure 7.3. La proportion de personnes intéressées monte même à 74% chez ceux et celles portant au moins un bijou "classique" au quotidien.

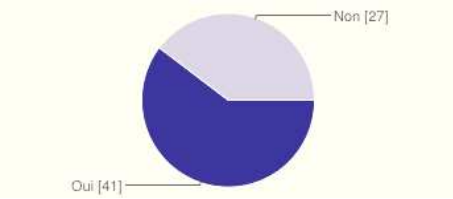


FIGURE 7.3 – Intérêt manifesté pour les bijoux numériques

Les résultats concernant les habitudes de port de bijoux et les tâches souhaitables seront détaillées dans les sections suivantes.

7.1.3 Habitudes de port de bijoux classiques

Ci-dessous nous allons d'abord préciser les sortes de bijoux que nous considérerons, puis nous présenteront ensuite leur contexte d'utilisation ainsi que les tâches qui peuvent être attendus pour être réalisable avec eux.

Les bijoux peuvent être portés sur un certain nombre d'endroits du corps. Les bijoux les plus communs sont les anneaux, bracelets, broches, pendentifs, colliers, et boucles d'oreilles. D'autres,

© 2013 TELECOM ParisTech

tels piercings, bandeaux, épingles de cravate et boutons de manchettes. La liste n'est pas exhaustive, et nous allons nous concentrer sur les catégories principales.

79% des sondés ont déclaré porter au moins un bijou quotidiennement. La Figure 7.4 illustre la fréquence du port d'un bijou en divers endroits du corps. La différence entre les deux sexes est marquée, le bijou étant nettement plus souvent de mise chez les femmes. Les bijoux d'oreilles, très populaires chez celles-ci, n'ont été presque jamais mentionnés par les hommes. Quel que soit le sexe, observons que les bijoux utilisés sont typiquement en contact direct avec la peau, et presque jamais fixés aux vêtements.

Le pourcentage de sondés déclarant avoir le poignet occupé de manière quotidienne était de 60% chez les femmes (une montre ou un bracelet) et de 39% chez les hommes (typiquement une montre). Les chiffres correspondants étaient de 53% vs. 32% pour le doigt et de 40% vs. 29% pour le cou. Si l'on laisse de côté le cas unique de la boucle d'oreille, une vieille tradition féminine dans nos cultures, les résultats sont compatibles avec l'idée que les préférences vont vers les bijoux qui se fixent sans percement. Notons qu'une caractéristique commune aux divers bijoux portés au doigt, au poignet et au cou est leur topologie torique : un peu d'élasticité, ou un mécanisme de fermeture, permet une fixation par encerclement aisément réversible.

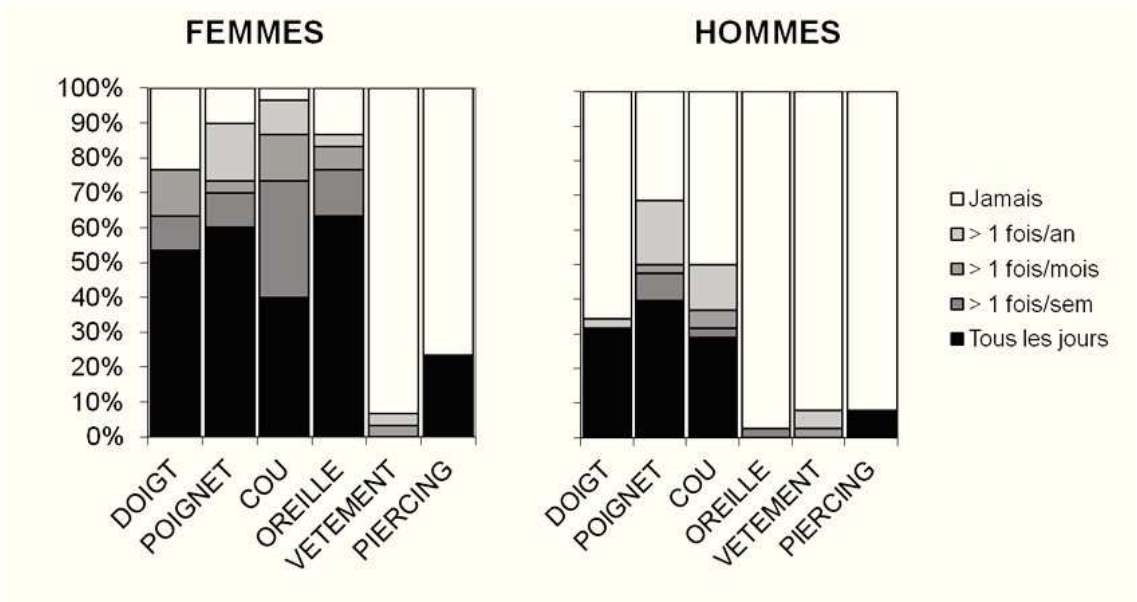


FIGURE 7.4 – Fréquence de port de bijoux classiques selon le sexe

© 2013 TELECOM ParisTech

7.1.4 Tâches

Les petits dispositifs mobiles, de par leur taille, ne permettent pas d'effectuer les mêmes tâches qu'un ordinateur. Toutefois, et comme l'ont fait remarqué certains sondés, un bijou numérique peut potentiellement être en redondance avec un smartphone en permettant de faire exactement les mêmes tâches. Ce motif a été évoqué pour rejeter l'utilisation d'un bijou numérique, puisque le bijou était perçu comme un remplacement plus limité du smartphone. Il est aussi possible de voir les choses selon un autre point de vue : le dispositif (un bijou dans ce contexte) peut devenir un compagnon du smartphone, et permettre de réaliser certaines tâches de manière plus rapide et précise. L'intérêt étant ici de ne plus avoir besoin de sortir le téléphone de sa poche ou son sac, et pouvoir faire des actions courantes rapidement. Ce genre d'interactions ponctuelles et rapides (d'une durée maximale de 4 secondes) sont définies par Ashbrook [Ashbrook, 2010] commes des "micro-interactions" comme nous l'avons vu précédemment.

Tâches élémentaires

Dans le cas d'un scénario d'utilisation du dispositif par un utilisateur (ou tâche de haut niveau), il est possible de diviser ledit scénario en un ensemble de sous-tâches.. La taxonomie de Foley [Foley *et al.*, 1984] distingue six catégories élémentaires de tâches.

Sélection Une sélection de commande, par exemple, la "chanson suivante", ou "jouer". Cette action discrète peut être effectuée vocalement ou par des gestes (appuyer sur le bouton, ou l'écran tactile).

Position L'utilisateur spécifie la position d'un point. Ceci permet par exemple de placer un objet graphique ou indiquer une position sur un plan.

Orientation L'utilisateur spécifie une une orientation en indiquant un point de départ et un point d'arrivée. L'information obtenue est l'angle entre ces deux points. Les Marking Menus [Kurtenbach and Buxton, 1991] (illustrés en Figure 7.5) sont une très bonne illustration de cette tâche : l'utilisateur désigne un chemin dans l'espace de l'application et selon l'angle choisi, une commande est choisie.

Chemin Un chemin est la composition d'une position et d'une orientation sur une période de temps donnée.

Quantification Quantifier une valeur implique généralement le déplacement d'un curseur (position ou d'une tâche d'orientation), ou de taper un nombre (entrée de texte).

© 2013 TELECOM ParisTech

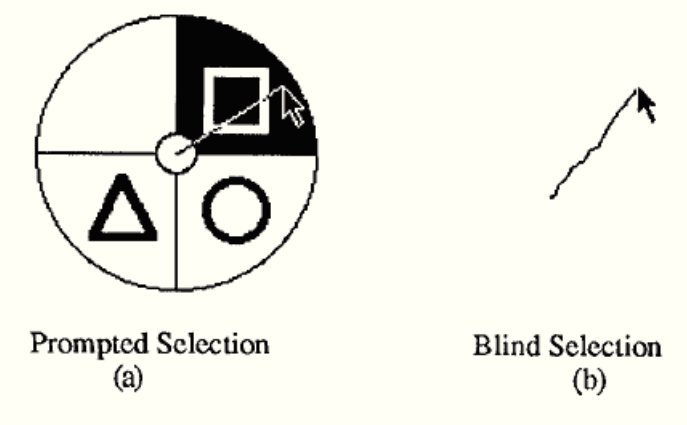


FIGURE 7.5 – Les Marking Menus par (Kurtenbach and Buxton, 1991). Si l'utilisateur maintient le bouton de la souris enfoncé, les différentes commandes sur menu circulaire apparaissent (a), il peut aussi directement tracer le chemin pour sélectionner la commande sans regarder le menu (b).

Texte Cette tâche est le principal problème des bijoux numériques. Une solution retenue sur les produits commerciaux (comme les montres VEA [VEADigital, 2013] en Figure 7.6) est l'utilisation d'un clavier virtuel qui occupe la majorité de l'espace de l'écran. Comme nous l'avons dit, nous n'imaginons pas les utilisateurs taper de longs textes sur un bijou. Taper rapidement quelques mots est toutefois envisageable (SMS, tweets). La reconnaissance vocale peut aussi aider.



FIGURE 7.6 – Exemple de clavier virtuel sur une montre téléphone : plus de 80% de l'espace visuel est occupé pour l'entrée de texte.

Nous voyons que toutes les tâches possibles sur un smartphone ne sont certainement pas adaptables sur bijoux numériques. Les limitations principales sont l'entrée de texte et la visualisation d'informations. Les autres tâches de la taxonomie de Foley [Foley *et al.*, 1984] sont toutes faisables, mais l'espace visuel restreint autorisé sur les bijoux numériques est une limitation considérable. En effet, la petite taille et le "fat finger problem" [Vogel and Baudisch, 2007] vont borner la précision maximale en particulier pour les tâches de position (et donc de chemin) et de quantification. Ceci

© 2013 TELECOM ParisTech

aura un impact sur la complexité maximale des tâches de haut niveau qu'il sera possible d'effectuer.

Tâches de haut niveau

S'agissant des tâches qui, dans un contexte de mobilité, pourraient être réalisées demain avec des bijoux numériques, nous avons proposé un ensemble de 16 scénarios, chacun d'eux devant être noté de 1 (sans intérêt) à 5 (très intéressant), sans considérations de faisabilité. Notre but étant d'identifier les tâches qui semblent les plus intéressantes pour les utilisateurs.

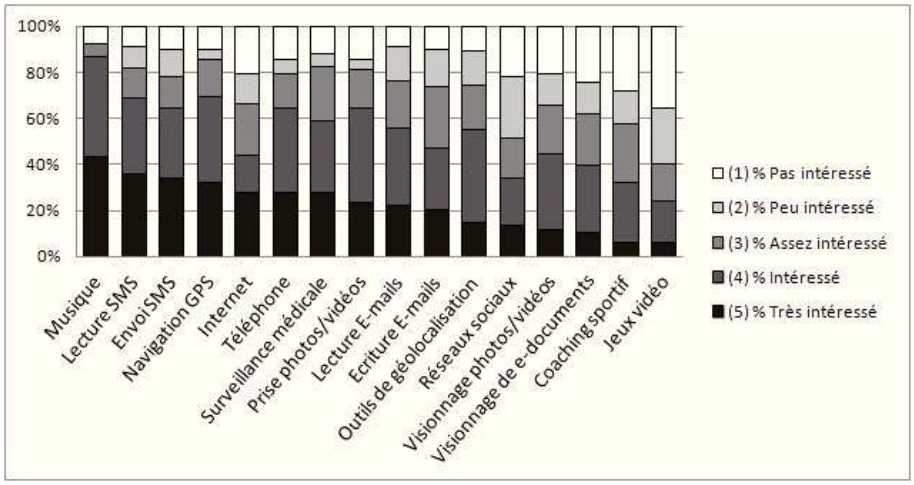


FIGURE 7.7 – Liste de tâches, classées par intérêt manifesté par les utilisateurs

La Figure 7.7 présente les différents scénarios suggérés aux sondés. Ils sont classés par intérêt décroissant. Il est important de noter qu'il était demandé aux sondés **leur intérêt pour la tâche, sans juger de la faisabilité de celle-ci**. Enfin, contrairement aux habitudes de port, le sexe n'est pas un facteur déterminant pour l'intéret des tâches (pas de différences significatives entre hommes et femmes).

Lecture de musique Cette tâche, qui ne nécessite aucun retour visuel, qui pourrait être fait avec pratiquement n'importe quel appareil, aussi longtemps que l'appareil est connecté à un écouteur avec ou sans fil (oreillette). Mais des techniques d'entrée sont nécessaires pour les commandes principales : lecture, pause, ou suivant/précédent. En ce qui concerne les fonctionnalités les plus évolués, cela nécessite un grand nombre de commandes détaillées sur le Tableau 7.1. Cette tâche est aussi une tâche populaire dans la littérature, puisqu'elle l'une des applications la plus présentées notamment dans [Ni and Baudisch, 2009] [Harrison and Hudson, 2009] [Schwarz *et al.*, 2010] [Kim *et al.*, 2010]. En termes d'intérêt, cette tâche se trouve être jugée la plus intéressante par les utilisateurs (avec 86% des utilisateurs la trouvant "très intéressante" ou "intéressante").

© 2013 TELECOM ParisTech

SMS et e-mails Ces tâches sont relativement similaires tant en termes d'interface que d'interaction. D'un côté, l'édition de texte est un problème particulièrement délicat pour les bijoux numériques, en raison de l'absence d'un clavier physique, d'autres techniques de saisie de texte [Wobbrock *et al.*, 2003] sont nécessaires pour remédier à ce problème. La localisation des bijoux numériques pourrait ici favoriser la reconnaissance vocale. En ce qui concerne la consultation, l'espace de l'écran quoique limité permet tout de même d'afficher de courts messages. Même s'il n'est pas confortable d'afficher de trop longues listes de messages à l'écran, il est possible de fournir des commandes discrètes minimales (comme le passage au message suivant/précédent). Les répondants à notre enquête ont jugé la consultation et la rédaction de SMS intéressante à environ 65%, contre 53,5% pour les e-mails.

Appels téléphoniques Plusieurs modèles de montres-téléphone existent actuellement sur le marché [VEADigital, 2013] [I'mWatch, 2013], ce genre de scénario implique peu de retour visuel (informations sur l'appelant et éventuellement durée de l'appel), et un minimum de commande (décrocher, raccrocher et gestion du volume). Pour de l'interaction plus complexe, par exemple avec un serveur vocal comme le répondeur, le problème se rapproche beaucoup de l'entrée de texte : il faudra permettre à l'utilisateur d'entrer les symboles du clavier classique (à savoir les 10 chiffres, les symboles * et #). Près de 2 utilisateurs sur 3 (65%) ont jugé la tâche intéressante ou très intéressante.

Navigation GPS et Outils de géolocalisation La navigation GPS consiste à choisir une destination, à visualiser une carte, et guider l'utilisateur par des instructions. Le guidage peut se fonder sur la sortie audio, de même que l'indication de destination : Siri, disponible sur les derniers iPhone, permet d'utiliser du langage naturel pour indiquer un lieu ou une adresse et obtenir un itinéraire. la navigation de carte semble plus compliquée. Halo [Baudisch and Rosenholtz, 2003] (Figure 7.8) permet d'indiquer les directions et distances (par des cercles) de point d'intérêt sur des écrans de taille réduite. Avec CycloStar [Malacria *et al.*, 2010] il est possible de se déplacer et zoomer sur une carte en effectuant des gestes elliptiques de faible amplitude. La navigation GPS semble fortement intéresser nos sondés (69% d'avis favorables).

Surveillance de la santé Les bijoux numériques étant porté sur l'utilisateur lui-même, cela rend aisée la surveillance de signaux physiologiques, comme la température du corps, le rythme cardiaque, aussi longtemps que les dispositifs portés incorporent le capteur adéquat. Le contact avec la peau est ici un avantage.

Prise de photos et de vidéos Une petite caméra peut être facilement intégrée sur les bijoux. Un bon emplacement serait sur une montre ou un collier. Pour activer la prise de photo ou l'enregistrement, il suffit d'un bouton physique, avec éventuellement une diode pour indiquer que la caméra fonctionne. La prévisualisation sur un écran (d'une montre) par exemple est un plus. Cette tâche

© 2013 TELECOM ParisTech

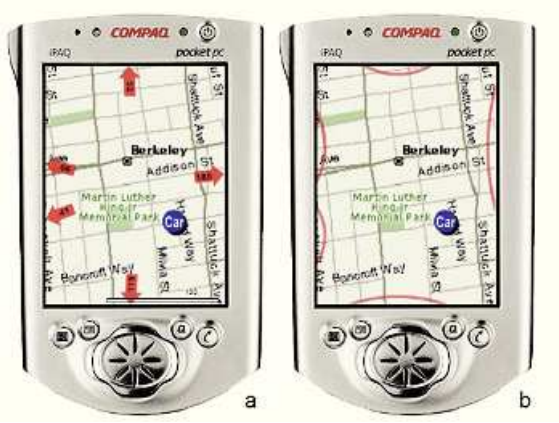


FIGURE 7.8 – Halo permet d'indiquer la direction et distance de points d'intêrets même en dehors de l'écran.

est donc parfaitement faisable sur un bijou numérique et a d'ailleurs été jugée intéressante par près de 65% des répondants.

Surf sur Internet, Consultation de documents Ce type de tâche implique l'affichage d'un très grand nombre d'informations, et, à l'image des jeux vidéos présentés ci-dessous, cela ne pourra se faire qu'avec des techniques basées sur la projection ou l'utilisation de périphériques déportés. Des applications dédiées, comme sur l'iPhone, doivent être mise au point pour obtenir une optimisation en termes d'affichage d'informations pour une utilisation minimale dans un contexte défavorable (de mobilité où la projection et l'utilisation d'un périphérique déporté sont difficiles). Mais l'expérience de navigation pourrait ne jamais être comparable à celle d'une tablette ou d'un smartphone. Ce type de tâche n'est toutefois pas une priorité d'après notre enquête avec seulement 40% d'avis favorables.

Jeux vidéo La plupart des jeux vidéo nécessitent un écran et un grand ensemble de commandes d'entrée. L'utilisation de périphériques déportés ou d'un projecteur (présentés en Sections 7.5.1 et 7.5.4) est indispensable. À l'image de la Wiimote ou du Kinect où l'utilisateur devient la manette de jeu, l'utilisation de capteurs embarqués dans un bracelet pourrait se révéler efficace. Ces difficultés de mise en place ont sans doute influencé les répondants qui ne sont que moins de 1 sur 4 (23%) à plébisciter cette utilisation.

Afin de faciliter le développement de nouvelles techniques d'interaction pour bijoux numériques, il est important d'identifier le nombre de commandes qui seront nécessaires pour les tâches les plus demandées par les utilisateurs.

A noter que la plupart des sous-tâches nécessitant un contrôle continu peuvent aussi être effectuées par l'utilisation de deux commandes discrètes (par exemple la gestion de volume peut se

© 2013 TELECOM ParisTech

faire avec une commande "Augmenter le volume" et "Diminuer le volume" qui changent la valeur de volume d'une valeur prédéfinie). Cette substitution peut s'avérer très pratique mais rallonge l'interaction et peut s'avérer potentiellement limitée pour un contrôle fin et précis. Si l'on se réfère au Tableau 7.1, la tâche la plus complexe est l'écoute de musique, qui nécessite 6 commandes discrètes plus 2 continues (ou donc 10 commandes discrètes). Si l'on ajoute les commandes de navigation dans une liste, cela fait un total de 7 commandes discrètes et 3 continues (ou 13 commandes discrètes). D'un autre côté, la navigation GPS demande jusque 4 contrôles continus, dont 1 en deux dimensions.

Tâche	Sous-tâches	Nombre total de commandes (discrètes et continues)
Musique	Lecture/Pause, Précédent, Suivant, Avance et Retour rapide, Répétition, Volume +/-, Navigation dans la liste de lecture	6 discrètes, 2 continues + Navigation dans une liste*
Lecture SMS	Ouverture message, Fermeture message, Message suivant, Message précdent	4 discrètes
Navigation GPS	Choix de destination, Zoom avant/arrière, Pan 2 dimensions, Volume +/- (si guidage audio), Changement de mode (instructions/carte)	1 discrète, 3 continues + Entrée de texte/Navigation dans une liste*
Envoi SMS	Choix du destinataire, Saisie du message	Entrée de texte/Navigation dans une liste*
Appel téléphonique	Choix du contact, Composition de numéro, Volume +/-, Décrocher, Raccrocher, Mode main-libres	3 discrètes, 1 continue + Entrée de texte/Navigation dans une liste*
*** L'entrée de texte et la navigation dans une liste sont des sous-tâches communes à beaucoup de tâches ci-dessus**		
Entrée de texte	Saisie des différents caractères (lettres, chiffres, symboles), passage majuscule	De 12 commandes discrètes (saisie de numéro) à plusieurs centaines
Navigation de liste	Pan vertical, sélection d'un objet, annulation	2 discrètes, 1 continue

TABLE 7.1 – Décomposition de tâches en sous-tâches et décompte du nombre de commandes nécessaires.

Conclusion sur les tâches

Notre étude des tâches a mis en avant le fait que toutes les tâches faisables sur smartphone ne sont pas directement transposables sur bijoux numériques, les deux principales limitations étant l'entrée de texte et la faible surface disponible pour l'affichage d'informations. Nous avons déterminé en décomposant ces différents scénarios le nombre et le type de contrôles dont l'utilisateur

© 2013 TELECOM ParisTech

aura besoin pour interagir avec le système. Afin de parer à la majorité des besoins, nous recommandons qu'une technique d'interaction propose au moins une dizaine de commandes discrètes, et si possible le contrôle de deux ou trois paramètres continus (comme le volume, la navigation dans une liste etc...). Dans les cas où la technique développée manque de commandes, il faudra alors se concentrer sur les fonctionnalités essentielles. Par exemple dans le cas de la lecture de musique, la navigation dans une longue liste n'est pas forcément obligatoire et peut être remplacée par deux simples commandes discrètes de type suivant/précédent.

Enfin, il est tout à fait envisageable de ne pas effectuer l'intégralité des tâches sur bijoux numériques, et de commencer certaines sur d'autres dispositifs comme un smartphone ou un ordinateur. Dans le cas de navigation GPS par exemple, l'utilisateur pourrait exporter les points d'intérêts et lieux qu'il souhaite visiter, sans avoir à les chercher de nouveau sur sa montre interactive.

L'analyse des tâches que nous avons menée ici a montré que les tâches jugées les plus intéressantes sont faisables sur bijoux numériques comme par exemple l'écoute de musique, la gestion des SMS et les appels téléphoniques.

7.2 Présentation de l'espace de caractérisation

Les petits appareils embarqués peuvent être considérés comme une nouvelle étape dans la frénésie de la miniaturisation. Cela a commencé avec le PC dans les années 80 avec les ordinateurs portables et les PDA dans les années 90. Au cours de la dernière décennie, un nouveau champ est apparu, l'informatique vestimentaire (ou wearable computing), qui s'appuie sur le fait que les dispositifs actuels peuvent être assez petits pour être porté par les utilisateurs sur leurs vêtements ou sur leur peau. Nous nous concentrons ici sur les bijoux numériques interactifs [Miner, 2001], qui sont constitués de capteurs embarqués dans les bijoux, tels que des bagues, des colliers ou des bracelets.

En comparaison avec d'autres types d'appareils mobiles tels que les smartphones, les bijoux numériques interactifs présentent des caractéristiques intéressantes. Le fait qu'ils soient fixés en permanence sur le corps les rend disponibles en permanence et facile à atteindre avec la main. Leur taille les rend à peine perceptible, un avantage intéressant en ce qui concerne l'acceptabilité sociale. Mais la miniaturisation pose des problèmes difficiles quand il s'agit de l'interaction.

Les très petits dispositifs ne permettent pas d'embarquer un clavier, peut-être même pas un bouton physique. Si un écran tactile est disponible, comme sur la montre-bracelet IBM [Narayanaswami *et al.*, 2002], sa diagonale ne peut généralement pas dépasser les 1.5 pouce (4 cm), ce qui implique des problèmes d'occultation du doigt et le "fat finger problem" qui rend le pointage im-

© 2013 TELECOM ParisTech

précis [Vogel and Baudisch, 2007]. Selon l'emplacement de l'appareil sur le corps de l'utilisateur, il peut être difficile pour les utilisateurs de les regarder ou pour détecter des vibrations. C'est pourquoi des techniques d'interaction spécialement dédiées à ces dispositifs doivent être développées.

La littérature IHM offre un certain nombre de taxonomies sur l'interaction avec les appareils mobiles [Roudaut and Lecolinet, 2007] [Malacria and Lecolinet, 2008] [Baglioni *et al.*, 2009], l'interaction gestuelle sur les dispositifs mobiles [Karam and Schraefel, 2005], les pico-projecteurs [Poirier *et al.*, 2010], les menus [Bailly *et al.*, 2007] ou le problème de la miniaturisation extrême, en mettant l'accent sur l'utilisation de capteurs toujours plus petits [Ni and Baudisch, 2009]. Nous allons évidemment exploiter ces travaux, mais nous nous concentrons spécifiquement sur les bijoux numériques interactifs.
Nous nous intéressons ensuite aux modalités d'interaction en entrée. Dans un premier temps, nous nous concentrerons sur l'interaction non gestuelle. La taille et la localisation d'un bijou numérique n'ayant pas d'impact fort sur l'interaction vocale ou passive, nous montrerons que l'interaction gestuelle est plus problématique sur bijoux numériques. Nous présenterons alors les cas possibles d'interaction gestuelle et terminerons par les modalités de sortie. L'espace de caractérisation est présenté en Figure 7.9.

7.3 Modalités non gestuelle

L'entrée sur les bijoux numériques est un défi. Nous présentons maintenant les différentes modalités qui peuvent être utilisées.

7.3.1 Modalité vocale

Les utilisateurs peuvent interagir vocalement avec des bijoux numériques tout comme avec les appareils mobiles. L'utilisateur peut soit dire des mots ou tout simplement produire des sons. Il y a beaucoup de logiciels de reconnaissance vocale disponible pour les ordinateurs, tels que Dragon Naturally Speaking. Le microphone, qui existe en version miniaturisée, est facile à intégrer dans un grand nombre de périphériques.

Interaction verbale

Cette sous-catégorie de l'entrée vocale comprend toutes les techniques de saisie où l'utilisateur dit des mots ou des phrases complètes pour interagir avec le système. Le "Put that there" de Bolt [Bolt, 1980] est un des exemples le plus ancien d'exploitation de la parole. La recherche vocale de Google, disponible sur les appareils mobiles, pourrait être utilisé sur les bijoux numériques aussi. Plus récemment, la technologie Siri d'Apple permet d'interagir en langage naturel avec un smartphone. L'avantage de ces technologies est que le traitement du flux vocal enregistré est traité sur

© 2013 TELECOM ParisTech

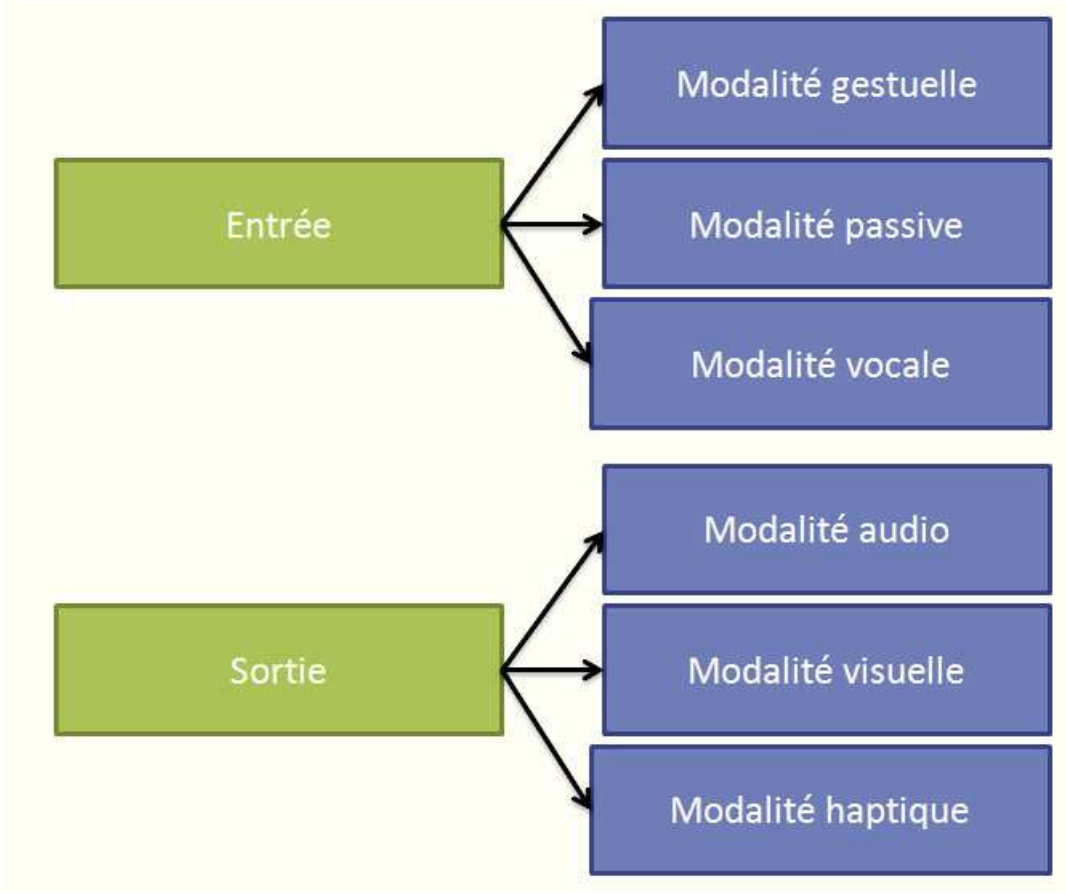


FIGURE 7.9 – Présentation de l'espace de caractérisation.

un serveur distant, ce qui limite les besoins en termes de capacité de calcul.

Interaction non-verbale

Shazam permet par exemple de trouver le titre d'une chanson qui est jouée en approchant son téléphone de la source sonore. Certains jeux Nintendo DS demandent à l'utilisateur de souffler dans le microphone pour déplacer des éléments. Il existe aussi des techniques d'interaction basées sur les grattements sur des surfaces irrégulières comme Stane [Murray-Smith *et al.*, 2008] ou Scratch Input [Harrison and Hudson, 2008].

Le bruit ambiant est le principal problème avec cette modalité. Ce n'est pas notre principal intérêt de recherche dans cette thèse. En effet, la miniaturisation n'a pas d'incidence sur l'interaction vocale : les micros sont assez petits pour être intégrés sur n'importe quel appareil. D'un point de vue IHM, il n'y a pratiquement pas de différence significative entre l'utilisation d'un bijou et d'un téléphone pour l'interaction vocale. Il reste néanmoins des problèmes liés à la puissance de calcul qui font qu'il est actuellement difficile d'envisager de faire le traitement audio sur un bijou numé-

© 2013 TELECOM ParisTech

rique, il faudra donc utiliser les capacités de calcul d'un autre appareil, que ce soit un smartphone —ce qui implique que l'utilisateur doit donc en avoir un sur lui— ou un serveur distant —ce qui implique une connexion permanente ce qui n'est pas toujours possible—.

7.3.2 Modalité passive

Certaines techniques d'entrée impliquent d'autres sortes de modalités d'entrée, tels que les signaux physiologiques (rythme cardiaque, par exemple). Dans United-Pulse [Werner *et al.*, 2008], deux personnes sont couplées et l'une à l'autre et capables de ressentir les battements du coeur de l'autre grâce à un anneau. Le bracelet Hello [Ahde and Mikkonen, 2008] signale la proximité d'un ami. Les modalités biologiques impliquent que les capteurs adéquats soient placés directement en contact avec la partie du corps optimale, limitant le nombre de localisations et donc de bijoux compatibles.

Des applications dites *context-* et *location*-aware, comme AroundMe [AroundMe, 2013] permettent de trouver des points d'intérêts (restaurants, transports) grâce à la localisation de l'utilisateur. Une puce GPS (d'une taille de 2,8 x 2,9 mm) peut facilement être placée sur tout type de bijoux.

7.4 Modalité gestuelle

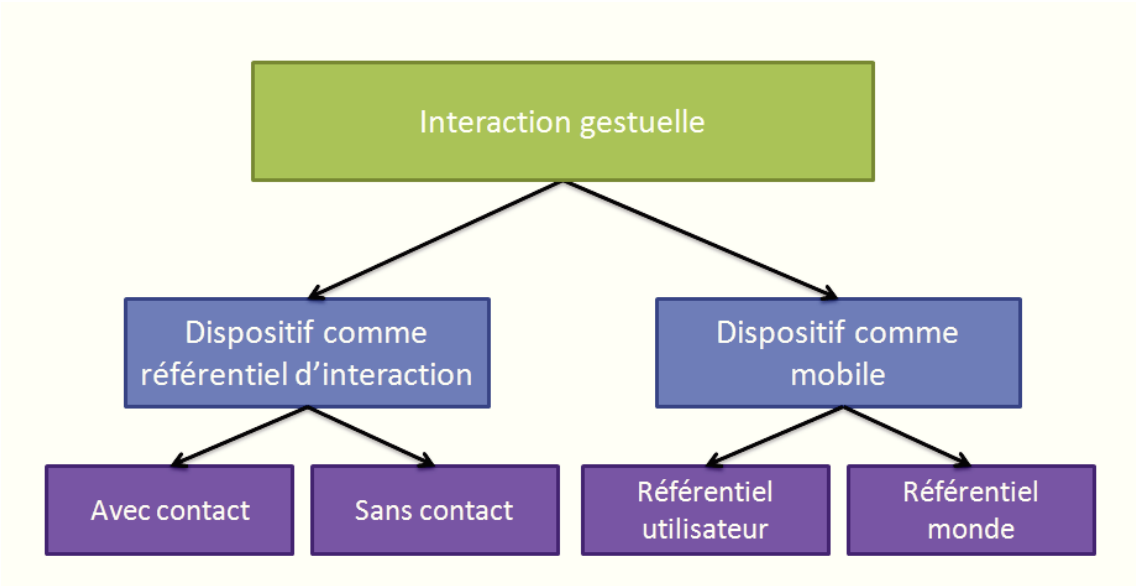


FIGURE 7.10 – Caractéristation de l'interaction gestuelle

© 2013 TELECOM ParisTech

L'interaction gestuelle est ensuite caractérisée selon que le dispositif sert de référentiel au mouvement ou qu'il est lui-même en mouvement. La Figure 7.10 résume cette caractérisation. Dans la mesure où nous considérons les modalités d'interaction, définies par Nigay [Nigay and Coutaz, 1996] comme un couple <Dispositif physique, Langage d'interaction>, nous commencerons par une présentation du matériel utilisé pour l'interaction gestuelle.

7.4.1 Matériel pour l'interaction gestuelle

Afin de capter des gestes, il existe un certain nombre de capteurs qui sont de plus en plus souvent intégrés dans les smartphones. Les progrès récents en termes de miniaturisation les rendent, pour la plupart, facilement intégrables même dans de très petits dispositifs, comme des bijoux numériques. Nous détaillons ci-dessous les différents capteurs.

Bouton physique Les boutons sont utilisés pour confirmer un choix ou une sélection. Sur les (anciens) téléphones mobiles, les boutons sont utilisés pour saisir du texte et des chiffres, mais, sauf pour certaines anciennes montres-calculatrice, leur nombre sur un bijou numérique ne peut être que restreint, faute de place. TiltText [Wigdor and Balakrishnan, 2003] (Figure 7.11) couple l'utilisation de boutons physiques à un accéléromètre pour la saisie de texte.

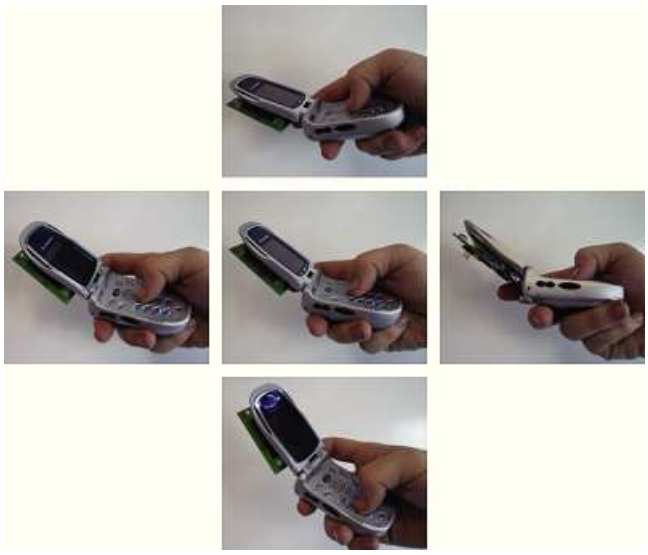


FIGURE 7.11 – Dans Tilttext (Wigdor and Balakrishnan, 2003), en appuyant sur une des touches du clavier l'utilisateur peut soit entrer un chiffre (position neutre), soit entrer une des lettres affichées sur la touche (inclinaison vers le haut, bas, gauche ou droite). L'inclinaison est détectée avec un accéléromètre.

Capteur de position Ce type de capteur peut détecter la position et éventuellement la pression du point de contact avec l'utilisateur. Un tel capteur peut être placé sur un écran, celui-ci devenant

© 2013 TELECOM ParisTech

à la fois une entrée et une sortie, conduisant parfois à une occultation, comme par exemple l'écran tactile de l'iPod Nano, qui prend en charge plusieurs points de contact (multitouch). Il existe de nombreux autres capteurs de position, à une ou deux dimensions, comme les potentiomètres que nous utilisons au Chapitre 8.

Caméra Une caméra peut être utilisée pour détecter le mouvement de l'utilisateur, ou des motifs. WristCam [Vardy *et al.*, 1999] utilise une caméra placée sur un bracelet et pointant vers la main de l'utilisateur et plus particulièrement ses doigts. L'utilisateur interagit alors en pliant ses doigts pour qu'ils soient visibles ou non par la caméra. En plaçant la caméra sur un pendentif, il est possible d'interagir à deux mains, comme dans Imaginary Interfaces [Gustafson *et al.*, 2010] (Figure 7.12), où la caméra détecte la main gauche qui forme un repère et la main droite qui dessine dans ce repère, ou [Hachet *et al.*, 2005]. Bailly et al. [Bailly *et al.*, 2012] proposent aussi de placer une caméra sur une chaussure pour capter des gestes de l'utilisateur en situation de mobilité. Une petite caméra peut avoir un diamètre de 4 mm [Ni and Baudisch, 2009].



FIGURE 7.12 – Dans Imaginary Interfaces (Gustafson et al, 2010), la main gauche sert de repère. Il est possible de dessiner et tracer des chemins dans ce repère avec la main droite.

Accéléromètre Ce capteur mesure l'accélération du corps sur lequel il est placé. En intégrant cette accélération, il est possible d'obtenir la vitesse, et donc de déterminer des translations. En outre, le capteur indique aussi le vecteur $\vec{g}$ de gravité ce qui rend possible la détection de l'inclinaison du dispositif si celui-ci n'est pas en translation. Des techniques telles que TimeTilt [Roudaut *et al.*, 2009a], ou TiltText [Wigdor and Balakrishnan, 2003] (Figure 7.11) détectent une inclinaison du dispositif respectivement, pour la navigation entre les applications et pour la saisie de texte. Une autre utilisation consiste à détecter un tap arrière sur le dispositif, comme on le voit dans TimeTilt

© 2013 TELECOM ParisTech

[Roudaut *et al.*, 2009a]. Les plus petits accéléromètres ont une taille de 3x3x1 mm.



FIGURE 7.13 – TimeTilt (Roudaut et al., 2009a)détecte l'inclinaison du téléphone pour basculer d'une application à l'autre.

Magnétomètre Ce dispositif est utilisé pour obtenir la force et la direction d'un champ magnétique. Il est principalement utilisé sur les smartphones comme boussole. Un autre usage possible est de le combiner avec un aimant : la direction de la partie du corps portant l'aimant peut être facilement calculée. Dans Nenya [Ashbrook *et al.*, 2011], il est utilisé pour obtenir la position et l'angle de rotation d'une bague sur un doigt. Une faiblesse des magnétomètres est leur temps de latence. La taille d'un magnétomètre est comparable à celle d'un accéléromètre.

Gyroscope Ce dispositif mesure de la vitesse angulaire du dispositif. Il est utilisé pour détecter des rotations et sont donc complémentaires de l'accéléromètre. Actual Remote Control [Lee *et al.*, 2009] et Interactive Bracelet [Wacharamanotham *et al.*, 2010] utilisent un gyroscope en plus des accéléromètres pour détecter les mouvements du bras. Rekimoto [Rekimoto, 1996] a le premier conçu des techniques d'inclinaison (tilt techniques) à l'aide de gyroscopes. Les gyroscopes souffrent toutefois d'un problème de dérive qu'il faut compenser en utilisant un accéléromètre ou un magnétomètre. Les plus petits gyroscopes peuvent atteindre les dimensions 5 x 3,2 x 1,3 mm.

Capteur infrarouge Habituellement, des capteurs infrarouges sont utilisés comme capteurs de proximité, comme dans GestureWatch [Kim *et al.*, 2007], SideSight [Butler *et al.*, 2008] et Hoverflow [Kratz and Rohs, 2009]. Mais l'infrarouge permet aussi de déterminer le déplacement des tendons fléchisseurs des doigts, donc le mouvement indépendant de chaque doigt, et reconnaître des schémas, comme l'ont montré Lim et al. [Lim *et al.*, 2010]. Les capteurs infrarouges sont aussi utilisés sur les tables multitouch pour détecter des points de contacts, ou sur des dispositifs comme le Vicon et la Wiimote.

L'interaction basée sur le mouvement peut être divisée en deux catégories, en utilisant le référentiel d'interaction comme critère : nous avons soit une partie du corps qui se déplace par rapport

© 2013 TELECOM ParisTech

au dispositif, ou l'appareil qui se déplace dans un autre référentiel, monde ou utilisateur.

7.4.2 Le dispositif comme référentiel d'interaction

Dans cette catégorie, nous incluons toutes les techniques d'entrée où l'utilisateur fait des gestes sur ou autour de l'appareil avec sa main. Dans ce cas, le dispositif est le référentiel du mouvement. L'interaction peut s'effectuer avec contact entre l'utilisateur et le dispositif, ou sans contact. Les gestes avec contact sont généralement de petite amplitude (du fait de la petite taille d'un bijou numérique) et sont généralement plus discrets que les gestes sans contact. Ces derniers ont toutefois l'avantage de permettre une plus grande précision.

Avec contact



FIGURE 7.14 – Avec la technique des Microrolls (Roudaut et al., 2009b), l'utilisateur sélectionne des commandes par de légers roulements du pouce.

Le contact se fait en général sur l'écran tactile, mais pas toujours. Une grande variété de techniques impliquant les montre-bracelets entrent donc dans cette catégorie. Pour améliorer la précision sur ces écrans, qui souffrent d'occultation, Holz et al. [Holz and Baudisch, 2010] exploitent les empreintes digitales afin de distinguer la différence entre la zone où l'utilisateur pense pointer et où il pointe réellement. EdgeWrite [Wobbrock *et al.*, 2003] permet aux utilisateurs de taper du texte en appuyant sur les bords d'une surface tactile. Pour MicroRolls [Roudaut *et al.*, 2009c] (Figure 7.14), l'utilisateur effectue de petits gestes de roulement sur la surface pour sélectionner des commandes. Il existe aussi de nombreuses techniques de menus adapatées aux dispositifs mobiles comme [Roudaut *et al.*, 2009b] [Francone *et al.*, 2009]

Il est aussi possible d'effectuer des mouvements circulaires. CycloStar [Malacria *et al.*, 2010] (Figure 7.16-c) utilise des gestes elliptiques pour des fonctions de défilement et de zoom, en évitant le clutching, alors que EarPod [Zhao *et al.*, 2007] (Figure 7.15) simule la roue d'un iPod pour sélectionner les commandes. Ghomi et al. [Ghomi *et al.*, 2012] proposent d'utiliser des séquences rythmiques pour cette même tâche. Ashbrook et al. [Ashbrook *et al.*, 2008a] suggèrent d'utiliser

© 2013 TELECOM ParisTech

un menu radial sur le bord d'un écran tactile rond afin de minimiser les taux d'erreur. Blasko et al. [Blasko and Feiner, 2004] obtient une conclusion similaire. Certaines techniques sont destinées à détecter les mouvements des doigts, avec des capteurs dans une montre-bracelet, comme dans le travail de Cho et al. [Cho *et al.*, 2007]. LucidTouch [Wigdor *et al.*, 2007] propose d'interagir en pointant par l'arrière d'un écran tactile, ce qui permet d'éviter l'occultation. Du fait de la faible amplitude des mouvements, ces techniques sont généralement discrètes et faciles à utiliser, même quand le potentiel de mouvement est limité, comme dans une foule compacte.

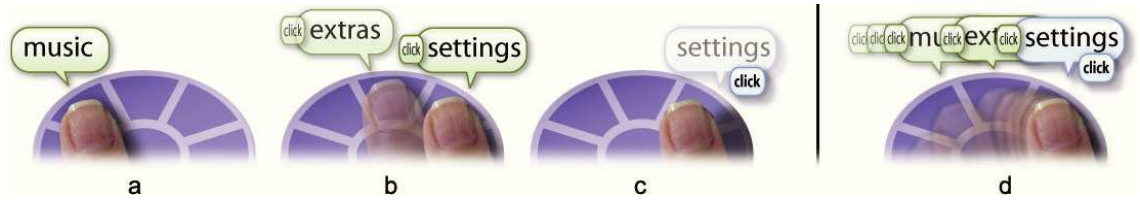


FIGURE 7.15 – EarPod propose de la sélection de commandes. Un retour audio continu est proposé afin d'aider l'utilisateur à interagir sans regarder le dispositif.

Sans contact

Le mouvement d'entrée peut être constitué de mouvements de la main autour de l'appareil, sans aucun contact. Abracadabra [Harrison and Hudson, 2009] (Figure 7.16-a) détecte la position d'un doigt en utilisant un magnétomètre, tandis qu'Hoverflow [Kratz and Rohs, 2009] (Figure 7.16-b), GestureWatch [Kim *et al.*, 2007] et SideSight [Butler *et al.*, 2008] utilisent des capteurs infrarouges pour détecter la proximité de la main pour le dispositif. Enfin, les diverses techniques d'interaction par caméra, que nous avons déjà mentionnées appartiennent à cette catégorie : la caméra est fixée sur le corps, et l'utilisateur se déplace habituellement sa main pour interagir. Le principal intérêt de ce genre de techniques est l'expressivité élevée et le large éventail de gestes disponibles.

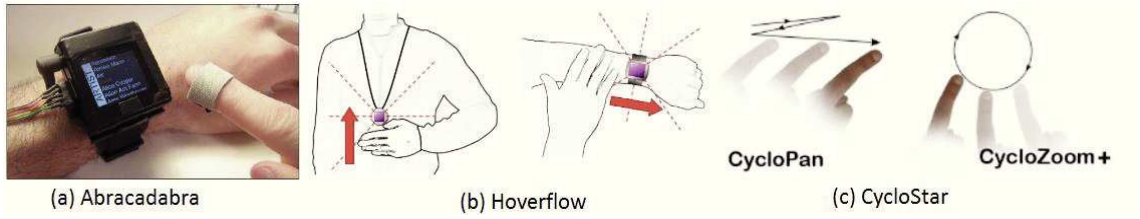


FIGURE 7.16 – Techniques d'entrée basées sur des mouvements dans le référentiel du dispositif

© 2013 TELECOM ParisTech

7.4.3 Le dispositif se déplace dans un autre référentiel

Référentiel de l'utilisateur

Ce genre d'interaction induit que le mouvement du dispositif doit être effectué dans le référentiel de l'utilisateur. Cela implique donc une translation et/ou une rotation le long du corps de l'utilisateur, par exemple, la rotation d'un collier autour du cou, remonter un bracelet le long du bras, etc... Dans Nenya [Ashbrook *et al.*, 2011] (Figure 7.17-c), qui utilise un anneau interactif, la validation d'une sélection est obtenue en faisant glisser la bague le long du doigt. Une autre possibilité est de tourner la bague autour du doigt. Cette technique propose une amplitude du mouvement faible, ce qui rend l'interaction à peine perceptible, donc adaptée à un usage privé et discret.

Référentiel du monde

Le dispositif se déplace par rapport au monde. Cette dernière catégorie implique des rotations ou des translations de l'appareil dans l'espace. Cela signifie que soit le dispositif est solidaire d'une partie du corps (par exemple comme une montre-bracelet l'est avec le poignet), et que le corps se déplace dans l'espace, faisant aussi bouger le dispositif. Les capteurs utilisés pour détecter ce type de mouvement sont généralement des accéléromètres et des gyroscopes. En plus des techniques déjà citées dans la section consacrée au matériel, dans FingeRing [Fukumoto and Tonomura, 1997] l'utilisateur déplace ses doigts (lesquels portent chacun un anneau) comme s'il jouait du piano. GestureWrist [Rekimoto, 2001] (Figure 7.17-a) propose aussi de capter des mouvements du poignet et des doigts pour l'interaction. Blasko et al. [Blasko *et al.*, 2005] (Figure 7.17-b) a simulé un projecteur porté sur une montre et conçu des techniques d'interaction basées sur le mouvement du poignet. Amft et al. [Amft *et al.*, 2009] a fait un travail similaire, en analysant les translations sur l'axe Z d'une montre portée sur un poignet. L'utilisation de ce type d'interactions avec des bijoux numériques est un peu plus limitée par le fait que le dispositif est généralement solidaire de la partie du corps qui le porte.

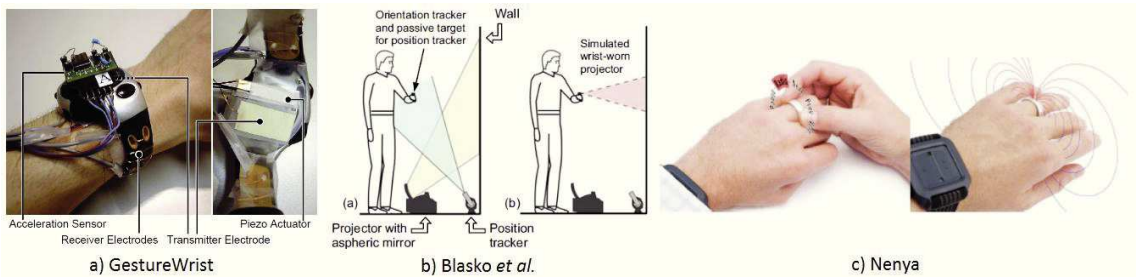


FIGURE 7.17 – Techniques d'entrée basées sur le mouvement de l'appareil

© 2013 TELECOM ParisTech

7.4.4 Résumé sur l'interaction gestuelle

Beaucoup de techniques d'interaction impliquent le mouvement de la main par rapport au dispositif. Toutefois, si l'interaction avec un smartphone se fait avec un contact physique sur le dispositif, la faible taille d'un bijou numérique rend l'option sans contact logique. Les tâches de pointage étant très difficile sur les bijoux numériques, interagir en déplaçant le dispositif dans un référentiel externe semble être une alternative prometteuse. Il est intéressant de pointer que le mouvement du dispositif par rapport au corps est relativement peu exploré. Nous sommes confrontés à une zone intéressante de l'espace de conception, en particulier avec des bijoux qui sont fixés au poignet ou aux doigts, comme les bracelets/montres-bracelet et des anneaux.

Les modalités utilisables dépendent des capteurs disponibles sur un périphérique donné, mais aussi de la localisation de l'appareil sur le corps de l'utilisateur. Les bijoux numériques étant fixés au corps, les degrés de liberté du dispositif dépendent fortement de leur emplacement physique. La raison pour laquelle l'interaction basée sur le mouvement du dispositif concerne généralement les anneaux et les montres-bracelets est tout simplement parce que la main jouit de la plus grande mobilité. Dans le cas où le dispositif sert à capter les mouvements du corps de l'utilisateur, il est préférable de sélectionner un emplacement à mobilité réduite, par exemple le haut du torse, rendant donc les colliers augmentés de caméra très prometteurs pour l'interaction.

7.5 Modalités de sortie

Ce qui précède montre que l'emplacement du dispositif est primordial pour la conception des bijoux numériques. Cela était vrai pour l'entrée, mais est aussi valable pour la sortie.

7.5.1 Modalité visuelle

La vision est le sens le plus largement utilisé à la fois pour le feedback et la sortie dans l'informatique mobile, et c'est là un défi majeur des bijoux numériques : la petite taille des dispositifs rend difficile d'intégrer des écrans utilisables. Il existe trois principales catégories de matériel optique.

Matériel

Du fait de la petite taille voulue pour un bijou, le nombre de périphériques disponibles est relativement restreint. Dans le cas de la modalité visuelle, par exemple, il sera généralement difficile d'intégrer un écran sur un bijou ; si cela est possible (par exemple, sur une montre-bracelet), l'écran aura une taille très petite. Ci-dessous nous passons en revue les périphériques de sortie les

© 2013 TELECOM ParisTech

plus courants.

Diodes Une diode électroluminescente (LED) peut être considérée comme un écran d'un pixel, comme suggéré par Ni et Baudisch [Ni and Baudisch, 2009]. Les LEDs ne consomment pratiquement pas de puissance et leur taille les rend intégrables à toute sorte de bijou. Si l'information binaire (on/off) qu'elles peuvent fournir est évidemment limitée, une LED peut clignoter à des fréquences et couleurs variées. Par exemple sur le Nokia N900, un lent flash orange sert à signaler la charge, un voyant vert non clignotant indique la charge complète de la batterie, un flash bleu rapide un message, etc. Les diodes peuvent être utilisées en de multiples exemplaires, pour afficher l'heure (horloge binaire) [BinaryClock, 2013]. Harrison et al [Harrison *et al.*, 2012] présentent une étude poussée sur les propriétés des diodes et leur capacité à transmettre des informations variées, basé sur des motifs temporels et d'intensité. Les LEDs peut être utilisée dans n'importe quel contexte, car très discrètes, mais leurs signaux ne seront pas détectables à partir de tous les endroits du corps. Le poignet et la main restent pour cela les candidats les plus sérieux.

Pico-projecteurs Les pico-projecteurs actuellement disponibles ne sont pas suffisamment petits et légers pour une utilisation dans un bijou numérique. Poirier et al. [Poirier *et al.*, 2010] citent des produits ayant une taille de 10 x 5 x 2 cm. Un pico-projecteur est, en principe, une façon très élégante d'augmenter une faible surface d'affichage visuel. La faible résolution des produits disponibles reflète un problème de coût, plutôt qu'une limite technologique, comme l'a souligné Blasko et al. [Blasko *et al.*, 2005], ce qui signifie que pico-projecteurs pourraient à l'avenir être intégrés sur des bijoux et offrir une résolution suffisante.



FIGURE 7.18 – Avec Skinput (Harrison et al., 2010), un menu est projeté sur le bras de l'utilisateur. En effectuant un "tap" sur un élément, il peut le sélectionner facilement.

© 2013 TELECOM ParisTech

L'utilisation de pico-projecteurs soulève des problèmes d'intimité (privacy). Cao et al. [Cao *et al.*, 2007] s'intéressent particulièrement au partage d'informations dans un contexte où plusieurs utilisateurs utilisent des projecteurs. En particulier, ils proposent des solutions pour le partage d'informations privées projetées, en rendant l'image floue si une personne extérieure s'approche trop près de l'image. Une contrainte est la stabilité du projecteur : noter que le poignet peut être facilement bloqué sur la poitrine. Le niveau d'éclairage ambiant est une autre contrainte. Enfin, une surface de projection appropriée peut être difficile à trouver mais le corps lui-même peut remplir cette fonction. Par exemple, dans le prototype de Sakata et al. [Sakata *et al.*, 2009], l'image est affichée sur la main de l'utilisateur, avec l'affichage d'informations changeant selon que la paume ou le dos de la main est représenté par la saillie. Dans Skinput [Harrison *et al.*, 2010] (Figure 7.18), le bras sert à la projection d'un menu, et l'utilisateur peut choisir parmi les options en tapant sur l'image projetée.

Écrans Contrairement aux ordinateurs de poche, tous les bijoux numériques ne peuvent offrir un écran. Habituellement, seules les montres ou bracelet offrent effectivement un écran avec une résolution faible (maximum 240 x 240 sur [I'mWatch, 2013]) et une petite taille (diagonale d'écran de moins de 1,5"). Si l'écran est tactile, il peut être utilisé comme entrée, mais alors nous nous heurtons au problème d'occultation et du "fat finger" [Vogel and Baudisch, 2007], qui réduit la précision de l'interaction. Un petit écran est suffisant tant que l'utilisateur effectue des tâches simples, avec peu d'informations affichées. Il peut être utile pour un usage privé et dans des situations de mobilité, car il peut être déplacé à proximité des yeux. L'utilisateur peut même l'utiliser pour lire de petits textes, tels que des SMS. Néanmoins, dans la plupart des cas, des alternatives à l'écran doivent être envisagées.

Lunettes L'utilisation de lunettes permet d'offrir un confort visuel à l'utilisateur. Alors que les premiers prototypes étaient assez encombrants, des projets plus récents comme Google Glasses [Google, 2013] (cf Figure 7.19) rendent ce type de dispositif utilisable. Parmi les désavantages des lunettes, il y a le fait qu'elles sont très visibles pour les autres, et leur placement directement devant les yeux de l'utilisateur qui les rend intrusives pour ce dernier. De nombreux travaux s'intéressent à l'utilisation de lunettes pour la réalité augmentée comme Hua et al [Hua and Gao, 2005].

7.5.2 Modalité audio

Dans EarPod [Zhao *et al.*, 2007], le système émet un clic audible à chaque fois que l'utilisateur modifie la commande sélectionnée dans un menu, ce qui diminue le temps d'interaction. Un avantage important de l'audio est de permettre l'interaction eyes-free (sans regarder le dispositif). Un des inconvénients est que cette modalité est soumise au bruit ambiant, ce qui rend son utilisa-

© 2013 TELECOM ParisTech



FIGURE 7.19 – Les lunettes Google Glasses.

tion difficile dans un environnement bruyant. Les différents périphériques audios accessibles ont souvent une faible taille, ce qui rend leur intégration dans des bijoux numériques aisée.

Haut-parleurs Chaque smartphone intègre un haut-parleur. Si l'environnement est bruyant, il pourrait être difficile à entendre. Une autre préoccupation est que n'importe qui à proximité de l'utilisateur peut entendre le son, et être dérangé. C'est pourquoi l'utilisation d'un haut-parleur doit être réservé à des situations particulière : dans un environnement calme et si possible avec peu de personnes autour susceptibles d'être gênées. Mais il reste le problème de la consommation. Afin de réduire l'intensité, et donc l'énergie requise, le haut-parleur doit être rapproché de l'oreille. Lorsque cette distance est égale à zéro, nous avons l'écouteur.

Écouteurs En utilisant des écouteurs, seul l'utilisateur peut entendre le son, permettant ainsi une interaction privée, minimisant aussi la sensibilité au bruit ambiant. L'emplacement évident pour un écouteur est une boucle d'oreille, mais d'autres options peuvent être envisagées. Fukumoto a présenté deux prototypes, Whisper, un dispositif porté au poignet [Fukumoto, 2005] et HANDset, un anneau [Fukumoto and Tonomura, 1999] (Figure 7.20), qui utilisent tous deux la conduction osseuse pour transmettre le son. Pour entendre l'utilisateur insère simplement son doigt dans l'oreille. Non seulement, la qualité audio est bonne, les utilisateurs contrôlent s'ils souhaitent recevoir des informations audio ou non.

L'audio peut être la modalité de sortie principale pour de l'interaction simple comme des "micro-interactions" [Ashbrook, 2010]. Il peut servir à administrer des alertes simples ou pour signaler des changements dans le système. Pour transmettre plus d'informations à l'utilisateur, d'autres modalités en remplacement ou complément doivent être envisagées.

© 2013 TELECOM ParisTech

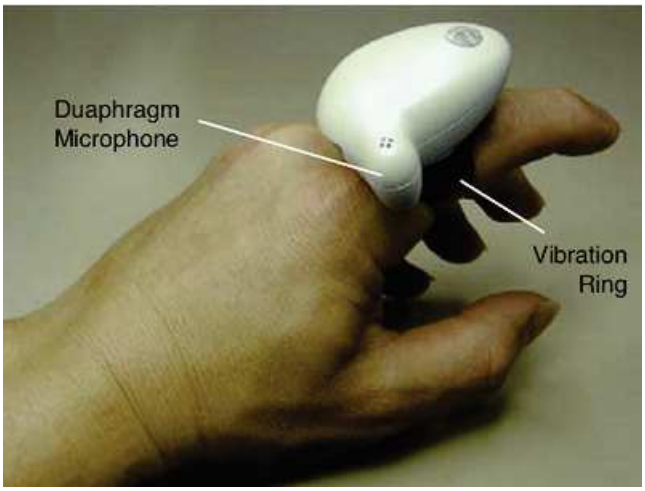


FIGURE 7.20 – HANDset (Fukumoto and Tonomura, 1999) utilise la conduction osseuse pour transmettre une conversation téléphonique.

7.5.3 Modalité tactile

Le retour haptique peut fournir un retour équivalent à l'audio dans des conditions où le son est à peine utilisable. Le terme "haptique" désigne à la fois les technologies à retour de force (musculaire) et les technologies de vibration à faible consommation d'énergie.

Retour de force En termes de retour d'effort, Casiez et al. ont proposé le STIMTAC [Casiez *et al.*, 2011], qui permet de faire varier le coefficient de friction d'un touchpad. Roudaut et al. [Roudaut *et al.*, 2013] ont utilisé un prototype à retour de force pour déplacer le doigt de l'utilisateur sur un téléphone portable. Ce type de dispositifs est à l'heure actuelle encore un peu encombrant pour être embarqué sur un bijou numérique. La vibration, par contre, présente un intérêt en termes de retour d'information en sortie, avec des périphériques qui peuvent être petits et très peu coûteux.

Cellules braille Les cellules brailles se composent de picots qui peuvent être levés ou non. Ces cellules peuvent servir à transmettre des informations sous forme de texte (codé en Braille), mais aussi diverses informations. Pietzrak et al. [Pietrzak *et al.*, 2007] utilisent une souris dotée d'une matrice de picots dans un logiciel d'électronique afin de transmettre des informations sur le type de composants sélectionnés par l'utilisateur. Tactimote [Tahir *et al.*, 2008] est une télécommande pour la télévision interactive utilisant une cellule braille pour améliorer la sélection des chaînes favorites. Ce type de matériel fournit un retour haptique mais est relativement encombrant à l'échelle d'un bijou numérique.

© 2013 TELECOM ParisTech

Vibreurs Un vibreur, pas plus grand que quelques millimètres peut être inséré dans pratiquement tout dispositif. Il peut être utilisé efficacement, à condition que le dispositif soit en contact avec la peau de l'utilisateur. Ressentir une vibration est une expérience personnelle qui peut rester relativement discrète. Matscheko et al. [Matscheko *et al.*, 2010] ont mené une expérience avec plusieurs vibreurs autour du poignet, afin de tester différents modèles de vibration en faisant varier le niveau d'attention de l'utilisateur. Ils concluent qu'il est plus intéressant de placer les vibreurs tout autour du poignet plutôt qu'uniquement sur la partie dorsale de celui-ci. La première configuration se trouvant donner de meilleurs résultats en termes de temps de réaction et de taux d'erreur, quelque soit le niveau d'attention.

Peut-être que le potentiel de la sortie tactile pour l'informatique mobile et plus particulièrement pour les bijoux numériques n'a pas été pleinement apprécié à ce jour. Son efficacité pour la livraison des signaux d'alarme n'a pas échappé à l'attention des chercheurs, mais il faut savoir qu'un signal tactile offre plusieurs dimensions en ce qui concerne le codage de l'information. Pasquero et al. [Pasquero *et al.*, 2011] évaluent plusieurs fréquences de vibrations et détermine qu'une fréquence élevée transmet une transmission d'informations imprécise mais très rapide, au contraire d'une fréquence faible. Les deux ont leurs avantages (précision ou rapidité) et peuvent être utilisées dans des contextes différents.

7.5.4 Dispositifs déportés

Un moyen radical pour accroître les capacités de sortie des bijoux numériques est de recourir de manière opportuniste à des dispositifs déportés disponibles autour, par exemple un écran de bureau présent dans la pièce dans lequel le porteur de bijou interactif vient d'entrer. Cela permettrait d'augmenter ponctuellement la capacité de sortie des bijoux. Une technologie comme "Airplay" illustre l'utilisation de périphériques déportés. Airplay permet à un utilisateur de coupler son iPhone avec son Apple TV. L'application à des bijoux numériques nécessitera le développement et la standardisation de protocoles de communication appropriés.

L'utilisation d'écran publics ("public displays") permet aussi d'augmenter les capacités d'affichage d'un bijou numérique, mais souffrent d'un potentiel problème d'intimité (privacy), dans la mesure où ces affichages sont par définition visibles pour toute personne alentour. Müller et al [Müller *et al.*, 2008] se sont intéressés particulièrement à ce problème et montrent dans leur étude que les inquiétudes pour l'intimité ne sont pas forcément fortes, en particulier selon la tâche à effectuer.

© 2013 TELECOM ParisTech

7.5.5 Conclusion sur les sorties

Les bijoux numériques doivent être conçus en prenant toutes les modalités de sortie en considération afin que pour n'importe quelle tâche donnée, il existe de nombreuses alternatives, avec leurs avantages et inconvénients respectifs. En effet, les bijoux numériques étant portés en permanence par l'utilisateur, il faut tenir compte de situations où la discrétion est importante (en cas d'interaction sociale par exemple), mais aussi des situations où l'environnement est bruyant ou quand l'utilisateur n'a que peu d'attention à accorder au système. Les situations pouvant changer très rapidement, il convient de mettre au point des systèmes réactifs et flexibles.

Nous avons vu que les deux principales modalités (vision et audio), ne peuvent pas être utilisés dans toutes les situations. Voici une liste de pistes potentiellement intéressantes :

- Une plus large utilisation de la modalité tactile. En utilisant non seulement la répartition spatiale, comme dans [Matscheko *et al.*, 2010], mais aussi les schémas temporels, il est possible de grandement augmenter le vocabulaire disponible.
- Le retour visuel devrait être fourni sur les dispositifs facilement visibles par l'utilisateur.
- Pour l'audio, les écouteurs possèdent le meilleur potentiel, notamment dans le cas où le dispositif est proche de l'oreille de l'utilisateur [Fukumoto and Tonomura, 1999] [Fukumoto, 2005].
- La multimodalité peut être utile, en particulier en utilisant les modalités de manière redondante ou complémentaires (propriétés CARE [Coutaz and Nigay, 1994]).

7.6 Vue d'ensemble de l'interaction

Il est temps de faire un bref résumé des possibilités des différents dispositifs présentés, tant en termes d'entrée que de sortie, en pointant certaines pistes non explorées dans la littérature actuelle.

7.6.1 Boucles d'oreilles

Ces bijoux étant attachés à la tête, ils voient ce que les utilisateurs voient, ce qui signifie qu'il serait utile de les équiper avec une caméra. Ce genre de bijoux est aussi un choix particulièrement évident pour l'interaction audio vocale [Zhao *et al.*, 2007], en raison de sa proximité à l'oreille et la bouche.

7.6.2 Pendentifs, colliers

La partie supérieure de la poitrine est un endroit prometteur pour une caméra [Gustafson *et al.*, 2010] [Mistry *et al.*, 2009], ce qui donnera une vue d'ensemble sur les mains du porteur ainsi que sur le monde. Il est aussi possible d'utiliser des capteurs de mouvements [Kratz and Rohs,

© 2013 TELECOM ParisTech

2009]. Une utilisation qui n'est pas encore exploitée consisterait à déformer la chaîne du collier (à l'image de CordInput [Schwarz *et al.*, 2010]), de sorte que le dispositif puisse tourner. La visibilité d'un collier est limitée, mais une diode brillant avec assez d'intensité, ou un petit vibreur restent perceptibles.

7.6.3 Broches

Une broche est semblable au collier, mais il est plus difficile de la déplacer, étant fixée à un morceau de tissu. Elle est le bijou qui bénéficie du moins de degrés de liberté. Mais il s'agit d'un emplacement approprié pour capter les déplacements de l'utilisateur dans le monde avec une caméra ou un accéléromètre.

7.6.4 Bracelets, montres

Le poignet est sans conteste un endroit idéal pour un bijou numérique en termes de confort et d'accessibilité [Kim *et al.*, 2010]. La main étant la partie du corps la plus mobile, il est facile de la porter à l'oeil ou à l'oreille. Une montre-bracelet peut être déplacée, tournée autour du poignet, et glisser le long du bras. Aujourd'hui, beaucoup de montres-bracelets sont en outre équipées de capteurs de mouvements, comme des accéléromètres, des gyroscopes et/ou des magnétomètres. La montre-bracelet est une option très prometteuse pour la modalité visuelle en sortie, car elle peut intégrer tous les périphériques matériels présentés, que ce soit les LED, les écrans, ou pico-projecteur dans un proche avenir. Le retour tactile a été exploré, et prouvé utile. Enfin, la montre-bracelet peut très bien utiliser l'interaction audio vocale, en approchant simplement la montre de la tête de l'utilisateur en cas de contexte sonore particulièrement bruyant.

7.6.5 Anneaux, bagues

Un anneau peut tourner autour du doigt [Ashbrook *et al.*, 2011]. Le doigt est la partie du corps la plus mobile : non seulement il peut se déplacer par rapport au monde [Fukumoto and Tonomura, 1997], mais aussi par rapport à la main, et offre donc un grand potentiel pour l'entrée d'informations. En ce qui concerne la sortie, nous avons vu que les LED dans [Labrune and Mackay, 2006], les sons par conduction osseuse [Fukumoto, 2005], et les vibrations [Werner *et al.*, 2008] [Matscheko *et al.*, 2010] peuvent être utilisés.

© 2013 TELECOM ParisTech

© 2013 TELECOM ParisTech

Chapitre 8

Contribution à l'étude de la joaillierie numérique : Watch It

SOMMAIRE

8.1 MOTIVATION 113
8.2 CONTEXTE ET TRAVAUX CONNEXES 115
8.2.1 Dispositif comme mobile 116
8.2.2 Dispositif comme référentiel d'interaction 116
8.3 INTERACTION SUR UN BRACELET 118
8.3.1 Le concept WatchIt 120
8.3.2 Vocabulaire gestuel 122
8.4 EXPÉRIENCE PRÉLIMINAIRE 123
8.4.1 Participants 124
8.4.2 Méthode 124
8.4.3 Résultats 125
8.4.4 Discussion 127
8.5 INTERACTION "EYES-FREE" 129
8.5.1 Définition 129
8.5.2 Menu Audio 129
8.6 EXPÉRIENCE "EYES-FREE" 129
8.6.1 Participants 130
8.6.2 Stimulus 130
8.6.3 Méthode 130
8.6.4 Tâche 131
8.6.5 Résultats 132
8.6.6 Discussion 134
8.7 CONTRÔLE CONTINU 135
8.7.1 Technique de défilement sur le bracelet 135

8.7.2 Technique de pointage absolu 135
8.7.3 Note sur la validation 136
8.8 EXPÉRIENCE DE DÉFILEMENT DE LISTE 136
8.8.1 Participants 137
8.8.2 Stimulus 137
8.8.3 Méthode 137
8.8.4 Tâche 138
8.8.5 Résultats 139
8.8.6 Discussion 142
8.9 DISCUSSION SUR WATCHIT 143
8.9.1 Utilisation "eyes-free" 143
8.9.2 Utilisation pour du contrôle continu précis 143
8.10 APPLICATIONS 144
8.10.1 Cas d'utilisation général de WatchIt 144
8.10.2 Scénarios 144
8.11 CONCLUSION ET PERSPECTIVES 145
8.11.1 Perspectives sur les techniques d'interaction 145
8.11.2 Limitations technologiques et perspectives d'utilisation d'une technologie capacitive 146
8.11.3 Utilisation des deux potentiomètres sur chaque demi-bracelet : implémentation d'un lecteur musical 147
8.11.4 Conclusion 150

© 2013 TELECOM ParisTech

8.1 Motivation

À la suite de l'enquête et de l'étude de la littérature présentées dans le Chapitre 7, nous avons décidé de nous intéresser spécifiquement aux montres et bracelets. Pour rappel, notre enquête a montré que 60% des femmes et 39% des hommes sondés portent un bijou au poignet quotidiennement. Un autre avantage des montres est qu'il existe à l'heure actuelle de nombreux produits commerciaux aboutis comme par exemple I'm Watch [I'mWatch, 2013], Pebble [Pebble, 2013], etc...

Historiquement, le premier prototype de montre intelligente a été proposé par Steve Mann en 1998 (présenté en Figure 8.1). Ce prototype proposait une fonctionnalité simple de vidéoconférence. En 2001, IBM [Narayanaswami *et al.*, 2002] présente une montre Linux avec des fonctionnalités plus avancées. L'interaction avec ces dispositifs est fortement entravée par leur petite surface d'interaction, dans la mesure où la surface d'interaction est localisée essentiellement sur l'écran —lorsque celui-ci est tactile—, et les éventuels boutons physiques présents autour.



FIGURE 8.1 – La montre GNUX de Steve Mann propose une application sommaire de vidéoconférence dès 1998.

De fait, l'utilisation d'un écran tactile de si petite taille induit deux problèmes connexes :

- l'occultation (présenté sur la Figure 8.2) [Roudaut *et al.*, 2008], qui empêche l'utilisateur de voir une substantielle partie de l'écran,
- le "fat finger" [Vogel and Baudisch, 2007], qui, du fait de la taille du doigt interagissant sur l'écran, rend l'interaction imprécise et difficile à prédire.

Pour lutter contre ces problèmes, une solution consiste à augmenter la taille des composants graphiques à l'écran pour faciliter leur sélection, mais cela induit l'inconvénient de réduire leur

© 2013 TELECOM ParisTech

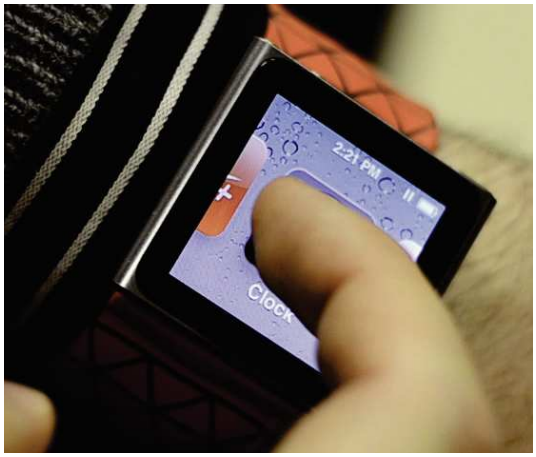


FIGURE 8.2 – Exemple d'occultation de l'écran par le doigt sur iPod nano.

nombre affiché. Cette solution est par exemple appliquée sur l'iPod nano de 6ème génération, où l'interface principale ne permet que de choisir une application dont l'icône occupe 70% de la surface de l'écran (comme le montre la Figure 8.3), ou de passer à l'application précédente ou suivante. En augmentant la taille des composants graphiques, on diminue donc grandement les capacités d'interaction ce qui a pour conséquence de multiplier le nombre de gestes à accomplir, même pour effectuer des tâches simples.



FIGURE 8.3 – Menu de l'iPod nano, avec une seule application sélectionnable à l'écran.

La solution que nous proposons pour éviter ces inconvénients consiste à contourner les problèmes inhérents à l'interaction avec un petit dispositif d'entrée/sortie (l'écran tactile) en exploitant les possibilités offertes par les surfaces entourant le dispositif d'affichage. Sur les précédents produits commerciaux, il existe en effet une vaste surface non utilisée pour l'interaction, à savoir le bracelet. Nous avons créé WatchIt, un prototype qui étend l'interaction au-delà de la surface de la montre. En intégrant des capteurs de position (à 1 dimension) dans le bracelet, il devient possible

© 2013 TELECOM ParisTech

d'utiliser cette surface pour l'interaction, en évitant les problèmes d'occultation. En outre, WatchIt peut être utilisé comme un dispositif d'entrée simple, sur un simple bracelet dépourvu écran, ou sur une montre disposant d'un écran non tactile (comme la Pebble, présentée en Figure 8.4).



FIGURE 8.4 – Exemple de montre interactive : la montre "Pebble" (par la société Pebble).

Au cours de ce projet, nous avons :

- Mis au point un prototype matériel autonome complet, peu consommateur d'énergie et peu coûteux à fabriquer ;
- Testé son utilisabilité à la fois comme une extension d'une montre disposant d'un écran, mais aussi comme un dispositif autonome, permettant l'interaction dite "eyes-free" (sans regarder le dispositif) ;
- Évalué les capacités des utilisateurs à effectuer deux types de techniques d'interaction pour le défilement de listes, avec des résultats encourageants.

8.2 Contexte et travaux connexes

Contrairement au Chapitre 7 qui présente un espace de caractérisation de l'interaction sur bijoux numériques, les travaux connexes présentés ici s'intéressent spécifiquement aux problématiques liées aux montres interactives. Diverses approches ont été proposées pour remédier au problème d'occultation, et d'imprécision sur les petits dispositifs tels que les montres/bracelets ([Rekimoto, 2001], [Ashbrook *et al.*, 2008a], [Blasko and Feiner, 2004]), ou des anneaux ([Ashbrook *et al.*, 2011]). Néanmoins, aucune de ces solutions n'impliquait l'utilisation de la surface du bracelet pour l'interaction. Nous allons classer les travaux connexes d'après l'espace de classification pour l'interaction gestuelle présenté dans le Chapitre 7.

© 2013 TELECOM ParisTech

8.2.1 Dispositif comme mobile

Les approches se basant sur des mouvements du dispositif dans un référentiel externe ont le désavantage d'impliquer généralement des gestes amples, qui sont de fait généralement fatiguants et peu discrets vis-à-vis des autres.

Dans le référentiel de l'utilisateur

Nenya, de [Ashbrook *et al.*, 2011] (Figure 8.5) est une exception et requiert des gestes très discrets, ce qui en fait une solution élégante. En utilisant un magnétomètre pour détecter les mouvements d'un anneau autour du doigt de l'utilisateur, le système permet de délimiter l'espace de rotation en 8 commandes distinctes. Ce prototype fonctionne en "eyes-free", mais il implique l'utilisation d'un bracelet supplémentaire pour capter les mouvements. En outre, le nombre de commandes est limité par rapport à WatchIt (15 commandes). La technique est bien adaptée pour l'interaction, mais les capacités du dispositif sont limitées à un total de 8 commandes.



FIGURE 8.5 – L'anneau interactif Nenya. L'interaction se fait grâce à l'aimant situé sur l'anneau, et dont les mouvements sont captés par un magnétomètre dans le bracelet.

Dans le référentiel du monde

Rekimoto [Rekimoto, 2001] utilise également un bracelet pour l'interaction hors de l'écran d'une montre, mais utilise pour cela des capteurs capacitifs pour détecter des gestes de grande amplitude, comme les mouvements de la main dans l'air. Il n'utilise pas la surface du bracelet pour l'entrée, ne fournit pas de solution pour du contrôle continu.

8.2.2 Dispositif comme référentiel d'interaction

Pour WatchIt, nous avons choisi ce type d'approche, qui permet donc des gestes généralement discrets. Les solutions présentées ci-après utilisent généralement certaines parties de la montre, mais jamais le bracelet. Des approches venant de l'informatique mobile en général sont aussi pré-

© 2013 TELECOM ParisTech

sentées.

Avec contact

Une solution explorée par Blasko [Blasko and Feiner, 2004] (Figure 8.6) d'un côté, et Ashbrook [Ashbrook *et al.*, 2008a] de l'autre, se base sur l'utilisation du cadran autour de l'écran de la montre (bezel). Cette solution permet de la micro-interaction, potentiellement en "eyes-free" (non testé), mais ne règle pas le problème de l'occultation.

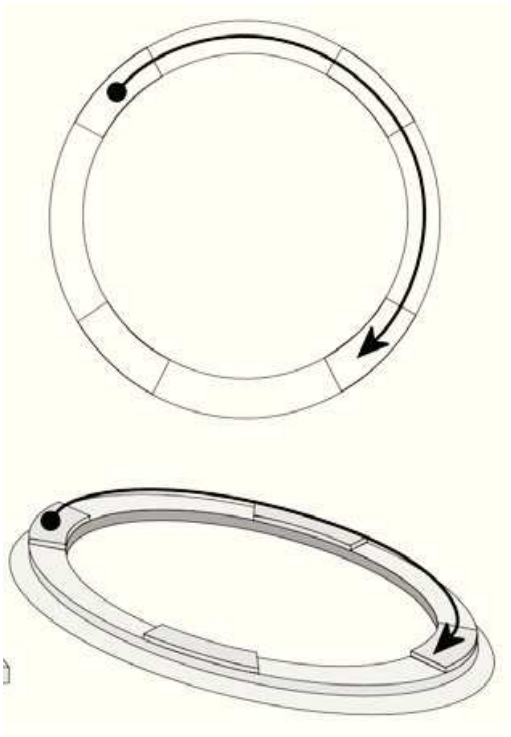


FIGURE 8.6 – Utilisation du cadran de la montre par Blasko. L'utilisateur interagit en faisant glisser son doigt le long du cadran, qui sert de marque tactile.

Avec Snaplet ([Tarun *et al.*, 2011]), l'utilisateur interagit avec un dispositif déformable qui peut être utilisé comme une montre-bracelet, un PDA ou un téléphone. Bien que ce dispositif offre une interaction tactile (l'utilisateur produit une pression sur certaines zones spécifiques), l'utilisation de capteurs de pression implique un nombre très limité de zones tactiles peu précises. En outre, ce système se base aussi sur l'utilisation d'un stylet supplémentaire, ce qui ne convient pas pour une vraie montre-bracelet.

Dans [Pasquero *et al.*, 2011], les auteurs utilisent une montre-bracelet haptique pour proposer des interactions simples et "eyes-free", mais ils se concentrent principalement sur la sortie (output). En outre, l'interaction en entrée se fait en appliquant une pression à l'écran tactile, ce qui ne règle

© 2013 TELECOM ParisTech

pas le problème d'occultation. Ils ne font pas non plus usage du bracelet.

Le concept de "back of device interaction", mis au point par Baudisch & Chu [Baudisch and Chu, 2009] (illustré en Figure 8.7), utilise des capteurs à l'arrière du dispositif mobile pour permettre l'interaction. Cette technique s'applique difficilement à une montre, car la face arrière n'est plus disponible. L'interaction pourrait se faire en utilisant le fermoir, mais la surface d'interaction resterait faible. En outre, le fonctionnement intrinsèque de la technique (pointage direct) ne rend pas ce système pratique pour de l'interaction "eyes-free".

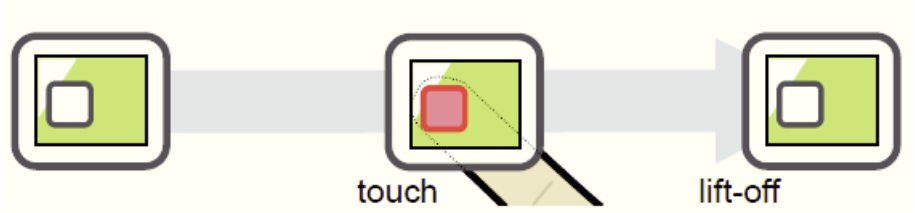


FIGURE 8.7 – Interaction avec le dos du dispositif avec le concept "Back of device".

Sans contact

L'interaction sans contact permet généralement d'atteindre de hauts niveaux de précision, mais prive l'utilisateur du retour haptique passif du dispositif disponible pour l'interaction avec contact.

Abracadabra, proposé par [Harrison and Hudson, 2009], étend l'interaction dans une zone circulaire autour de l'écran de la montre en permettant d'interagir par des gestes dans l'air détectés grâce à un magnétomètre dans la montre. Avec ce système, les utilisateurs sont en mesure de discriminer jusqu'à 22 secteurs angulaires. En contrepartie, ce système n'a pas été évalué pour de l'interaction "eyes-free", et implique surtout de porter un aimant sur le doigt.

Enfin, SideSight, de [Butler *et al.*, 2008] utilise des capteurs de proximité pour suivre la position des doigts autour de l'appareil. L'interaction se fait à l'aide de gestes dans l'air, sans tirer parti de la surface du bracelet. Contrairement à une interaction sans contact, l'utilisateur ne profite pas ici du retour haptique passif du dispositif (bords du bracelet, de l'écran, fermoir), ce qui limite son utilisation en mode "eyes-free".

8.3 Interaction sur un bracelet

Notre enquête préliminaire (Section 7.1) a révélé un intérêt pour les bijoux numériques, avec un intérêt particulier partagé par les deux sexes pour le poignet. Ceci nous a encouragé à concentrer nos efforts sur les bracelets et les montres. L'interaction sur un bracelet offre plusieurs avantages :

© 2013 TELECOM ParisTech



FIGURE 8.8 – Abracadabra détecte la position de l'aimant fixé sur le doigt de l'utilisateur grâce à un magnétomètre.

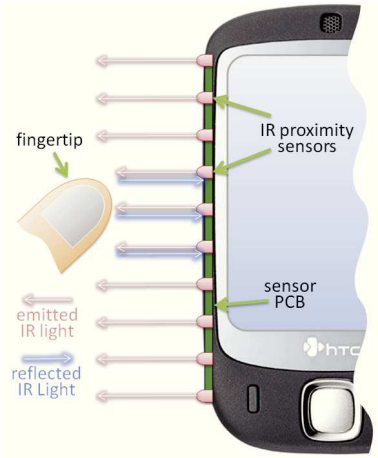


FIGURE 8.9 – SideSight permet de détecter les mouvements d'un ou plusieurs doigts autour d'un dispositif, ici un téléphone portable.

- Intuitivement, il y a une interaction naturelle entre la main dominante et le poignet non dominant : il est simple de se serrer le poignet.
- Grâce à la proprioception [8] [Proske and Gandevia, 2012], les gens ont tendance à avoir une bonne dextérité et précision, même lorsque lorsqu'ils touchent leur poignet dans l'obscurité ou dans une situation où ils ne peuvent regarder leurs bras.
- Le poignet est une des parties du corps les plus mobiles, ce qui permet de le placer facilement dans une position confortable pour interagir.

8. La proprioception désigne la perception de soi-même pour le corps humain, et donc le fait de connaître la position de ses membres, en particulier ses bras, et donc ses poignets.

© 2013 TELECOM ParisTech

– Ce type d'interaction permet, comme expliqué précédemment, d'éviter l'occultation de l'écran et l'imprécision [Pasquero *et al.*, 2011]. De plus, elle fournit un accès rapide à l'appareil, car aucun objet auxiliaire n'est nécessaire ;
– Elle peut agir comme un complément à l'interaction sur l'écran : par exemple, le bracelet peut servir pour effectuer des actions fréquentes, pour lesquels un accès rapide semble souhaitable, y compris sans regarder (interaction "eyes-free"), tandis que l'écran peut être utilisé lorsque du pointage direct est nécessaire. Ce genre d'interactions ponctuelles est dénommé "micro-interactions" par Ashbrook, qu'il définit comme "des interactions avec un dispositif qui prennent moins de quatre secondes pour être effectuées" [Ashbrook, 2010] et reposent sur la "disponibilité inconditionnelle et un accès rapide au dispositif" [Ashbrook *et al.*, 2011].

Finalement, il est utile de rappeler que malgré toute l'attention consacrée à l'interaction avec les montres, et en particulier avec leurs écrans tactiles, il n'existe à notre connaissance aucun travail de recherche antérieur sur l'interaction avec un bracelet.

8.3.1 Le concept WatchIt

Nous avons étudié les tâches identifiées par les participants à notre enquête, afin d'identifier les principaux besoins en termes d'interaction. Nous avons identifié trois types spécifiques d'interaction :

1. l'invocation de commandes discrètes (par exemple, lecture/pause),
2. la sélection d'un élément dans une liste (par exemple, choisir entre le numéro de domicile d'un contact ou son mobile),
3. le contrôle continu (par exemple pour faire défiler une liste, une page d'un document, une carte) et les commandes analogiques (régler le volume sonore, la luminosité de l'écran).

Nous souhaitions aussi proposer un dispositif peu coûteux à produire et qui ne soit pas trop consommateur d'énergie afin de ne pas pénaliser l'autonomie du système. Enfin, il était important que le dispositif n'altère en rien l'aspect esthétique du bijou –une préoccupation mise en avant par notre enquête—.

Pour notre prototype de bracelet interactif, nous avions le choix entre les technologies résistives et capacitives. La seconde, qui est la plus utilisée à l'heure actuelle, permet la gestion de plusieurs points de contacts simultanés et s'active au simple contact. En contrepartie, cette technologie est plus consommatrice d'énergie. La technologie résistive de son côté ne permet pas de détecter plusieurs contacts simultanés, mais consomme très peu d'énergie et est simple d'accès et peu coûteuse. L'utilisation d'une technologie résistive met en évidence un compromis entre la complexité possible de l'interaction d'une part, et le coût, la consommation d'énergie d'autre part. Bien que les capteurs résistifs aient besoin de plus de pression que les capteurs capacitifs pour s'activer,

© 2013 TELECOM ParisTech

ils jouissent d'un certain nombre de propriétés intéressantes pour notre prototype. Tout d'abord, ils nécessitent moins d'énergie que les capteurs capacitifs, et même moins que les solutions utilisant un magnétomètre, comme Abracadabra [9] [Harrison and Hudson, 2009] (qui exige 0,15 mA, tandis que notre prototype utilise seulement 0,03 mA par potentiomètre). En second lieu, le fait que la pression du doigt soit nécessaire pour la détection d'un contact est avantageux car ceci permet de réduire le nombre d'activations accidentelles. Enfin, la technologie résistive ne nécessite pas de contact direct avec le doigt : le capteur peut donc être caché sous une sous une couche opaque, ce qui le rend invisible pour l'utilisateur et n'altère donc pas l'aspect esthétique de l'objet.

Partant de ces constations, nous avons donc conçu un prototype WatchIt (Figure 8.10), un bracelet de 2 cm de large composé de quatre potentiomètres résistifs, deux pour chaque demi-bracelet [10]. Les capteurs résistifs sont fixés sur un bracelet de tissu, monté lui-même sur une pièce plastique circulaire. Cette pièce de plastique rappelant l'aspect global d'un bracelet classique.

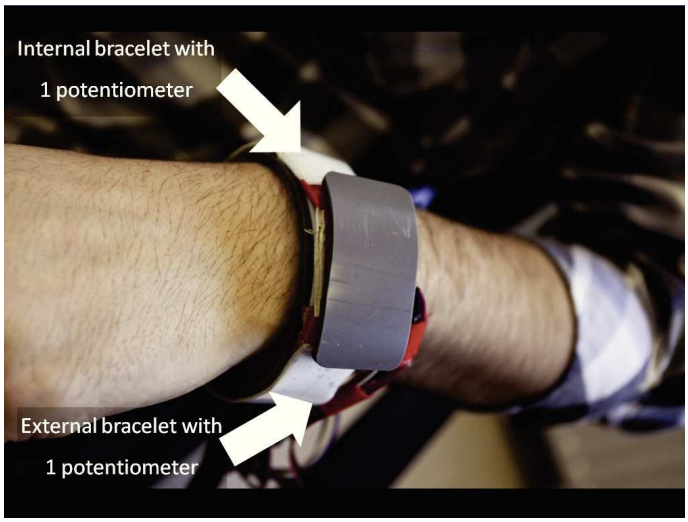


FIGURE 8.10 – Premier prototype WatchIt

Les capteurs (qui sont des potentiomètres) sont constitués de bandes minces ayant suffisamment de souplesse pour pouvoir être utilisées autour du poignet. Chacun fonctionne comme une résistance variable (max. 10 kΩ) avec une variabilité faible (moins de 1%) permettant de distinguer jusqu'à 1024 positions du doigt. Leur taille (81 mm de longueur x 7,5 mm de largeur x 0,5mm de hauteur) permet une intégration facile sur chaque demi-bracelet. La surface d'interaction disponible sur le bracelet complet est de 16 cm^2, ce qui est 2,3 fois plus que la surface disponible sur

9. Abracadabra est présenté comme une solution très économique en énergie : "Furthermore, power draw is negligible : 0.15mA at 90 samples/sec - considerably less than comparable active sensing methods", [Harrison and Hudson, 2009], seconde page, sous la Figure 1.

10. Ce que nous désignons sous le terme de demi-bracelet désigne les lanières individuelles situées de chaque côté du cadran d'une montre. Le demi-bracelet situé vers l'utilisateur sera dénommé "bracelet interne", alors que l'autre, qui est tourné vers l'extérieur sera dénommé "bracelet externe".

© 2013 TELECOM ParisTech

un écran tactile typique (environ 7 cm^2 pour un écran LCD d'1,5 pouce, la taille d'un iPod nano). Si l'on raisonne en termes de hauteur, dans la mesure où le capteur utilisé pour WatchIt est à une dimension, la totalité du bracelet interactif mesure 10 cm de haut, contre environ 3 pour un iPod nano, soit une longueur 3,3 fois plus importante pour WatchIt. Le prototype est interfacé avec un ordinateur en utilisant un microcontrôleur Arduino Fio, surmonté d'un module de communication sans fil Bluetooth et il est alimenté par une batterie externe. Le logiciel expérimental a été programmé en C# et en Java.

8.3.2 Vocabulaire gestuel

Pour exploiter notre prototype, nous avons décidé d'utiliser des gestes, combinables pour créer des interactions riches, tout en minimisant les ambiguïtés potentielles à la reconnaissance. Tous les gestes présentés ici sont combinés pour créer différentes techniques d'interaction soit pour de l'interaction "eyes-free", soit pour du contrôle continu. Nous avons donc considéré deux types de mouvements : des gestes de **pointage** et des gestes de **glissement**.

Pointage

Un geste de **pointage** sert typiquement à sélectionner un élément dans une liste ou appeler un raccourci. Il consiste en une brève pression du bout du doigt sur un demi-bracelet. Afin de rendre la technique robuste, nous avons séparé chaque demi-bracelet en trois zones :

1. une zone jouxtant l'écran (position haute),
2. une zone plus large au milieu (position centrale),
3. une zone près du fermoir (position basse).

Le fermoir et l'écran donnent un retour tactile passif, qui n'est pas disponible dans la zone centrale. Nous avons donc fait en sorte que cette zone soit plus vaste que les deux autres (2,4 cm de hauteur contre 1,3 cm). Ces valeurs ont été déterminées par des pré-tests.

Glissement

Un geste de **glissement** consiste à glisser le doigt le long d'un demi-bracelet, en se déplaçant soit vers l'écran (glissement vers le haut), soit vers le fermoir (glissement vers le bas). Les gestes de **glissement** peuvent être utilisés pour faire défiler une liste, ou fournir un contrôle continu fin. L'emplacement de départ du geste n'a aucune importance, ceci afin de rendre la technique plus robuste. Deux gestes de glissement sont donc disponibles sur chaque demi-bracelet, soit quatre gestes au total. Pour distinguer un geste de **glissement** d'un geste de **pointage** (qui consiste en une simple pression à un endroit donné), il faut calculer la valeur $\Delta x = \mid x_{release} - x_{touch} \mid$:

© 2013 TELECOM ParisTech

– Dans le cas d'un geste de **pointage**, cette valeur doit rester faible. Il arrive toutefois qu'en exécutant un tel geste, le doigt effectue un léger roulement vers le haut ou le bas, et que la valeur Δx augmente.
– Dans le cas d'un geste de **glissement**, cette valeur est plus importante. Néanmoins, il convient de ne pas choisir une valeur Δx trop élevée, afin d'obtenir une tolérance même pour des glissements de faible amplitude.

Nous avons fait des pré-tests pour déterminer une valeur seuil pour Δx qui permette une bonne détection des différents gestes. Nous avons obtenu une valeur optimale de 7 mm.

Gestes à double contact

Chacun de ces cinq gestes (3 de pointage et 2 de glissement) peut être effectué sur le bracelet interne ou externe. Cela conduit à un vocabulaire de 10 gestes qui peuvent être effectués en utilisant 1 seul doigt (donc nommés "gestes à 1 contact"). Nous avons aussi examiné les gestes qui combinent des contacts sur les bracelets opposés, avec un premier doigt (généralement le pouce) en contact avec le bracelet interne, et un autre doigt (généralement l'index) en contact avec le bracelet externe (Figure 1-c) ("gestes à 2 contacts"). La présence d'un doigt sur le bracelet externe est considérée comme un modificateur "tout-ou-rien", de sorte que sa position sur la bande n'a pas d'importance. Nous n'avons pas considéré d'autres possibilités de gestes à 2 contacts (par exemple, en utilisant le doigt sur le bracelet interne comme modificateur) pour éviter le risque confusion à la fois pour la reconnaissance et pour les utilisateurs. Une propriété intéressante des gestes à 2 contacts est qu'ils sont peu susceptibles d'être effectués par erreur, puisqu'ils nécessitent un double contact simultané. Nous listons sur le Tableau 8.1 les 15 gestes que nous utiliserons dans la suite de ce chapitre.

Type	Bracelet interne	Bracelet externe	Double contact
Glissement vers le haut	#1	#6	#11
Glissement vers le bas	#2	#7	#12
Pointage en haut	#3	#8	#13
Pointage au milieu	#4	#9	#14
Pointage en bas	#5	#10	#15

TABLE 8.1 – Liste des 15 gestes de notre vocabulaire

8.4 Expérience préliminaire

Afin de tester l'utilisabilité de notre premier prototype et le vocabulaire gestuel présenté précédemment, nous avons mené une étude préliminaire, dans laquelle les participants ont été invités à reproduire rapidement et avec précision un geste affiché sur un écran.

© 2013 TELECOM ParisTech

8.4.1 Participants

12 participants, dont deux femmes âgés de 25 à 37 ans (moyenne 28,6) ont pris part à cette étude.



FIGURE 8.11 – Participant lors de l'expérience préliminaire

8.4.2 Méthode

L'expérience consistait en cinq blocs consécutifs, y compris un bloc d'entraînement. Chaque bloc comprend quatre occurrences de chacun des 15 gestes, présentés dans un ordre randomisé. Chaque participant a effectué un total de 300 gestes (dont 60 pour l'entraînement). La Figure 8.11 montre les conditions d'expérience.

Les participants devaient reproduire un geste s'affichant sur l'écran rapidement et aussi précisément que possible. Chaque essai commençait quand l'utilisateur pressait la barre d'espace : une représentation visuelle du geste à effectuer (voir la Figure 8.12) s'affichait alors. Le temps d'exécution du mouvement était compté du moment où l'utilisateur relâchait la barre d'espace jusqu'à la fin du geste. Une fois l'essai terminé, le système affichait un retour binaire (geste correctement reconnu ou non). Les participants portaient le prototype sur leur poignet gauche et effectuaient les gestes de la main droite, tous les participants étant droitiers.)

© 2013 TELECOM ParisTech



FIGURE 8.12 – Exemple de stimulus de l'expérience préliminaire. Il s'agit ici du geste #4 du Tableau 8.1. Le "2" indique qu'il faut sélectionner la zone du milieu.

8.4.3 Résultats

Ci-dessous, nous considérons deux mesures dépendantes, le pourcentage de gestes correctement reconnus et le temps total pour compléter un essai correctement. Les figures 8.13 et 8.14 présentent respectivement les taux de réussite et les temps d'exécution de chacun de nos 15 gestes.

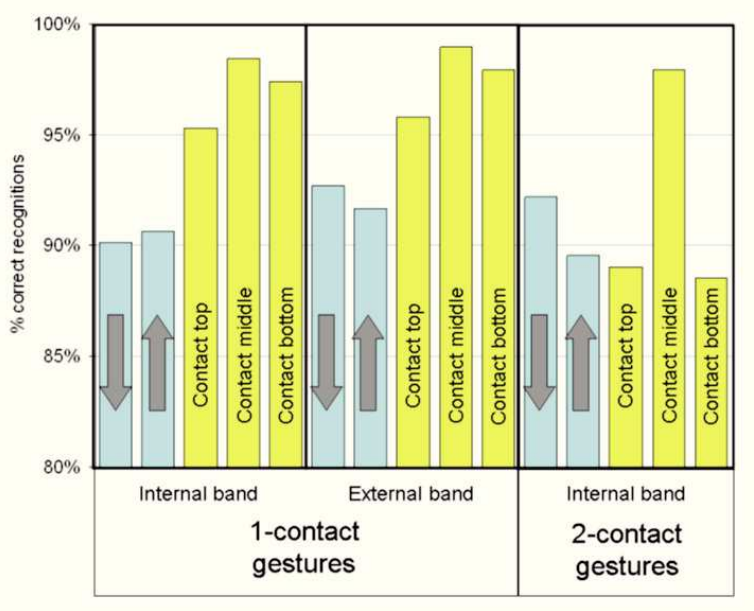


FIGURE 8.13 – Taux de réussite de chacun des 15 gestes.

© 2013 TELECOM ParisTech

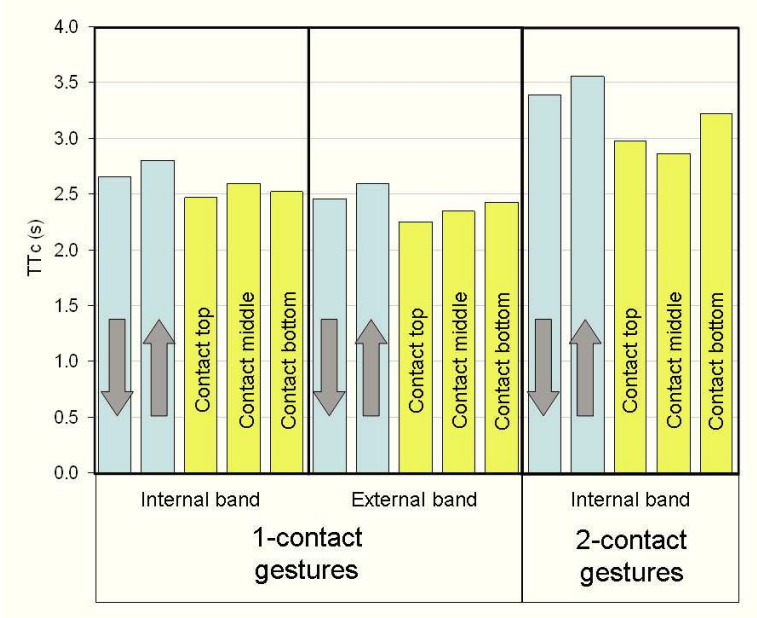


FIGURE 8.14 – Temps d'exécution de chacun des 15 gestes.

Gestes à 1 contact

Voyons d'abord les 10 gestes simples qui impliquent un seul contact, présentés dans les colonnes du milieu du Tableau 8.1. Dans l'ensemble, les gestes de pointage sont un peu plus rapides à effectuer que les gestes de glissement (2,44 vs. 2,63s, $t_{11} = 2,08$, $p = 0,031$) et ils sont mieux reconnus (97,3% vs. 91,3%, $t_{11} = 2,46$, $p = 0,003$). Ces résultats sont cohérents avec la très bonne précision de pointage sur surfaces courbes observés par [Roudaut *et al.*, 2011]. En règle générale, les taux de réussite des gestes à 1 contact restent donc au dessus de 90%. Si l'on s'intéresse au temps de réaction à proprement parler, on obtient un temps de réaction moyen de 1,05s pour les gestes à 1 contact, et 1,23s pour les gestes à 2 contacts. Il faut noter que le temps d'exécution est relativement long car l'utilisateur doit déplacer sa main de la touche espace du clavier jusque l'autre main. Un tel déplacement est assez représentatif du geste qu'il faudrait vraisemblablement effectuer dans la vie courante pour activer la technologie.

Pointage

En ce qui concerne le pointage, nous avons effectué une analyse de la variance à deux facteurs sur le pourcentage de reconnaissance et le temps total d'exécution, qui montre que la performance est légèrement meilleure pour les gestes effectués sur le bracelet interne, révélant une différence statistiquement significative pour la vitesse (2,34 vs. 2,53 s, $F_{1,11} = 6,1$, $p = 0,031$), mais pas pour la précision (97,6% vs. 97,0%, $F_{1,11} < 1$). Le pointage était généralement plus précis au milieu du bracelet (98,4% vs. 94% ; $F_{2,22} = 3,58$, $p = 0,045$), la tendance étant semblable mais non significative pour le temps (2,55s vs 2,63s ; $F_{2,22} = 1,38$, $p = 0,27$).

© 2013 TELECOM ParisTech

Glissement

Les taux de reconnaissance pour les glissements ne différaient pas significativement entre les deux bracelets et les deux directions (vers le haut ou le bas). Toutefois, les glissements à 1 contact pratiqués sur le bracelet interne étaient légèrement plus rapides que sur le bracelet externe (2,53 vs. 2,73s, $F_{1,11} = 11,75$, $p < 0,01$). De même, la direction basse était légèrement plus rapide à effectuer que la direction haute (2,56 vs. 2,70s, $F_{1,11} = 7,67$, $p = 0,018$). Ces effets ne représentent qu'une légère variation d'une performance globalement satisfaisante.

Gestes à 2 contacts

Terminons maintenant en comparant les cinq gestes à 2-contacts (colonne de droite du Tableau 8.1) à leur équivalent à 1 contact (sur le bracelet interne donc). En ce qui concerne le pointage, on constate une baisse de taux de réussite de 97,3% à 91,8% ($t_{11} = 3,82$, $p = 0,001$) ainsi qu'une augmentation du temps d'exécution de 2,34s à 3,02s ($t_{11} = 6,84$, $p < 0,001$). Pour les glissements, on constate une légère baisse non significative du taux de réussite (de 92,2% à 90,9%, $p = 0,28$) mais une augmentation significative du temps d'exécution, de 2,53s à 3.47s ($t11 = 8,63$, $p < 0,001$).

8.4.4 Discussion

Cette première expérience a donné des résultats encourageants qui montrent la faisabilité de la technique. Les taux de reconnaissance obtenus sont globalement bons, en particulier pour les gestes de pointage à un contact qui obtiennent une excellente moyenne de réussite de plus de 97%. Les différentes catégories de gestes obtiennent une moyenne proche de 90% (quoique deux gestes de pointage à 2 contacts soient légèrement en deça, comme illustré sur la Figure 8.13).

Nous avons produit une matrice de confusion, afin d'analyser plus en détail les causes d'erreurs. La plupart des erreurs sont survenues sur des gestes de glissement, 7,38% (en moyenne) de ceux-ci étant confondus avec des gestes de position. Ceci peut s'expliquer par des irrégularités à la surface du bracelet. De ce fait, lorsqu'un participant effectue un glissement le long du bracelet, les irrégularités (petites bosses ou creux) naturelles de cette surface peuvent causer de petites interruptions dans le signal (Figure 8.15), le capteur nécessitant une pression suffisante. En outre, nous avons constaté que notre prototype avait tendance à se déplacer légèrement et tourner autour du poignet lorsque l'utilisateur appliquait une trop forte pression du doigt.

La deuxième source d'erreurs provenait du fait que les gestes à 2 contacts étaient parfois reconnus comme des gestes à 1 contact (2,43% d'erreur). Ce problème se produit lorsque l'utilisateur relâche la pression sur un bracelet avant d'appuyer sur le second. Enfin, quelques erreurs provenaient de confusions de l'utilisateur (gestes effectués sur le mauvais bracelet, glissements accomplis dans

© 2013 TELECOM ParisTech

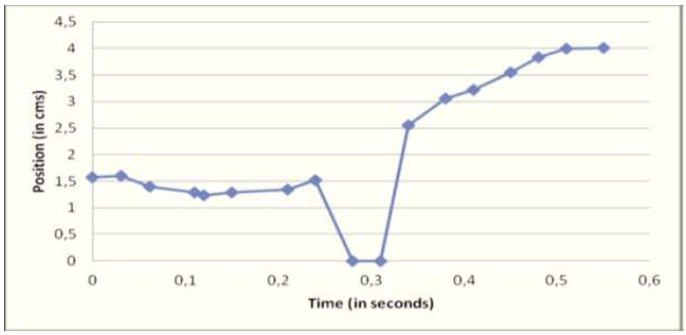


FIGURE 8.15 – Exemple de geste de glissement avec une perte de signal pendant 140 ms.

la mauvaise direction ou erreurs de zone de pointage).

Sur la base de nos observations dans cette première étude, nous avons construit un prototype amélioré. Tout d'abord, nous avons apporté des modifications au prototype physique afin de réduire le glissement autour du poignet de l'utilisateur. Pour ce faire, nous avons décidé d'utiliser un bracelet "slap" [11] (pourvu d'une lamelle de métal déformable) pour rendre la surface plus ferme. Par rapport au prototype précédent, qui utilise un anneau en plastique rigide, les mouvements sont sensiblement réduits en amplitude parce que le bracelet est maintenant porté directement sur le poignet. Un autre avantage de cette solution est que le nouveau prototype est très semblable au bracelet d'une montre classique. Ce prototype est illustré sur la Figure 8.16.

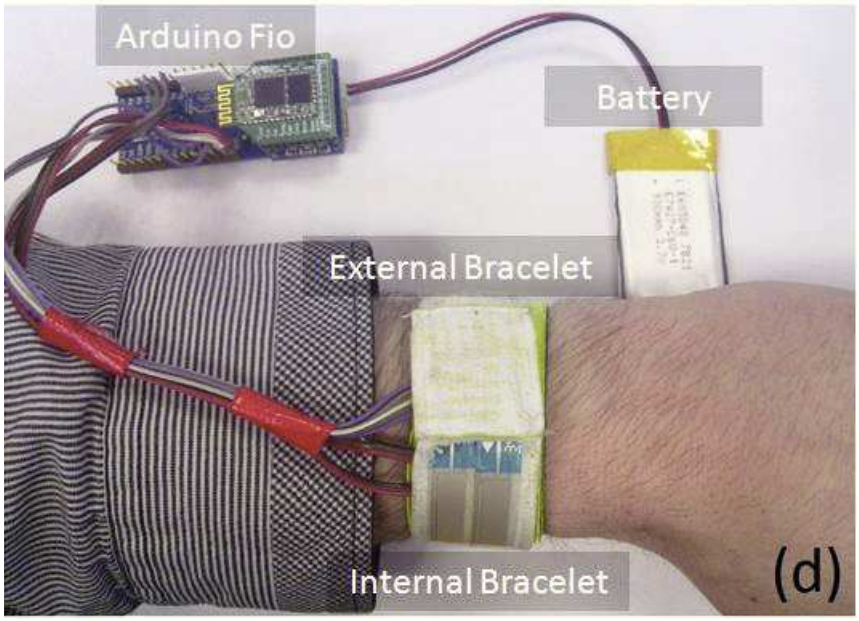


FIGURE 8.16 – Prototype final de WatchIt.

11. Un tel bracelet est composé d'une bande de métal déformable sur laquelle est placée du plastique réfléchissant, souvent de couleur jaune. Ce type de bracelet est utilisé par les cyclistes pour signaler leur présence sur une route peu éclairée.

© 2013 TELECOM ParisTech

8.5 Interaction "eyes-free"

8.5.1 Définition

La prochaine étape de notre expérimentation était d'évaluer la facilité d'utilisation de notre prototype pour l'interaction "eyes-free". Ce type d'interaction se produit dans de nombreuses situations où l'utilisateur ne peut pas regarder facilement son dispositif, et en particulier l'écran du dispositif, comme par exemple lors d'une activité de marche, de course, s'il tient une valise, ou si sa chemise couvre la montre. Ce type d'interaction est également susceptible de favoriser des micro-interactions plus discrètes, comme par exemple de refuser un appel lors d'une réunion. Enfin, l'interaction "eyes-free" est essentielle pour tout bijou qui ne dispose pas d'écran (comme un bracelet simple). Un bracelet peut en effet devenir un excellent dispositif d'entrée couplé à un téléphone, en particulier lorsque ce dernier n'est pas accessible (dans un sac, une poche...).

8.5.2 Menu Audio

En plus de la technique précédente, nous avons conçu une technique de menu audio pour l'interaction "eyes-free". Celle-ci fournit jusqu'à trois menus différents : deux (pour chaque bracelet, interne et externe), et une dans le cas de l'utilisation des deux bracelets simultanés. Chaque demi-bracelet est divisé en autant de zones qu'il y a d'éléments dans le menu associé. Toutes les zones font la même taille (comme dans earPod [Zhao *et al.*, 2007]), au contraire de notre technique basée sur les gestes où la zone du milieu est plus grande que les deux autres.

Cette technique est pratique d'utilisation pour les utilisateurs novices, qui peuvent facilement explorer tous les éléments du menu en faisant glisser leur doigt sur le bracelet, mais également pour les utilisateurs expérimentés, qui peuvent alors pointer directement sur la zone correspondant à l'élément recherché, ou, du moins sur une zone voisine. À chaque fois que le doigt change de zone, le nom de l'élément courant est prononcé par le système (retour audio). Ce retour en temps réel permet d'aider l'utilisateur à se repérer dans le menu. Comme earPod [Zhao *et al.*, 2007] et Nenya [Ashbrook *et al.*, 2011] nos menus audio utilisent l'interruption de la lecture d'un élément : si l'utilisateur change de zone alors que l'énoncé du nom de l'élément n'est pas terminé, la lecture est interrompue et le nouvel élément est énoncé. Cela permet de rendre la technique plus rapide à utiliser.

8.6 Expérience "eyes-free"

Dans cette étude, nous avons voulu évaluer le prototype WatchIt dans des conditions d'interaction "eyes-free". L'expérience a été menée sur deux facteurs distincts : le **bracelet** sur lequel avait lieu l'interaction (interne, externe, les deux), et la **technique d'interaction**, à savoir la technique

© 2013 TELECOM ParisTech

de menu audio (présentée en Section 8.5.2) ou celle basée sur le vocabulaire gestuel (présenté au Tableau 8.1) déjà utilisée pour l'expérience précédente. Chaque menu audio considéré contenait 5 éléments. Afin de nous assurer que les participants seraient bien dans un cadre d'interaction "eyes-free", ils devaient porter un tablier qui cachait leurs deux bras, pendant toute la durée de l'expérience.

8.6.1 Participants

Nous avons recruté 8 volontaires (1 femme) âgés entre 25 et 30 ans (moyenne d'âge 27,5).

8.6.2 Stimulus

Pour la technique gestuelle, nous avons utilisé les mêmes stimulus que dans l'expérience préliminaire (Figures 8.12 et 8.17-a), avec, pour les gestes de pointage, le numéro de la zone à sélectionner (1 : près de l'écran, 2 : au milieu, et 3 : près du fermoir).

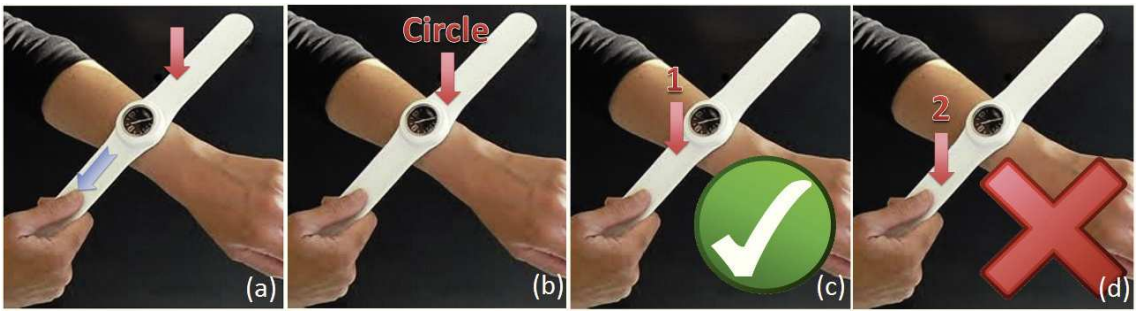


FIGURE 8.17 – Exemples de stimulus lors de l'expérience "eyes-free". a) Stimulus pour un geste de glissement à 2 contacts (geste #12 sur 8.1) ; b) Stimulus pour un élément du menu audio ; c) Retour affiché si le geste demandé est correctement effectué ; d) Retour en cas de geste incorrect.

En ce qui concerne la technique de menu, nous avons utilisé en guise de stimulus des noms du monde réél, comme dans earPod [Zhao *et al.*, 2007] et comme suggéré par [Miller, 1981]. Nous avons choisi des mots courts en anglais (Tableau 8.2), d'une ou deux syllabes afin qu'ils soient énoncés rapidement lors du retour audio. Il faut cependant noter que, comme pour la technique gestuelle, les stimulus (Figure 8.17-b) étaient uniquement visuels (le mot étant affiché à l'écran) ceci afin d'utiliser la même modalité pour les deux techniques. Note : la représentation des éléments dans le stimulus est uniquement visuelle, et équivalente à celle utilisée pour la technique dite gestuelle. Les éléments étaient ordonnés et placés sur les bracelets dans l'ordre alphabétique.

8.6.3 Méthode

L'expérience était divisée en deux phases distinctes :

© 2013 TELECOM ParisTech

Bracelet	Hiérarchie	Liste
Interne	Animaux	Cat, dog, eagle, horse, pig
Externe	Formes	Circle, ellipse, rectangle, square, triangle
Double contact	Couleurs	Blue, green, pink, red, white

TABLE 8.2 – Liste des 15 éléments utilisés pour la technique de menu audio.

1. une phase d'entraînement, afin que les participants puissent se familiariser avec les techniques d'interaction. Dans cette phase, les participants pouvaient regarder le bracelet et leurs bras. Cette phase se composait de 6 blocs (1 bloc pour chaque condition de technique $\times$ bracelet), avec 5 essais dans chaque bloc (soit les 5 gestes ou les 5 éléments du menu concerné).
2. une phase expérimentale propre, au début de laquelle les utilisateurs enfilaient le tablier pour masquer leurs bras.

La phase post-entraînement se décomposait en 5 séquences de 6 blocs (1 bloc pour chaque condition de technique $\times$ bracelet), avec 10 essais dans chaque bloc (2 répétitions des différents éléments/gestes). Au total, les utilisateurs ont donc effectué :

- 6 blocs $\times$ 5 gestes/éléments $\times$ 1 répétition = 30 essais d'entraînement.
- 5 séquences $\times$ 6 blocs $\times$ 5 gestes/éléments $\times$ 2 répétitions = 300 essais pour la phase expérimentale.

Le facteur **technique d'interaction** était fixé pour chaque participant (P1 commençait avec les gestes, P2 avec les menus), mais le facteur bracelet était randomisé pour chaque "séquence" de 6 blocs. Au cours de l'entraînement, les participants étaient encouragés à explorer le dispositif et à localiser les placements des différents éléments. Les participants (tous droitiers) portaient le prototype sur leur poignet gauche et effectuaient les gestes avec la main droite.

8.6.4 Tâche

Chaque bloc commençait par une indication de la technique d'interaction et le bracelet sur lequel interagir. Les participants étaient encouragés à prendre des pauses entre les blocs et lançaient chaque bloc en appuyant sur la barre d'espace. Au début de chaque essai, un stimulus visuel était affiché à l'écran (figures 8.17-a et b). Les participants devaient ensuite reproduire le geste indiqué à l'écran, ou sélectionner l'élément présenté, rapidement et avec précision. Ci-dessous, nous considérons deux mesures dépendantes, le pourcentage de réussite et le temps total d'exécution, mesuré à partir du moment de l'apparition du stimulus jusqu'à l'achèvement d'un geste ou la sélection d'un élément. Il convient de noter que le temps de réaction fait donc partie du temps d'exécution (nous observons un temps moyen de réaction de 1,14s, calculé depuis l'apparition du stimulus à l'écran jusqu'au début du premier geste sur le bracelet). Après reconnaissance d'un geste, le système montrait un retour avec une image du geste reconnu, ainsi qu'une indication sur la réussite ou non de l'essai (8.17-c et d). Après un délai de 3s, l'essai suivant commençait. En plus du retour visuel de fin d'essai, nous avons, comme expliqué précédemment, fourni un retour audio continu

© 2013 TELECOM ParisTech

pour la technique de menu, le système énonçant le nom de l'élément actuellement sélectionné.

8.6.5 Résultats

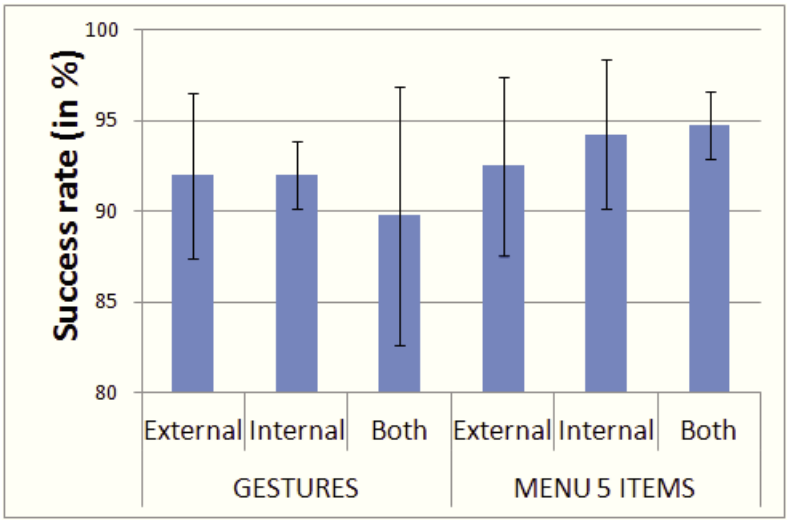


FIGURE 8.18 – Taux de réussite pour chaque combinaison de technique × bracelet. Les barres d'erreur indiquent l'écart type.

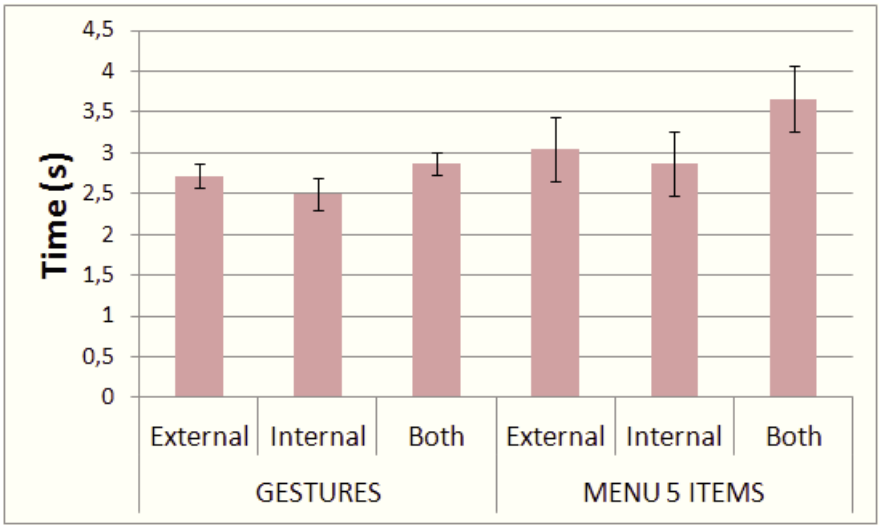


FIGURE 8.19 – Temps d'exécution pour chaque combinaison de technique × bracelet. Les barres d'erreur indiquent l'écart type.

Technique gestuelle

Pour les positions, une analyse de variance à deux facteurs (bracelet et zone) montre que seul le bracelet a un impact sur la précision globale (93,75% sur bracelet externe, vs. 92,9% sur le bracelet

© 2013 TELECOM ParisTech

interne vs. 86,25% pour le double contact, $F_{2,14} = 5,61$, $p < 0,01$). Aucun de ces deux facteurs n'a significativement impacté le temps d'exécution ($p > 0,05$). Grâce à notre nouvel algorithme plus tolérant sur la reconnaissance des glissements, on observe un taux de réussite comparable entre gestes de glissement et gestes de pointage (91,7% vs. 91%, $p = 0,37$), même si le temps d'exécution est un peu plus lent (2.84s pour le glissement vs. 2.59s pour le pointage, $t_7 = 2,88$, $p = 0,01$).Des résultats plus détaillés, geste par geste sont présentés sur les figures 8.20 et 8.21.

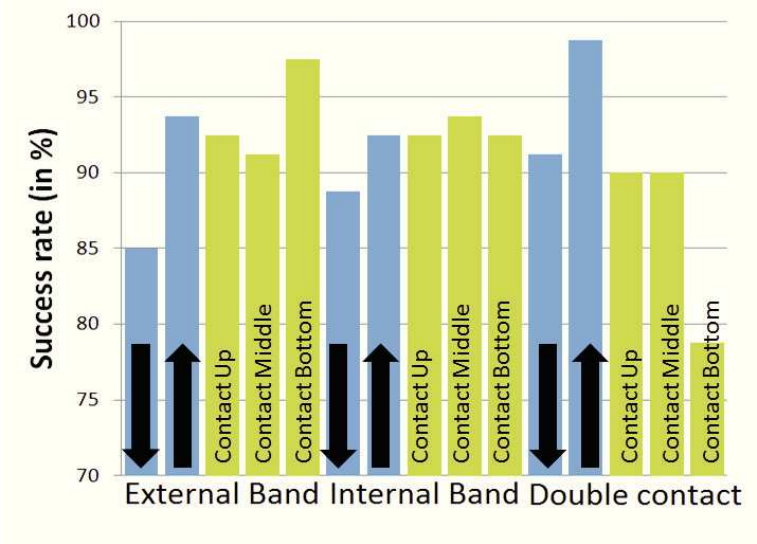


FIGURE 8.20 – Taux de réussite moyen pour chaque geste de notre vocabulaire.

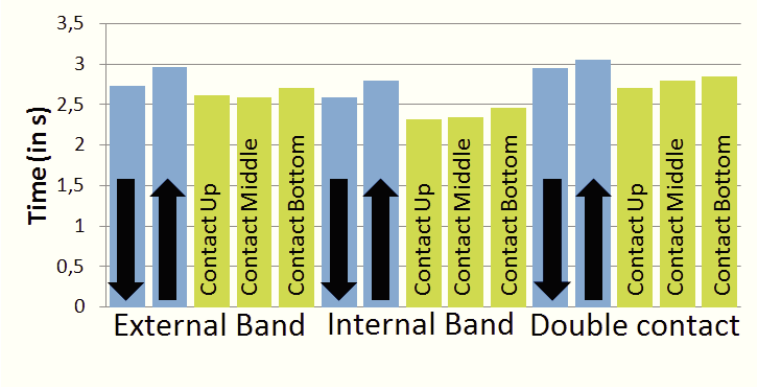


FIGURE 8.21 – Temps d'exécution moyen pour chaque geste de notre vocabulaire.

Menu audio

La technique menu audio a eu un taux de réussite élevé en général (94,75% pour les gestes à 2 contacts, 94,25% pour le bracelet interne et 92,5% pour le bracelet externe). Le facteur "bracelet" n'a toutefois pas d'effet significatif sur la précision ($F_{2,14} = 1,38$, $p = 0,29$), mais il en a un sur le temps d'exécution ($F_{2,14} = 11,96$, $p < 0,01$). Un test Tukey HSD met en évidence des différences,

© 2013 TELECOM ParisTech

en termes de temps d'exécution, entre les gestes à 2 contacts (3,66s de temps moyen) d'une part, et les gestes à 1-contact d'autre part ($p < 0,01$), mais pas entre les performances sur bracelet interne et externe (2,87s vs. 3,04s, $p > 0,05$).

Nous nous sommes également intéressé au placement des différents éléments du menu, et constaté que ce placement n'influe pas la précision ($F_{4,28} = 2,29$, $p = 0,09$), mais bien sur le temps d'exécution ($F_{4,28} = 10,33$, $p < 0,001$). Un test Tukey HSD a montré que les éléments placés près du fermoir et de l'écran sont plus rapides à acquérir que les trois éléments centraux (2,8s vs. 3,44s, $p < 0,01$).

8.6.6 Discussion

Cette expérience a montré que notre prototype WatchIt est parfaitement utilisable dans des conditions où l'utilisateur ne peut voir le dispositif. La technique de menu est plus précise mais aussi plus lente que la technique gestuelle. De même, l'interaction avec un seul point de contact est généralement plus rapide que l'interaction à 2 contacts (2,78s vs. 3,26s).

Avec la nouvelle version de l'algorithme de reconnaissance les glissements deviennent comparables au pointage en termes de précision mais prennent toujours un peu plus de temps à effectuer. Le taux moyen de réussite pour chaque geste de glissement est supérieur à 90% (Figure 8.20), sauf pour les deux glissements à un contact vers le fermoir (85% et 88,5%). Bien que de tels gestes soient faciles à réaliser sur une surface plane, la surface du bracelet suit la courbure du poignet humain. Du fait de cette courbure, le doigt peut glisser du bracelet et décoller de la surface, surtout si l'utilisateur effectue trop rapidement un mouvement vers le bas. Ceci peut également être vu comme résultant du fait que les capteurs résistifs nécessitent un certain niveau de pression. C'est donc un inconvénient de cette technologie, qui comporte d'autres avantages par ailleurs, comme expliqué à la Section 8.3.

Le pointage à 2-contacts dans la zone proche du fermoir obtient le pire taux de réussite (78,75%) en raison d'un problème inattendu. Certains utilisateurs avaient en effet tendance à effectuer ce geste en plaçant la main non dominante **au-dessus** du poignet, au lieu de faire le geste par le **dessous** du bracelet. Cela menait à une perte de contact lors du geste, ou tout simplement à une sélection dans la zone du milieu (au lieu de la zone du fermoir).

L'écran de la montre et le fermoir offrent des marques tactiles passives, qui sont spécifiquement utiles pour la technique de menu : on observe en effet des temps d'exécution significativement plus rapides pour les éléments placés près du fermoir ou de l'écran. En regardant les données détaillées, nous avons aussi observé que les participants tendaient à corriger de moins en moins, ce qui sug-

© 2013 TELECOM ParisTech

gère que les positions des éléments dans le menu ont été progressivement apprises.

8.7 Contrôle continu

La plupart des tâches mentionnées dans notre enquête impliquent du défilement de listes, qui peuvent parfois être longues, comme une liste de contacts ou une liste de lecture. De par leur taille, les petits écrans tactiles sont mal adaptés à cette tâche : le doigt ne peut par définition pas effectuer de grands déplacements et il cache en grande partie la liste où s'affiche l'élément recherché. De plus, le contrôle continu d'un widget analogique n'est pas non plus aisé pour les mêmes raisons.

Parce que la forme et l'orientation du bracelet les rendent pratique pour du défilement vertical, nous avons mis au point deux techniques d'interaction qui permettent la navigation de listes sur le bracelet. Pour des raisons pratiques et après des pré-tests, nous avons déterminé que le défilement serait plus efficace sur le bracelet interne de la montre, puisque cette position induit moins de fatigue pour la main qui interagit. En effet, le défilement sur le bracelet externe demande à l'utilisateur de déplacer son avant-bras et l'ensemble de sa main pour interagir, alors que le défilement sur le bracelet interne ne nécessite que de déplacer le pouce.

8.7.1 Technique de défilement sur le bracelet

La première technique que nous avons étudiée est une transposition de l'interaction classique sur écran tactile. Le défilement est effectué en faisant glisser le doigt sur le bracelet. Si au moment de relâcher, la vitesse de déplacement du doigt est suffisante, un défilement automatique de type "flicking" se produit [Baglioni *et al.*, 2011]. Le défilement est relatif, ce qui signifie que seule la vitesse finale du geste est prise en compte, alors que sa position de départ ne l'est pas. La vitesse de défilement ralentit progressivement d'après un coefficient de friction (noté f, avec $f \in [0;1]$). La vitesse de défilement à un instant t se calcule donc $v_t = v_{t-1} \times (1-f)$ [Baglioni *et al.*, 2011]. Compte tenu de la grande surface disponible sur le bracelet et surtout de sa longueur (5 cm sur le bracelet contre 2,5 cm sur l'écran d'un iPod nano), les gestes effectués peuvent couvrir de plus grandes amplitudes que sur l'écran d'une montre. En outre, ces gestes ne provoquent pas d'occultation sur l'écran.

8.7.2 Technique de pointage absolu

Le bracelet peut également servir de référentiel pour représenter l'espace de la liste. La seconde technique que nous avons étudiée repose sur une mise en correspondance de l'intégralité des éléments de la liste avec toute la longueur du bracelet. Cette technique permet une exploration rapide

© 2013 TELECOM ParisTech

de la liste : les premiers éléments se trouvent près de l'écran, tandis que les derniers sont proches près du fermoir. Il est de plus aisé de parcourir rapidement l'ensemble de la liste en pointant de haut en bas. Pour se déplacer dans la liste, l'utilisateur pointe simplement un emplacement sur le bracelet. S'il a dépassé l'élément qu'il souhaitait sélectionner, il peut simplement repointer légèrement plus haut sur le bracelet.

8.7.3 Note sur la validation

Les deux techniques présentées ci-dessus ne permettent que de faire de la navigation dans une liste, elles ne permettent pas de sélectionner un élément à proprement parler. Pendant l'expérience, les utilisateurs valident en sélectionnant directement sur l'écran tactile. Ce choix s'explique par deux raisons : tout d'abord, les utilisateurs sont libres d'utiliser l'écran tactile à tout moment de l'expérience qui suit (cf. Section 8.8.3), ensuite seule la navigation à proprement parler nous intéresse ici. Il existe de nombreux choix pour la validation comme l'utilisation d'une mire ([Baglioni *et al.*, 2011], cf. Figure 8.22), ou encore un geste à 2 contacts.



FIGURE 8.22 – Exemple de mire. L'élément du milieu de la liste, ici "Bhutan", apparaît sous la mire (en surbrillance cyan). Cet élément sera sélectionné lorsque l'utilisateur cessera son mouvement.

8.8 Expérience de défilement de liste

Dans cette étude, nous avons voulu évaluer l'efficacité des deux techniques présentées en Section 8.7. Les participants étaient invités à sélectionner un élément situé à différentes distances [12] dans la liste. Nous avons comparé nos deux techniques à une technique de base, l'interaction sur l'écran tactile. Les trois facteurs testés dans cette expérience étaient : la **technique** d'interaction (défilement sur le bracelet, pointage absolu sur le bracelet et défilement sur écran tactile), la taille de la liste (15 éléments pour la "petite" liste, 60 pour la moyenne, et 240 pour la longue) et la **distance** entre les éléments (5, 10, 20, 40, 80 et 160 éléments).

12. Par "distance", nous entendons ici la distance entre l'élément courant et l'élément à sélectionner.

© 2013 TELECOM ParisTech

8.8.1 Participants

Nous avons recruté 12 volontaires (1 femme) âgés de 23 à 31 ans (moyenne : 27,4 ans).

8.8.2 Stimulus

Nous avons utilisé trois différentes longueurs de listes dans l'expérience : une liste courte (15 éléments) contenant des noms de ville, une liste moyenne (60 éléments) contenant des noms d'états et territoires américains, et une longue liste (240 éléments) contenant des noms de pays et territoires. Les éléments des listes étaient tous en anglais et ordonnés par ordre alphabétique. Nous avons considéré 6 distances différentes entre les éléments : 5, 10, 20, 40, 80 et 160 éléments, comme expliqué dans le Tableau 8.3.

Taille de liste	Distances (en nombre d'éléments)
Petite	5
Moyenne	5, 10, 20
Grande	5, 10, 20, 40, 80, 160

TABLE 8.3 – Distances entre les éléments testés selon la taille de la liste

8.8.3 Méthode

L'expérience se décompose en deux phases :

1. une phase d'entraînement, comprenant 9 blocs (1 par combinaison de technique $\times$ longueur de liste), où les participants pouvaient s'entraîner à prendre en main les différentes techniques. Chaque bloc comprenait une occurence de chacune des distances à tester (le nombre de distance dépend de la longueur de la liste, cf. Tableau 8.3).
2. une phase expérimentale, où les résultats étaient enregistrés.

Cette dernière phase se décomposait aussi en 4 séquences de 9 blocs (1 par combinaison de technique $\times$ longueur de liste). Au sein d'un bloc, chaque distance était testée 2 fois (donnant donc de 2 à 2×6=12 essais par bloc selon la longueur de la liste). Pour résumer, chaque participant effectuait un total de :

- 3 techniques $\times$ (1 + 3 + 6) distances (selon la longueur des listes) = 30 essais en entraînement.
- 4 séquences $\times$ 3 techniques $\times$ (1 + 3 + 6) distances $\times$ 2 répétitions = 240 essais dans la phase expérimentale.

Nous avons fixé l'ordre des techniques d'interaction pour chaque participant (P1 commençait avec la technique de base, P2 avec le défilement sur le bracelet, P3 avec le pointage absolu), et les longueurs de listes testées l'étaient dans l'ordre croissant. Au cours de l'entraînement, les participants étaient vivement encouragés à utiliser le bracelet pour se familiariser avec le dispositif. Après l'entraînement, les participants étaient informés qu'ils pouvaient également utiliser l'écran tactile

© 2013 TELECOM ParisTech

à n'importe quel moment, dans toutes les situations, et quelle que soit la technique d'interaction testée. Nous avons fait ce choix parce que nous voulions voir quel canal d'entrée serait préféré par les utilisateurs et s'ils se sentaient à l'aise avec le bracelet.

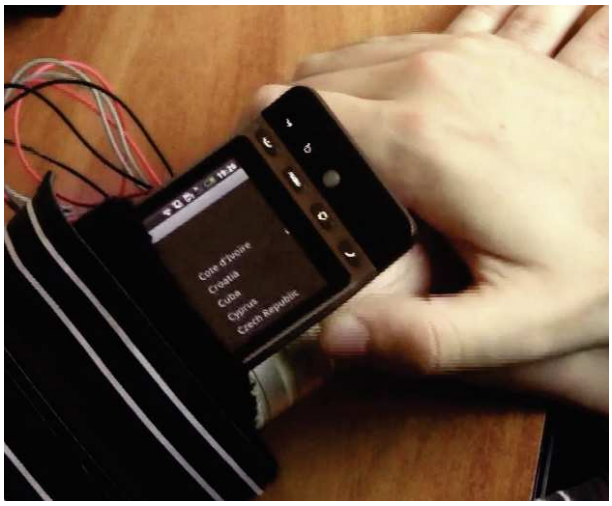


FIGURE 8.23 – Utilisation d'un smartphone HTC Hero pour simuler l'écran de la montre.

Tous les participants étaient droitiers et portaient le prototype à leur poignet gauche. Pour simuler l'écran, nous avons utilisé un téléphone HTC Hero sous Android 2.1 (Figure 8.23) fixé sur le poignet de l'utilisateur (une solution déjà mise en place dans [Ashbrook *et al.*, 2008a]). Nous avions couvert le surplus de surface avec une fine couche de matière plastique opaque, laissant un petit rectangle visible de la taille d'un écran de montre classique (soit 1,5" de diagonale). La Figure 8.24 représente un participant pendant l'expérience.

8.8.4 Tâche

Chaque bloc commençait avec l'indication de la technique impliquée. Les participants étaient libres de prendre des pauses entre les blocs et lançaient les blocs en appuyant sur la barre d'espace. Au début de chaque essai, le nom de l'élément à atteindre était affiché au centre de l'écran. Les participants devaient alors sélectionner cet élément dans la liste le plus rapidement et précisément possible. Nous avons mesuré le temps de navigation, lequel débute au moment où l'utilisateur commence son premier geste de navigation (geste de défilement sur le bracelet ou l'écran, ou pointage sur le bracelet) et se termine à la fin du dernier geste de navigation du participant, c'est-à-dire le geste précédant la sélection à proprement parler. À l'issue d'un essai, un compte à rebours de 3 secondes indiquait le début du prochain essai.

© 2013 TELECOM ParisTech

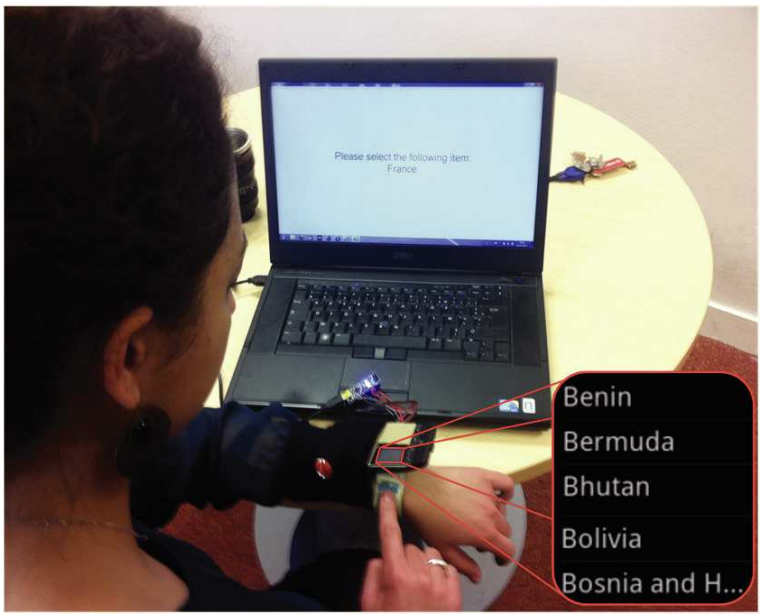


FIGURE 8.24 – Participant à l'expérience de défilement de listes.

8.8.5 Résultats

Nous avons conduit une analyse de variance à deux facteurs sur la technique et la distance qui montre que ces deux facteurs ont un effet significatif sur le temps de navigation. Pour le facteur technique, le temps de navigation varie beaucoup, la technique de pointage absolu ayant un léger avantage sur la technique de défilement sur écran tactile et celle de défilement sur le bracelet (4,82 vs. 5,47 vs. 7,5 s, $F_{2,11} = 64,6$, $p < 0,01$). Sans surprise, le temps de navigation a tendance à augmenter avec la distance de la cible ($F_{5,11} = 134,7, p < 0,01$), sauf pour la technique de pointage absolu, où le temps reste constant à environ 6 secondes pour les longues distances (40, 80 et 160 éléments), comme indiqué sur la Figure 8.26.

Définissons maintenant deux notions de longueur de geste.

1. La première est une distance "simple", qui se caractérise comme la distance entre le point de contact et le point de relâchement du geste (qu'on peut noter ainsi : $d = \mid x_{release} - x_{touch} \mid$). Sur la Figure 8.25, cette distance correspond exactement à la norme du vecteur $\overrightarrow{AD}$.
2. La seconde est une distance cumulée, qui décompose le geste en sous-gestes intermédiaires, tenant ainsi compte des éventuelles corrections. Cette distance cumulée se décrit donc comme $d_{cumulee} = \sum_{t=touch}^{release} \mid x_t - x_{t-1} \mid$. Sur la Figure 8.25, elle correspond donc à la somme des normes des trois vecteurs $\overrightarrow{AB}$, $\overrightarrow{BC}$ et $\overrightarrow{CD}$.

Une de nos hypothèses était que les gestes de défilement seraient plus amples sur le bracelet que sur l'écran. La distance moyenne (distance simple) d'un geste de défilement (définie comme $d = \mid x_{release} - x_{touch} \mid$) était légèrement plus élevée sur le bracelet (1,54 cm/geste sur le bracelet vs. 1,47 cm/geste sur l'écran, $t_{11} = 1,85$, $p = 0,04$). Si l'on s'intéresse maintenant à la distance

© 2013 TELECOM ParisTech

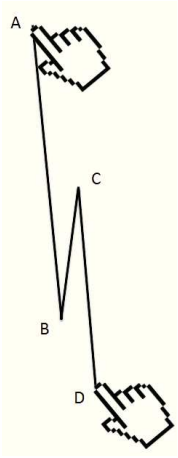


FIGURE 8.25 – Un exemple de mouvement avec correction. Le geste commence en *A* et finit en *D*. Le geste est ici décomposé en trois sous mouvements (*AB*, *BC* et *CD*).

cumulée (comprenant donc les corrections), elle est de 2,62 cms/geste sur le bracelet vs. 1,64 cms/gestes sur l'écran ($t_{11} = 12,79$, $p < 0,01$). Le nombre moyen de gestes de défilement est aussi plus élevé sur l'écran tactile, compensant donc leur plus faible amplitude, de 4,52 gestes/essai en moyenne sur l'écran à 3,43 gestes/essai sur le bracelet ($t_{11} = 2,98$, $p = 0,01$).

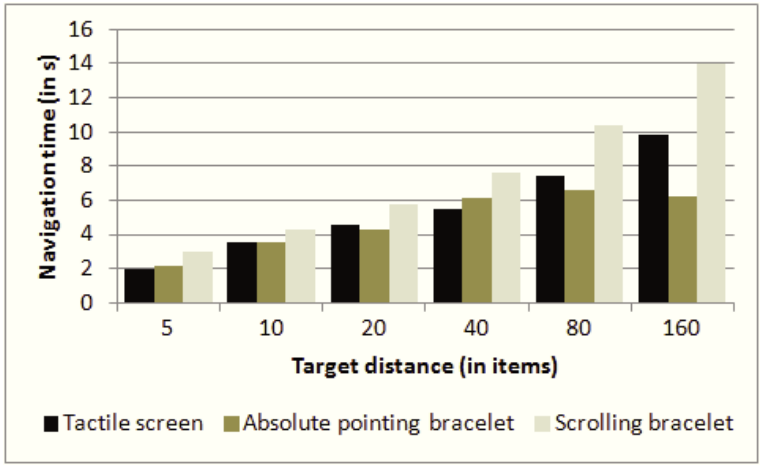


FIGURE 8.26 – Temps de navigation en fonction de la distance de la cible.

Interaction sur l'écran tactile

En tant que technique de base, les utilisateurs avaient tendance à être plus familiers avec cette technique. Une métrique intéressante est la distance moyenne de chaque geste. Alors que l'écran mesure 2,5 cm de hauteur (ce qui permet l'affichage de 5 éléments sur l'écran), les résultats montrent une moyenne de seulement 1,47 cm/geste. Cela signifie que l'utilisateur a tendance à n'utiliser que 60% de la surface de l'écran.

© 2013 TELECOM ParisTech

Pointage absolu sur le bracelet

La Figure 8.26 montre que le temps de navigation reste assez constant pour les longues distances. Un test Tukey HSD confirme qu'il n'y aucune différence statistiquement significative pour toutes les distances supérieures ou égales à 40 éléments. La distance impacte aussi le nombre de gestes de pointage effectués par les participants lors d'un essai ($F_{5,55} = 12,23$, $p < 0,01$). On obtient en effet 1,29 pointage/essai pour les distances de cibles de 5 et 10 éléments d'une part, et 2,55 pointages/essai pour les distances de 20 à 160 éléments d'autre part. Avec cette technique, la longueur de la liste est un facteur important : sans surprise, le pointage absolu est plus facile sur une liste courte que longue.

Pour déterminer la qualité du pointage absolu, nous avons considéré la distance $d_{cible} = | x_{cible} - x_{pointe} |$ [13] entre l'élément sélectionné par le dernier pointage absolu et l'élément visé. Pour rappel, l'écran de la montre affichant 5 éléments, avec l'élément pointé se trouvant au milieu. On peut en déduire que si $d_{cible} \leq 2$ éléments, alors l'élément ciblé est affiché à l'écran. La longueur de la liste a un impact sur cette valeur d_{cible}, d'une distance moyenne de 1,23 élément pour les listes courtes, elle passe à 3,39 éléments sur les listes moyennes et 10,36 éléments sur listes longues ($F_{2,22} = 138,96$, $p < 0,01$). Ceci implique que les utilisateurs utilisent la technique de pointage absolue pour s'approcher au plus près de la cible, et utilisent ensuite l'écran tactile pour ajuster, au moins dans le cas des listes moyennes et longues (puisque $d_{cible} \geq 2$ éléments).

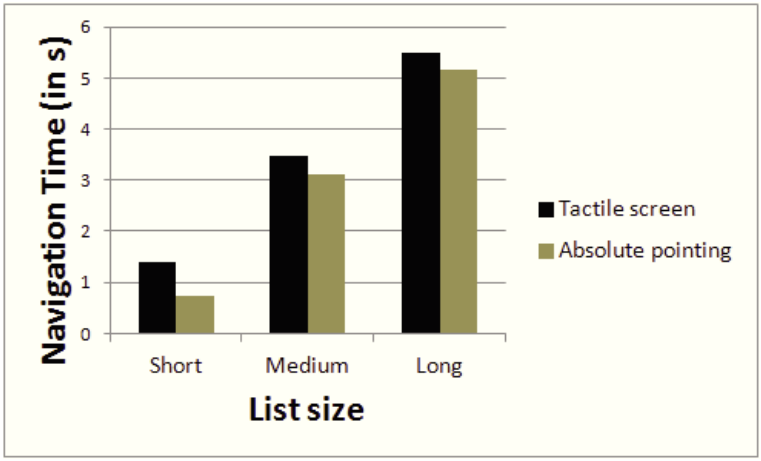


FIGURE 8.27 – Comparaison du temps de navigation entre le pointage absolu sur le bracelet et l'interaction classique sur l'écran tactile. Ces temps de navigation moyens tiennent compte de toutes les valeurs de distances testées. Les résultats par valeurs de distance sont présentés en Figure 8.26.

13. Contrairement aux autres mesures de distances, d_{cible} est une distance exprimée ici en éléments, et non en cms. Ceci permet de raisonner de manière plus simple en termes d'affichage.

© 2013 TELECOM ParisTech

Dans l'ensemble, le pointage absolu est la technique de navigation la plus rapide. Dans le cas de petites listes, le pointage absolu est presque deux fois plus rapide que la technique de base (0,74s vs. 1,4s, $t_{22} = 3,69$, $p < 0,01$), comme indiqué sur la Figure 8.27. Il est également plus rapide pour les distances de 80 (6,57s vs. 7,44s ; $t_{22} = 2,54$, $p = 0,04$) et 160 éléments (6,2s vs. 9,84s, $t_{22} = 4,89$, $p < 0,01$) (cf. Figure 8.26).

8.8.6 Discussion

Les deux techniques d'interaction sur le bracelet ont eu des performances différentes en termes de temps de navigation. Tout en soulignant que la technique de pointage absolue sur le bracelet était la plus rapide dans l'ensemble, on peut noter que le défilement sur le bracelet ne parvient pas à d'aussi bons scores. Lorsqu'à la fin de l'expérience, nous avons interrogé les participants sur les préférences subjectives, la technique de pointage absolue a été plébiscitée, pour sa précision et sa simplicité d'utilisation, particulièrement sur les longues listes. Neuf participants (sur 12) ont déclaré qu'elle était également bien adaptée pour les listes courtes.

Bien que les participants fussent conscients du fait qu'ils étaient autorisés à interagir avec l'écran tactile à tout moment, ils avaient tendance à ne pas trop s'en servir, même pour la technique de défilement sur bracelet. Nous avons observé une moyenne de seulement 1,02 geste sur l'écran tactile par essai de la technique de défilement sur bracelet, et 1,93 geste sur l'écran/essai pour la technique de pointage absolu. Six participants (sur 12) ont aimé cette technique, en dépit de ses mauvaises performances globales, parce qu'elle leur permettait d'explorer la liste "tranquillement". Ils ont ajouté qu'il était difficile de faire de l'exploration sur l'écran tactile (à cause de l'occultation). Un autre bon point de cette technique est la longueur des gestes de défilement et donc, leur nombre réduit : moins de gestes de défilement impliquent moins de "clutching". Nous imputons les moindres performances de la technique de défilement sur le bracelet au défilement automatique associé (si le doigt relâche la pression à une vitesse suffisante, la liste défile automatiquement, cf. Section 8.7.1). En effet, puisque les utilisateurs ont à fournir une pression plus forte pour activer le bracelet, cela créé une friction, qui ralentit le doigt, et pénalise le déclenchement du défilement automatique. Cette différence s'explique par la technologie utilisée : capacitive pour l'écran, où un seul contact suffit, contre résistif pour le bracelet. Une solution pourrait être de placer un matériau plus glissant sur le bracelet.

© 2013 TELECOM ParisTech

8.9 Discussion sur WatchIt

8.9.1 Utilisation "eyes-free"

L'expérience "eyes-free" nous a prouvé que notre prototype WatchIt est parfaitement utilisable dans un contexte où l'attention de l'utilisateur est focalisée sur son environnement, et où il ne peut pas facilement regarder le dispositif. Le type d'interaction qu'un utilisateur peut vouloir effectuer dans ce type de contexte est une interaction ponctuelle et rapide (moins de 4 secondes), c'est-à-dire une "micro-interaction" telle que définie par Ashbrook.

La technique de menu audio a été la technique la plus précise dans cette expérience, qui a fourni jusqu'à 3 menus distincts de 5 éléments. Cette technique permet d'obtenir un grand taux de réussite (93,83% en moyenne) et a été décrite par les utilisateurs comme plus facile à utiliser.
La technique gestuelle, tout en ayant un taux de réussite légèrement plus faible (91,25%), offre jusqu'à 15 commandes simples qui peuvent être utilisées comme raccourcis, ce qui est suffisant pour la plupart des tâches souhaitables (en particulier celles décrites dans la Section 7.1.4). Sa vitesse d'exécution très rapide est un autre avantage pour les micro-interactions. Certains participants ont été parfois frustrés par la technique gestuelle parce qu'elle ne permet pas de corriger un geste une fois que celui-ci est commencé. Il est ainsi vraisemblablement nécessaire d'ajouter une séquence d'annulation, par exemple en détectant quand l'utilisateur secoue son poignet.

8.9.2 Utilisation pour du contrôle continu précis

L'expérience de défilement de liste met en avant les bons résultats de la technique de pointage absolu sur le bracelet, laquelle ne se trouve battue en termes de vitesse que dans deux conditions de distances sur six testées. La technique a été aussi appréciée par la majorité des participants à l'expérience. En outre, l'expérience réalisée prouve que les utilisateurs sont capables d'utiliser l'intégralité du bracelet pour interagir.

Le défilement sur bracelet, même s'il obtient de moins bons résultats, a tout de même été apprécié par les participants, en particulier pour explorer des listes avec des éléments inconnus, grâce à la longue surface verticale accessible. Pour améliorer cette technique, il serait intéressant de limiter les frottements sur le bracelet, ce qui permet d'effectuer moins de gestes que sur l'écran pour le défilement. Cette technique protège aussi de l'occultation, et de l'imprécision du pointage direct sur l'écran.

La dernière expérience se plaçait dans une situation où un écran tactile est présent. Mais ce n'est pas forcément le cas pour d'autres dispositifs comme par exemple, l'écran de la montre Pebble [Pebble, 2013]. Sur de tels dispositifs, les possibilités d'interaction sont donc limitées (et réduite à

© 2013 TELECOM ParisTech

deux boutons physiques dans le cas de la Pebble). Le concept WatchIt offre une solution alternative viable à l'écran tactile, en cumulant trois avantages majeurs :

1. la (très) faible consommation électrique, qui fait que l'ajout de WatchIt n'influera que très peu sur l'autonomie de l'appareil
2. la possibilité d'utiliser le bracelet même dans des contextes défavorables (interaction "eyes-free").
3. la possibilité d'avoir un contrôle (très) fin dans le cadre d'un défilement de listes, avec les deux techniques proposées.

8.10 Applications

Les techniques d'interaction présentées dans ce chapitre sont utiles dans des situations complémentaires :

– L'expérience "eyes-free" permet d'interagir dans les cas où l'utilisateur ne peut pas regarder l'écran de la montre, ou dans les cas où l'écran lui même est éteint. Dans ce cas, les techniques proposées en Sections 8.3 et 8.5.2 permettent une utilisation ponctuelle efficace.
– L'expérience de défilement de liste permet d'interagir dans des cas où l'utilisateur souhaite un contrôle fin et rapide. Les techniques présentées en Section 8.7 sont particulièrement utiles dans ce cas.

8.10.1 Cas d'utilisation général de WatchIt

Lorsque l'écran de la montre est éteint, WatchIt peut être utilisé en mode "eyes-free", grâce la technique gestuelle et/ou menu audio, fournissant ainsi un accès rapide à quinze raccourcis. Ce nombre suffit pour couvrir la majorité des tâches présentées à la Section 7.1.4. Pour activer l'écran, l'utilisation d'un geste à 2-contacts (comme par exemple le geste de pointage près de l'écran) semble prometteur, puisque leur principal avantage est d'être peu sensibles à une activation accidentelle, en plus d'avoir un bon taux de réussite.

Une fois cette activation réalisée, la montre passe alors dans un mode d'interaction "précis", offrant les techniques de défilement activées sur le bracelet. Après une période d'inactivité de l'utilisateur, l'écran se verrouille de nouveau et repasse en mode "eyes-free".

8.10.2 Scénarios

Nous proposons maintenant deux scénarios d'utilisation plus concrets :

© 2013 TELECOM ParisTech

Gestion d'une application musicale

Nous envisageons un utilisateur contrôlant son lecteur MP3 en situation de mobilité, par exemple dans des transports en commun. L'utilisateur va vouloir invoquer ponctuellement des commandes telles que lecture/pause (par des gestes de pointage simples), et même éventuellement contrôler le volume (par un glissement à 2 contacts), en utilisant la technique gestuelle. Quand il aura plus de temps, il souhaitera sans doute éditer sa liste de lecture. Pour cela, après déverrouillage de l'écran par un geste de pointage à 2 contacts, l'utilisateur pourra naviguer dans de grandes listes de lecture avec les techniques de défilement présentées précédemment.

Vérification de la messagerie

Un autre scénario serait d'utiliser la technique de menu audio pour naviguer dans la liste des messages les plus récents, le système lisant l'intitulé puis un résumé rapide de chaque message. Après avoir sélectionné un message en particulier, il serait alors possible de sélectionner des options comme par exemple répondre à l'aide de messages préenregistrés ou directement envoyer un message vocal.

8.11 Conclusion et perspectives

Au cours de ce travail, nous avons effectué une vaste exploration des possibilités offertes par WatchIt. Ce travail qui apporte des solutions pour l'interaction "eyes-free", permet d'éviter l'occultation de l'écran de même que le "fat finger problem" et enfin de faire du contrôle continu précis. Nous allons maintenant présenter un certain nombre d'évolutions possibles pour notre prototype actuel.

8.11.1 Perspectives sur les techniques d'interaction

Technique gestuelle

À l'heure actuelle, il n'est pas possible d'annuler un geste en cours d'exécution. De nombreux participants ont réclamé une telle possibilité. Une solution qui nous semble élégante et implémentable facilement serait par exemple que l'utilisateur secoue son poignet rapidement pour annuler l'interaction en cours. La détection d'un tel geste est aisée avec un accéléromètre et ce type de capteur est embarqué dans pratiquement tous les produits commerciaux.

Menu audio

Notre technique de menu audio peut aussi être améliorée, en augmentant par exemple le nombre d'éléments dans le menu. Dans l'expérience de défilement de liste, et pour la technique de défi-

© 2013 TELECOM ParisTech

lement sur le bracelet, l'espace du bracelet interne était divisé en 10 zones de 0,5 cm. Il serait intéressant de tester l'utilisabilité d'une technique de menu audio à 10 éléments, au moins sur le bracelet interne dans un premier temps.

Techniques de défilement

Les deux techniques de défilement que nous avons proposées ont chacune un intérêt distinct quoique complémentaire. Alors que la technique de pointage absolue permet un déplacement très rapide dans une liste, la technique de défilement, elle, permet une exploration en profondeur sans souffrir d'occultation. Associer les deux techniques de défilement sur bracelet en une technique hybride semble intéressant. Il suffirait d'utiliser des gestes à 2 contacts pour le pointage absolu, pour se placer à une position proche de l'élément ciblé. Ensuite, en utilisant des gestes simples à un contact, il est facile d'atteindre rapidement l'élément ciblé. Cette combinaison en une technique hybride permettrait aussi de s'affranchir de l'interaction sur l'écran tactile.

8.11.2 Limitations technologiques et perspectives d'utilisation d'une technologie capacitive

Pour WatchIt, nous avons utilisé une technologie résistive. Les avantages et inconvénients de cette technologie ont déjà été débattus dans la section 8.3.1. La principale limitation des potentiomètres utilisés est le fait qu'ils ne donnent une information de position que sur une seule dimension. Même si ceci n'impacte pas le défilement de listes et de sliders verticaux, la navigation sur une carte est impossible.

À l'heure actuelle, le trop petit écran d'une montre rend l'utilisation et la lisibilité d'une carte hasardeuse, mais en déportant les opérations de navigation (pan et zoom notamment) sur le bracelet, il deviendrait possible d'utiliser des applications de guidage GPS. L'utilisation d'une technologie capacitive permet de passer l'interaction à deux dimensions, et donc de s'affranchir de cette limitation.

L'utilisation d'une technologique capacitive rendrait aussi possible l'utilisation de gestes à plusieurs points de contacts utilisés sur les téléphones portables, comme par exemple le pincement (qui permet de zoomer ou dézoomer) ou des gestes de rotation à deux doigts, tout cela bien sûr au détriment d'une consommation d'énergie plus importante.

© 2013 TELECOM ParisTech

8.11.3 Utilisation des deux potentiomètres sur chaque demi-bracelet : implémentation d'un lecteur musical

Nous avons implémenté un logiciel complet de lecture de fichiers audio, à des fins de démonstration. Contrairement aux expériences décrites dans ce chapitre, ce logiciel tire parti du fait que chaque demi-bracelet est pourvu de deux potentiomètres distincts : nous utilisons donc du "pseudo"-multitouch. Ceci permet aussi l'utilisation de gestes impliquant trois contacts simultanés.

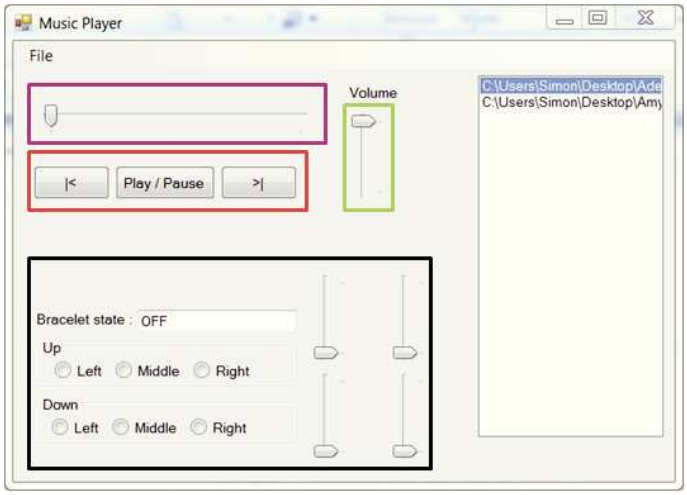


FIGURE 8.28 – Interface du logiciel de lecture musicale. Le **rectangle noir** indique l'état du bracelet, avec les sous-états associés aux bracelets externe et interne. Enfin, les 4 sliders indiquent les valeurs individuelles de chaque potentiomètre. Le **rectangle violet** indique l'état de la lecture dans la chanson courante. Le **rectangle rouge** présente les commandes de base (précédent, lecture, suivant), et le **rectangle vert** indique l'état du volume. Enfin, la liste de lecture se trouve sur la partie droite de la fenêtre.

Gestes à 2 contacts simultanés sur le même demi-bracelet

Avec l'utilisation des deux potentiomètres de chaque demi-bracelet, il est possible de distinguer des gestes à un et 2 contacts sur chaque bracelet. L'utilisation de deux points de contacts simultanés sur un même bracelet rend l'interaction un peu plus difficile. Il faut donc réserver ce type de geste à des interactions plus rares. Dans le cas d'un lecteur de musique, nous avons décidé d'utiliser le glissement à 2 doigts sur le bracelet interne pour naviguer rapidement à l'intérieur d'une chanson.

Gestes à 3 contacts simultanés

Une autre extension possible de l'utilisation des deux potentiomètres de chaque demi-bracelet vise à interagir sur les deux bracelets simultanément avec 3 ou 4 points de contacts. Dans un

© 2013 TELECOM ParisTech



FIGURE 8.29 – Illustration d'un geste de glissement à 2 contacts simultanés sur le bracelet interne.

premier temps, nous avons testé les interactions à 4 points de contact et remarqué que le positionnement des doigts rendait de telles interactions pratiquement impossibles. En demandant à des utilisateurs d'imaginer une position confortable à 3 doigts, nous avons déterminé qu'une telle position implique de placer le pouce sur le bracelet interne, puis le majeur et l'index respectivement sur le potentiomètre gauche et droite du bracelet externe. De cette position de repos, il est possible d'effectuer trois "taps" différents, en levant puis reposant un des doigts (Figure 8.30).

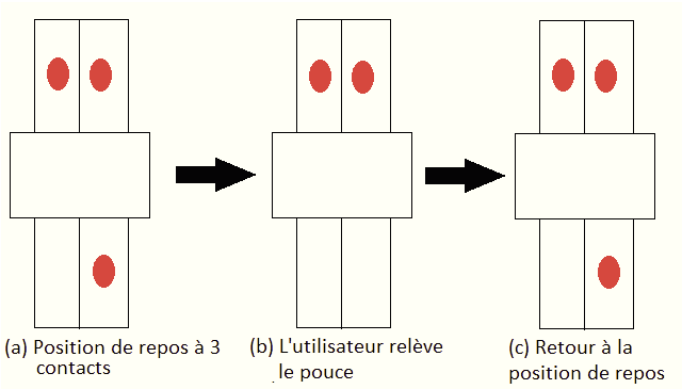


FIGURE 8.30 – Illustration du geste de pointage à 3 contacts. Le geste commence à la position de repos (3 contacts). Il existe trois variantes, selon que l'utilisateur relève puis replace son pouce (comme illustré), son index, ou son majeur. Chaque point rouge représente un point de contact. Par convention, le bracelet externe est représenté en haut de l'image et le bracelet interne en bas.

© 2013 TELECOM ParisTech

Utilisation des gestes du vocabulaire classique

Nous avons aussi utilisé les gestes du vocabulaire d'origine présenté en Section 8.3. Pour le contrôle du volume, nous avons gardé le concept de geste de glissement à 2 contacts. Ce geste rappelle l'utilisation d'un bouton de volume dans le monde réel. Pour le défilement rapide de la liste de lecture (à droite sur la Figure 8.28), nous utilisons la technique de défilement sur le bracelet (Section 8.7.1).

Récapitulatif des commandes

Voici la liste des différentes commandes utilisées par notre application :

Commande	Type de geste	Nombre de contacts	Bracelet
Play/Pause	Pointage	3	Les deux, interaction avec le pouce sur le bracelet interne
Précédent	Pointage	3	Les deux, interaction avec le majeur sur le bracelet externe
Suivant	Pointage	3	Les deux, interaction avec l'index sur le bracelet externe
Contrôle volume	Glissement	2	Les deux
Avance/retour rapide	Glissement	2	Interne
Défilement dans la liste de lecture	Glissement	1	Interne

TABLE 8.4 – Liste des commandes de notre application de démonstration.

© 2013 TELECOM ParisTech

8.11.4 Conclusion

WatchIt est un prototype qui permet de rendre interactif un bracelet. Alors que l'interaction avec une montre interactive "classique" est limitée par la faible surface de l'écran tactile, favorisant donc les problèmes d'occultation et d'imprécision ("fat finger" problem), l'utilisation de WatchIt permet de s'affranchir de ces limites. Des travaux antérieurs ont aussi abordé ces problèmes d'occultation et d'imprécision, mais aucun n'avait suggéré l'utilisation de la surface du bracelet. De plus l'utilisabilité du dispositif dans une situation dite "eyes-free" n'a pas toujours été considérée. Avec WatchIt, nous avons développé une nouvelle technique gestuelle et une technique de menu adaptée d'earPod [Zhao *et al.*, 2007] pour les micro-interactions. Dans une expérience sur des utilisateurs, nous avons prouvé l'efficacité de ces deux techniques, même quand les participants ne pouvaient pas regarder le dispositif.

Dans une seconde partie, nous avons conçu deux techniques de défilement de liste pour un contrôle continu précis qui ont été évaluées expérimentalement. Les deux techniques permettent d'éviter l'occultation, ce qui aide les utilisateurs à explorer de longues listes.

Le concept WatchIt propose une solution peu coûteuse, peu gourmande en énergie et qui permet d'améliorer de manière significative l'interaction existante sur des montres interactives ou même des bijoux portés au poignet et dépourvus d'écrans comme les bracelets. Enfin, du fait de la technologie résistive utilisée, il est possible de recouvrir les capteurs afin de les rendre invisibles et donc de conserver un aspect esthétique globale satisfaisant.

© 2013 TELECOM ParisTech

© 2013 TELECOM ParisTech

© 2013 TELECOM ParisTech

Chapitre 9

Conclusions et Perspectives

SOMMAIRE

9.1 CONTRIBUTIONS 156
9.1.1 Pointage et loi de Fitts 156
9.1.2 Bijoux numériques 157
9.2 PERSPECTIVES 158
9.2.1 Pointage sur bijoux numériques 158
9.2.2 Vers une remise en cause de la norme ISO ? 158
9.2.3 Rôle futur des bijoux numériques 159
9.2.4 Vers un bracelet totalement augmenté 159
9.2.5 Augmentation d'autres objets du quotidien 159
9.2.6 Utilisation de nouveaux dispositifs d'affichage sur bijoux numériques 159

En conclusion, nous résumons nos contributions sur la loi de Fitts et la caractérisation, la conception et l'évaluation des techniques d'interactions pour bijoux numériques. Une prise de recul par une analyse des résultats nous permet ensuite d'identifier plusieurs perspectives de développement à moyen et long terme.

9.1 Contributions

Chacune des parties présentées dans ce manuscrit a donné lieu à des contributions qui ont été décrites et publiées dans des conférences majeures.

9.1.1 Pointage et loi de Fitts

La partie pointage a permis de proposer deux contributions majeures que nous allons rappeler.

Loi de Fitts comme un compromis temps/erreur

Lors de ce chapitre, nous avons exprimé la loi de Fitts comme un compromis temps/erreur, au lieu de vitesse/précision, comme préconisé initialement. Nous avons aussi découvert une nouvelle formulation pour la loi sous la forme suivante :

$$\mu_t = \frac{q}{\sqrt{\frac{\sigma_A}{\mu_A}}} \tag{9.1}$$

Cette formulation n'utilise qu'un coefficient ajustable (q) qui exprime aussi une quantité de ressources disponibles. Ce travail a fait l'objet d'une publication (papier long) à la conférence CHI 2011 [Guiard *et al.*, 2011].

Invariance de l'Indice de Performance

Le travail présenté dans ce chapitre met à jour un biais affectant le calcul de l'Indice de Performance (IP) lié à l'ordre dans lequel sont effectuées les opérations d'agrégation statistique (comme le moyennage) et de calcul numérique (comme par exemple la division). Ce biais lié à l'inégalité de Jensen a été largement ignoré par les chercheurs en IHM et peut induire une variabilité dans les résultats. En outre, nous avons aussi repris l'expérience de MacKenzie et Isokoski [MacKenzie and Isokoski, 2008] sur l'invariance de l'Indice de Performance. En utilisant un protocole proche basé sur des consignes, nous montrons que selon la méthode de calcul choisie, l'invariance de cet indice n'est pas garantie. Ce travail a été publiée à la conférence BCS HCI 2012 et a été élu "best paper" [Olafsdottir *et al.*, 2012a], ce qui lui a valu d'être réédité dans le journal "Interfaces" [Olafsdottir *et al.*, 2012b].

© 2013 TELECOM ParisTech

9.1.2 Bijoux numériques

La partie portant sur les bijoux numériques a fait émerger une classification des techniques d'interaction sur bijoux numériques et présente la conception et l'évaluation d'un prototype de bracelet interactif.

Enquête et espace de classification

Dans le processus de mise au point de nouvelles techniques d'interaction, nous avons effectué un travail préliminaire assez conséquent qui s'est déroulé en deux étapes :

- Tout d'abord, nous avons voulu déterminer quels bijoux sont traditionnellement les plus portés. En outre, nous souhaitions obtenir des informations sur les tâches potentiellement intéressantes à effectuer sur les bijoux numériques. Nous avons donc réalisé un questionnaire Internet dont les résultats sont analysés et présentés.
- Dans un second temps, nous avons dégagé des axes de classification de la littérature existante. Nous nous sommes plus précisément intéressés à l'interaction gestuelle sur bijoux numériques. Sur de tels dispositifs, il existe deux alternatives pour l'interaction. L'une porte sur l'utilisation du dispositif comme un référentiel d'interaction, et la seconde sur l'utilisation du dispositif comme un mobile pour l'interaction.

Cet espace de classification a aussi permis de juger du potentiel d'interaction des bijoux, et particulièrement de savoir quelle solution adopter selon le bijou considéré.

Les travaux de ce chapitre (enquête et espace de classification) ont fait l'objet d'une publication à la conférence IHM 2011 sous la forme d'un papier court [Perrault *et al.*, 2011].

WatchIt

En partant de l'analyse de l'étude précédente, nous avons déterminé que le bijou le plus fréquemment porté par nos sondés reste une montre ou un bracelet. Nous avons aussi constaté que le bracelet soutenant la montre à proprement parler n'avait pas été considéré pour l'interaction. C'est pourquoi nous avons proposé WatchIt, un concept permettant l'interaction sur le bracelet d'une montre. Le concept repose sur une technologie résistive qui possède de nombreux avantages, entre autres en termes de prix et de consommation d'énergie. Au cours de ce travail, nous avons développé quatre techniques d'interaction qui visent à apporter des solutions à quatre problèmes majeurs dans le domaine de l'interaction mobile :

- L'occultation. Or, interagir sur le bracelet permet de séparer entrée et sortie et donc permet de l'éviter.
- Le "fat finger problem". Pour les mêmes raisons, celui-ci ne se pose plus avec WatchIt.

© 2013 TELECOM ParisTech

- L'interaction "eyes-free". Deux de nos techniques d'interaction sont spécialement conçues pour être utilisables dans des situations où l'utilisateur ne peut pas regarder le dispositif.
- Le contrôle continu et le défilement de liste. Les deux autres techniques permettent de faire défiler des listes, quelles que soient leurs tailles, confortablement et avec précision.

En outre, les résultats de nos expériences mettent en avant le fait que les utilisateurs sont capables d'interagir sur la totalité de la surface du bracelet.

Le concept WatchIt a été présenté sous la forme d'une vidéo à la conférence CHI 2012 [Perrault *et al.*, 2012] et a été publié sous forme de papier long à la conférence CHI 2013 [Perrault *et al.*, 2013b].

9.2 Perspectives

Le travail présenté dans ce manuscrit se décompose en deux parties, ce qui ouvre la voie à de multiples perspectives à moyen et long terme. Elles s'orientent en trois axes distincts : le premier porte sur la loi de Fitts en informatique, la seconde sur l'interaction sur bijoux numériques et la dernière sur des perspectives plus générales combinant les deux approches de notre travail. En ce qui concerne les perspectives à court terme, elles ont été présentées dans les chapitres correspondant, par exemple dans la Section 8.11 pour WatchIt.

9.2.1 Pointage sur bijoux numériques

Les résultats portant sur la loi de Fitts présentés dans ce travail ont été déterminés dans des conditions de pointage "confortable", c'est-à-dire du pointage à une dimension, sur une surface plane et avec des amplitudes de mouvement de 15 centimètres. Ils sont donc difficiles à généraliser pour du pointage sur bijoux numériques. Une perspective à très court terme serait donc de tester la validité du modèle présenté dans le Chapitre 3 autour du poignet, en utilisant le prototype de bracelet interactif présenté au Chapitre 8.

9.2.2 Vers une remise en cause de la norme ISO ?

Les travaux portant sur le pointage et la loi de Fitts ont mis en avant certaines imprécisions du domaine. Une perspective intéressante serait de pousser plus avant les tests d'invariance de l'Indice de Performance et de vérifier la validité de notre formulation à un coefficient. Pour ce faire, il convient de mener des expériences contrôlées faisant varier à la fois les échelles de mouvement, mais aussi les dispositifs en entrée en se concentrant par exemple sur les périphériques les plus cou-

© 2013 TELECOM ParisTech

rants (souris, surface tactile). Nous pourrions ainsi à plus long terme proposer un nouveau modèle plus robuste, idéalement plus simple, utilisables pour des tâches à 1 et 2 dimensions. En somme, s'orienter vers une remise en cause de la norme ISO [ISO, 2002].

9.2.3 Rôle futur des bijoux numériques

L'espace de classification présenté a été pensé pour les bijoux numériques, mais il est important de penser à l'avenir, où, dans un monde de plus en plus connecté, les différents objets interactifs vont aussi pouvoir collaborer. L'interaction risque alors de se retrouver éclatée entre plusieurs dispositifs, ce qui nécessite de définir rapidement les rôles de chacun des dispositifs, en particulier dans le cas qui nous intéresse : les bijoux numériques. De par leur emplacement, ils sont tout à fait adaptés à de l'interaction personnelle privée et sont aussi les dispositifs aux capacités d'affichage les plus limitées. Ils sont donc les dispositifs qui profiteront le plus d'affichages déportés.

9.2.4 Vers un bracelet totalement augmenté

WatchIt permet l'interaction gestuelle sur le bracelet, mais il reste de nombreuses dimensions que nous n'avons pas encore explorées et qui ont été présentées dans la Section 8.11. Outre l'utilisation simultanée de plusieurs doigts sur chaque demi-bracelet, on pourrait aussi considérer de légers gestes de rotation autour du bracelet ou la déformation locale du bracelet.

9.2.5 Augmentation d'autres objets du quotidien

Une des propriétés les plus importantes des bijoux numériques est leur présence permanente sur l'utilisateur : il est en effet plus aisé d'enlever une montre que certains vêtements. Avec WatchIt, nous avons proposé de l'interaction riche sur un dispositif qui semblait depuis des années se cantonner à de l'interaction simple. Dans la vie quotidienne, il existe d'autres objets similaires qui n'ont pas encore été considérés. L'exemple le plus parlant semble être le sac à main, qui est sans doute l'un des accessoires les plus portés par les femmes. Quelques concepts de sacs à main interactifs ont été évoqués [Lee *et al.*, 2007] mais il reste de nombreuses possibilités, comme par exemple rendre les poignées interactives ou permettre l'affichage d'informations sur les côtés du sac.

9.2.6 Utilisation de nouveaux dispositifs d'affichage sur bijoux numériques

La mise au point de nouveaux dispositifs d'affichage comme les picoprojecteurs et les écrans déformables/flexibles est annonciatrice d'une révolution pour les bijoux numériques. En effet, la plupart des bijoux n'ont que de faibles capacités en termes d'affichage. L'ajout d'écran flexibles

© 2013 TELECOM ParisTech

sur un bracelet ou un anneau va pouvoir permettre de s'orienter vers des appareils hybrides (un bracelet une fois déplié possède une surface comparable à un smartphone actuel). Nous pensons que certains résultats de WatchIt (notamment sur la navigation) peuvent être réutilisés sur de tels dispositifs. En outre, la question du pointage sur ces surfaces risque de se poser. Quelques travaux [Roudaut *et al.*, 2011] commencent à émerger sur ce type de problématique, et nous pensons que la loi de Fitts et les modèles en général ont aussi un rôle à jouer dans ces situations. Ces problématiques commencent à fortement intéresser la communauté avec des nombreux ateliers à ITS 2012 ou encore "Displays Take New Shape : An Agenda for Interactive Surfaces" à CHI 2013 [Perrault *et al.*, 2013a].

© 2013 TELECOM ParisTech

© 2013 TELECOM ParisTech

© 2013 TELECOM ParisTech

Annexe A

Publications personnelles

1. **Simon T. Perrault**, Eric Lecolinet, James Eagan, and Yves Guiard. Watchit : Simple gestures and eyes-free interaction for wristwatches and bracelets. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI'13*, pages 1-10, New York, NY, USA, 2013. ACM.
2. **Simon T. Perrault**, Hind Gacem, Eric Lecolinet, and Yves Guiard. Augmenting digital jewelry with advanced display capacities. In *CHI 2013 Workshop on "Displays Take New Shape : An Agenda for Interactive Surfaces", CHI'13 workshop*, pages 1-4, 2013.
3. Halla B. Olafsdottir, Yves Guiard, Olivier Rioul, and **Simon T. Perrault**. A new test of throughput invariance in Fitts' law : role of the intercept and of jensen's inequality. *Interfaces, 93(Winter2012)*, pages 119-126, Swinton, UK, UK, 2012. British Computer Society. (Réédition).
4. Halla B. Olafsdottir, Yves Guiard, Olivier Rioul, and **Simon T. Perrault**. A New Test of Throughput Invariance in Fitts' Law : Role of the Intercept and of Jensen's Inequality. In *Proceedings of the 26th Annual BCS Interaction Specialist Group Conference on People and Computers, BCS-HCI'12*, pages 119-126, Swinton, UK, UK, 2012. British Computer Society. **Best paper award.**
5. **Simon T. Perrault**, Sylvain Malacria, Eric Lecolinet, and Yves Guiard. Watchit : Simple gestures for interacting with a watchstrap. In *CHI Extended Abstracts 2012, Video session, CHI EA'12*, page 1, New York, NY, USA, 2012. ACM.
6. **Simon T. Perrault**, Gilles Bailly, Yves Guiard, and Eric Lecolinet. Promesses et contraintes de la joaillerie numérique interactive : un aperçu de l'état de l'art. In *23rd French Speaking Conference on Human-Computer Interaction, IHM'11*, pages 1-4, New York, NY, USA, 2011. ACM.
7. **Simon T. Perrault**. Nouvelles techniques d'interaction pour les dispositifs miniaturisés de l'informatique mobile. In *Adjunct Proceedings of IHM 2011*, pages 1-4. Doctoral consortium.

8. Halla B. Olafsdottir, **Simon T. Perrault** and Yves Guiard. Fitts' with a Twist : An Exploration of Scale Effects using a New Experimental Paradigm. In *Proceedings of 14ème Congres International de l'ACAPS, ACAPS'11*. Poster.
9. Yves Guiard, Halla B. Olafsdottir, and **Simon T. Perrault**. Fitts' law as an explicit time/error trade-off. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI'11*, pages 1619-1628, New York, NY, USA, 2011. ACM.

© 2013 TELECOM ParisTech

© 2013 TELECOM ParisTech

© 2013 TELECOM ParisTech

Bibliographie

[Accot and Zhai, 1997] Johnny Accot and Shumin Zhai. Beyond fitts' law : models for trajectory-based hci tasks. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, CHI '97, pages 295–302, New York, NY, USA, 1997. ACM.

[Accot and Zhai, 2003] Johnny Accot and Shumin Zhai. Refining fitts' law models for bivariate pointing. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '03, pages 193–200, New York, NY, USA, 2003. ACM.

[Ahde and Mikkonen, 2008] Petra Ahde and Jussi Mikkonen. Hello : bracelets communicating nearby presence of friends. In *Proceedings of the Tenth Anniversary Conference on Participatory Design 2008*, PDC '08, pages 324–325, Indianapolis, IN, USA, 2008. Indiana University.

[Amft *et al.*, 2009] Oliver Amft, Roman Amstutz, Asim Smailagic, Dan Siewiorek, and Gerhard Tröster. Gesture-controlled user input to complete questionnaires on wrist-worn watches. In *Proceedings of the 13th International Conference on Human-Computer Interaction. Part II : Novel Interaction Methods and Techniques*, pages 131–140, Berlin, Heidelberg, 2009. Springer-Verlag.

[Appert *et al.*, 2008] Caroline Appert, Olivier Chapuis, and Michel Beaudouin-Lafon. Evaluation of pointing performance on screen edges. In *Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces*, AVI '08, pages 119–126, New York, NY, USA, 2008. ACM.

[AroundMe, 2013] AroundMe. Aroundme application. http://itunes.apple.com/fr/app/aroundme/id290051590?mt=8, 2013.

[Ashbrook *et al.*, 2008a] Daniel Ashbrook, Kent Lyons, and Thad Starner. An investigation into round touchscreen wristwatch interaction. In *Proceedings of the 10th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services*, MobileHCI '08, pages 311–314, New York, NY, USA, 2008. ACM.

[Ashbrook *et al.*, 2008b] Daniel L. Ashbrook, James R. Clawson, Kent Lyons, Thad E. Starner, and Nirmal Patel. Quickdraw : the impact of mobility and on-body placement on device access time. In *Proceedings of the twenty-sixth annual SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, CHI '08, pages 219–222, New York, NY, USA, 2008. ACM.

[Ashbrook *et al.*, 2011] Daniel Ashbrook, Patrick Baudisch, and Sean White. Nenya : subtle and eyes-free mobile input with a magnetically-tracked finger ring. In *Proceedings of the 2011*

annual conference on Human factors in computing systems, CHI '11, pages 2043–2046, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[Ashbrook, 2010] Daniel L. Ashbrook. *Enabling mobile microinteractions*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA, 2010. AAI3414437.

[Bacon and Vu, 2011] L. Paige Bacon and Kim-Phuong L. Vu. Movement time for different input devices. In *Proceedings of the 9th international conference on Engineering psychology and cognitive ergonomics*, EPCE'11, pages 3–9, Berlin, Heidelberg, 2011. Springer-Verlag.

[Baglioni *et al.*, 2009] Mathias Baglioni, Eric Lecolinet, and Yves Guiard. Espace de caractérisation des interactions gestuelles physiques sur dispositifs mobiles. In *Proceedings of the 21st International Conference on Association Francophone d'Interaction Homme-Machine*, IHM '09, pages 203–212, New York, NY, USA, 2009. ACM.

[Baglioni *et al.*, 2011] Mathias Baglioni, Sylvain Malacria, Eric Lecolinet, and Yves Guiard. Flick-and-brake : finger control over intertial/sustained scroll motion. In *CHI'11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pages 2281–2286, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[Bailly *et al.*, 2007] Gilles Bailly, Eric Lecolinet, and Laurence Nigay. Quinze ans de recherche sur les menus : critères et propriétés des techniques de menus. In *Proceedings of the 19th International Conference of the Association Francophone d'Interaction Homme-Machine*, IHM '07, pages 119–126, New York, NY, USA, 2007. ACM.

[Bailly *et al.*, 2012] Gilles Bailly, Jörg Müller, Michael Rohs, Daniel Wigdor, and Sven Kratz. Shoesense : a new perspective on gestural interaction and wearable applications. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pages 1239–1248, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[Baudisch and Chu, 2009] Patrick Baudisch and Gerry Chu. Back-of-device interaction allows creating very small touch devices. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '09, pages 1923–1932, New York, NY, USA, 2009. ACM.

[Baudisch and Rosenholtz, 2003] Patrick Baudisch and Ruth Rosenholtz. Halo : a technique for visualizing off-screen objects. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '03, pages 481–488, New York, NY, USA, 2003. ACM.

[Beaudouin-lafon, 2000] Michel Beaudouin-lafon. Ceci n'est pas un ordinateur Perspectives sur l'Interaction Homme-Machine. *Technique et Science Informatique*, 19(1-2-3) :69–74, 2000.

[BinaryClock, 2013] BinaryClock. Article wikipedia binaryclock. http://en.wikipedia.org/wiki/Binary_clock, 2013.

[Blasko and Feiner, 2004] Gabor Blasko and Steven Feiner. An interaction system for watch computers using tactile guidance and bidirectional segmented strokes. In *Proceedings of the Eighth International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '04, pages 120–123, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society.

© 2013 TELECOM ParisTech

[Blasko *et al.*, 2005] Gabor Blasko, Steven Feiner, and Franz Coriand. Exploring interaction with a simulated wrist-worn projection display. In *Proceedings of the Ninth IEEE International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '05, pages 2–9, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society.

[Bolt, 1980] Richard A. Bolt. ¨put-that-there¨ : Voice and gesture at the graphics interface. In *Proceedings of the 7th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, SIGGRAPH '80, pages 262–270, New York, NY, USA, 1980. ACM.

[Butler *et al.*, 2008] Alex Butler, Shahram Izadi, and Steve Hodges. Sidesight : multi-"touch" interaction around small devices. In *Proceedings of the 21st annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '08, pages 201–204, New York, NY, USA, 2008. ACM.

[Cao *et al.*, 2007] Xiang Cao, Clifton Forlines, and Ravin Balakrishnan. Multi-user interaction using handheld projectors. In *Proceedings of the 20th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '07, pages 43–52, New York, NY, USA, 2007. ACM.

[Card *et al.*, 1978] Stuart K. Card, William K. English, and Betty J. Burr. Evaluation of Mouse, Rate-Controlled Isometric Joystick, Step Keys, and Text Keys for Text Selection on a CRT. *Ergonomics*, 21(8) :601–613, 1978.

[Casiez and Vogel, 2008] Géry Casiez and Daniel Vogel. The effect of spring stiffness and control gain with an elastic rate control pointing device. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '08, pages 1709–1718, New York, NY, USA, 2008. ACM.

[Casiez *et al.*, 2011] Géry Casiez, Nicolas Roussel, Romuald Vanbelleghem, and Frédéric Giraud. Surfpad : riding towards targets on a squeeze film effect. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, pages 2491–2500, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[Chapuis and Dragicevic, 2011] Olivier Chapuis and Pierre Dragicevic. Effects of motor scale, visual scale, and quantization on small target acquisition difficulty. *ACM Transactions on Computer-Human Interactions*, (3) :13 :1–13 :32, August 2011.

[Cho *et al.*, 2007] Ilyeon Cho, John Sunwoo, Yong-Ki Son, Myoung-Hwan Oh, and Cheol-Hoon Lee. Development of a single 3-axis accelerometer sensor based wearable gesture recognition band. In Jadwiga Indulska, Jianhua Ma, Laurence Tianruo Yang, Theo Ungerer, and Jiannong Cao, editors, *Ubiquitous Intelligence and Computing, 4th International Conference, UIC 2007, Hong Kong, China, July 11-13, 2007, Proceedings*, volume 4611 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 43–52. Springer, 2007.

[Coutaz and Nigay, 1994] Joelle Coutaz and Laurence Nigay. Les propriétés CARE dans les interfaces multimodales. In *Actes de la conférence IHM'94, Lille*, pages 7–14, 1994.

[Crossman, 1956] E. R. F. W. Crossman. *The measurement of perceptual load in manual operations*. PhD thesis, University of Birmingham, 1956.

© 2013 TELECOM ParisTech

[Drury, 1975] Colin G. Drury. Application of fitts' law to foot-pedal design. *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 17(4) :368–373, 1975.

[Epps, 1986] Brian W. Epps. Comparison of six cursor control devices based on fitts' law models. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 30(4) :327–331, 1986.

[Fitts and Peterson, 1964] P. M. Fitts and J. R. Peterson. Information capacity of discrete motor responses. *Journal of Experimental Psychology*, 67 :103–112, 1964.

[Fitts and Radford, 1966] Paul M. Fitts and Barbara K. Radford. Information capacity of discrete motor responses under different cognitive sets. *Journal of Experimental Psychology*, 71 :475–482, 1966.

[Fitts, 1954] P. M. Fitts. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47 :381–391, 1954.

[Foley *et al.*, 1984] James D. Foley, Victor L. Wallace, and Peggy Chan. The human factors of computer graphics interaction techniques. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 4(11) :13–48, November 1984.

[Forman and Zahorjan, 1994] G.H. Forman and J. Zahorjan. The challenges of mobile computing. *Computer*, 27(4) :38 –47, april 1994.

[Francone *et al.*, 2009] Jeremie Francone, Gilles Bailly, Laurence Nigay, and Eric Lecolinet. Wavelet menus : a stacking metaphor for adapting marking menus to mobile devices. In *Proceedings of the 11th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '09, pages 49 :1–49 :4, New York, NY, USA, 2009. ACM.

[Fukumoto and Tonomura, 1997] Masaaki Fukumoto and Yoshinobu Tonomura. ¨body coupled fingerring¨ : wireless wearable keyboard. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, CHI '97, pages 147–154, New York, NY, USA, 1997. ACM.

[Fukumoto and Tonomura, 1999] Masaaki Fukumoto and Yoshinobu Tonomura. Whisper : a wristwatch style wearable handset. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems : the CHI is the limit*, CHI '99, pages 112–119, New York, NY, USA, 1999. ACM.

[Fukumoto, 2005] Masaaki Fukumoto. A finger-ring shaped wearable handset based on bone-conduction. In *Proceedings of the Ninth IEEE International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '05, pages 10–13, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society.

[Ghomi *et al.*, 2012] Emilien Ghomi, Guillaume Faure, Stéphane Huot, Olivier Chapuis, and Michel Beaudouin-Lafon. Using rhythmic patterns as an input method. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pages 1253–1262, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[Google, 2013] Google. Page du projet google glasses. https://plus.google.com/+projectglass/posts, 2013.

© 2013 TELECOM ParisTech

[Guiard and Ferrand, 1998] Y. Guiard and T. Ferrand. Effets de gamme et optimum de difficulté spatiale dans une tâche de pointage de Fitts. *Science et motricité*, 34 :19–25, 1998.

[Guiard and Olafsdottir, 2011] Yves Guiard and Halla B. Olafsdottir. On the measurement of movement difficulty in the standard approach to fitts' law. *PLoS ONE*, 6(10) :e24389, 10 2011.

[Guiard *et al.*, 2011] Yves Guiard, Halla B. Olafsdottir, and Simon T. Perrault. Fitt's law as an explicit time/error trade-off. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, pages 1619–1628, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[Guiard, 2009] Yves Guiard. The problem of consistency in the design of fitts' law experiments : consider either target distance and width or movement form and scale. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '09, pages 1809–1818, New York, NY, USA, 2009. ACM.

[Gustafson *et al.*, 2010] Sean Gustafson, Daniel Bierwirth, and Patrick Baudisch. Imaginary interfaces : spatial interaction with empty hands and without visual feedback. In *Proceedings of the 23nd annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '10, pages 3–12, New York, NY, USA, 2010. ACM.

[Hachet *et al.*, 2005] Martin Hachet, Joachim Pouderoux, and Pascal Guitton. A camera-based interface for interaction with mobile handheld computers. In *Proceedings of the 2005 symposium on Interactive 3D graphics and games*, I3D '05, pages 65–72, New York, NY, USA, 2005. ACM.

[Harrison and Hudson, 2008] Chris Harrison and Scott E. Hudson. Scratch input : creating large, inexpensive, unpowered and mobile finger input surfaces. In *Proceedings of the 21st annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '08, pages 205–208, New York, NY, USA, 2008. ACM.

[Harrison and Hudson, 2009] Chris Harrison and Scott E. Hudson. Abracadabra : wireless, high-precision, and unpowered finger input for very small mobile devices. In *Proceedings of the 22nd annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '09, pages 121–124, New York, NY, USA, 2009. ACM.

[Harrison *et al.*, 2009] Chris Harrison, Brian Y. Lim, Aubrey Shick, and Scott E. Hudson. Where to locate wearable displays ? : reaction time performance of visual alerts from tip to toe. In *Proceedings of the 27th international conference on Human factors in computing systems*, CHI '09, pages 941–944, New York, NY, USA, 2009. ACM.

[Harrison *et al.*, 2010] Chris Harrison, Desney Tan, and Dan Morris. Skinput : appropriating the body as an input surface. In *Proceedings of the 28th international conference on Human factors in computing systems*, CHI '10, pages 453–462, New York, NY, USA, 2010. ACM.

[Harrison *et al.*, 2012] Chris Harrison, John Horstman, Gary Hsieh, and Scott Hudson. Unlocking the expressivity of point lights. In *Proceedings of the 2012 ACM annual conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pages 1683–1692, New York, NY, USA, 2012. ACM.

© 2013 TELECOM ParisTech

[Holz and Baudisch, 2010] Christian Holz and Patrick Baudisch. The generalized perceived input point model and how to double touch accuracy by extracting fingerprints. In *Proceedings of the 28th international conference on Human factors in computing systems*, CHI '10, pages 581–590, New York, NY, USA, 2010. ACM.

[Hua and Gao, 2005] H. Hua and C. Gao. A polarized head-mounted projective display. In *Mixed and Augmented Reality, 2005. Proceedings. Fourth IEEE and ACM International Symposium on*, pages 32–35, oct. 2005.

[I'mWatch, 2013] I'mWatch. Site web de i'm watch. http://www.imwatch.it/fr-fr, 2013.

[INSEE, 2013] INSEE. Répartition de la population française par catégorie socioprofessionnelle en 2010. http://www.insee.fr/fr/themes/tableau.asp?reg_id=0&ref_id=NATTEF02135, 2013.

[ISO, 2002] ISO. *ISO 9241-9 :2000 Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs)*. ISO, 2002.

[Kantowitz and Elvers, 1988] Barry H. Kantowitz and Greg C. Elvers. Fitts' law with an isometric controller : Effects of order of control and control-display gain. *Journal of Motor Behavior*, 20 :53–66, 1988.

[Karam and Schraefel, 2005] Maria Karam and M. C. Schraefel. A taxonomy of gestures in human computer interactions. Technical report, University of Southampton, 2005.

[Kim *et al.*, 2007] Jungsoo Kim, Jiasheng He, Kent Lyons, and Thad Starner. The gesture watch : A wireless contact-free gesture based wrist interface. In *Proceedings of the 2007 11th IEEE International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '07, pages 1–8, Washington, DC, USA, 2007. IEEE Computer Society.

[Kim *et al.*, 2010] KwanMyung Kim, Dongwoo Joo, and Kun-Pyo Lee. Wearable-object-based interaction for a mobile audio device. In *Proceedings of the 28th of the international conference extended abstracts on Human factors in computing systems*, CHI EA '10, pages 3865–3870, New York, NY, USA, 2010. ACM.

[Kratz and Rohs, 2009] Sven Kratz and Michael Rohs. Hoverflow : exploring around-device interaction with ir distance sensors. In *Proceedings of the 11th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '09, pages 42 :1–42 :4, New York, NY, USA, 2009. ACM.

[Kurtenbach and Buxton, 1991] Gordon Kurtenbach and William Buxton. Issues in combining marking and direct manipulation techniques. In *Proceedings of the 4th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '91, pages 137–144, New York, NY, USA, 1991. ACM.

[Labrune and Mackay, 2006] Jean-Baptiste Labrune and Wendy Mackay. Telebeads : social network mnemonics for teenagers. In *Proceedings of the 2006 conference on Interaction design and children*, IDC '06, pages 57–64, New York, NY, USA, 2006. ACM.

© 2013 TELECOM ParisTech

[Lee *et al.*, 2007] Min Kyung Lee, Scott Davidoff, John Zimmerman, and Anind K Dey. Smart bag : managing home and raising children. In *Proceedings of the 2007 conference on Designing pleasurable products and interfaces - DPPI '07*, number August, pages 434–437, New York, New York, USA, 2007. ACM Press.

[Lee *et al.*, 2009] Dong-Woo Lee, Jeong-Mook Lim, J. Sunwoo, Il-Yeon Cho, and Cheol-Hoon Lee. Actual remote control : a universal remote control using hand motions on a virtual menu. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, 55(3) :1439 –1446, august 2009.

[Lim *et al.*, 2010] Jeong-Mook Lim, Dong-Woo Lee, Bae-Sun Kim, Il-Yeon Cho, and Jae-Cheol Ryou. Recognizing hand gestures using wrist shapes. In *Consumer Electronics (ICCE), 2010 Digest of Technical Papers International Conference on*, pages 197 –198, jan. 2010.

[MacKenzie and Buxton, 1992] I. Scott MacKenzie and William Buxton. Extending fitts' law to two-dimensional tasks. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '92, pages 219–226, New York, NY, USA, 1992. ACM.

[MacKenzie and Isokoski, 2008] I. Scott MacKenzie and Poika Isokoski. Fitts' throughput and the speed-accuracy tradeoff. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '08, pages 1633–1636, New York, NY, USA, 2008. ACM.

[MacKenzie and Zhang, 1999] I. Scott MacKenzie and Shawn X. Zhang. The design and evaluation of a high-performance soft keyboard. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '99, pages 25–31, New York, NY, USA, 1999. ACM.

[Mackenzie, 1989] I. S. Mackenzie. A note on the information-theoretic basis for Fitts"law. *Journal of Motor Behavior*, 21 :323–330, 1989.

[MacKenzie, 1991] I. Scott MacKenzie. *Fitts' law as a performance model in human-computer interaction*. Doctoral dissertation, University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada, 1991. http://www.yorku.ca/mack/phd.html.

[MacKenzie, 1992] I. Scott MacKenzie. Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction. *Hum.-Comput. Interact.*, 7(1) :91–139, March 1992.

[MacKenzie, 1995] I. Scott MacKenzie. Human-computer interaction. chapter Movement time prediction in human-computer interfaces, pages 483–492. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 1995.

[Malacria and Lecolinet, 2008] Sylvain Malacria and Eric Lecolinet. Espace de caractérisation du stylo numérique. In *Proceedings of the 20th International Conference of the Association Francophone d'Interaction Homme-Machine*, IHM '08, pages 177–184, New York, NY, USA, 2008. ACM.

[Malacria *et al.*, 2010] Sylvain Malacria, Eric Lecolinet, and Yves Guiard. Clutch-free panning and integrated pan-zoom control on touch-sensitive surfaces : the cyclostar approach. In *Proceedings of the 28th international conference on Human factors in computing systems*, CHI '10, pages 2615–2624, New York, NY, USA, 2010. ACM.

© 2013 TELECOM ParisTech

[Mann, 2013] Steve Mann. Définition d'un wearable computer. http://wearcomp.org/wearcompdef.html, 2013.

[Matscheko *et al.*, 2010] Michael Matscheko, Alois Ferscha, Andreas Riener, and Manuel Lehner. Tactor placement in wrist worn wearables. In *14th annual IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC'10), October 10-13, Seoul, South Korea*, page 8. IEEE Computer Society Press, October 2010.

[Meehl, 1967] Paul E. Meehl. Theory-Testing in Psychology and Physics : A Methodological Paradox. *Philosophy of Science*, 34, 1967.

[Meyer *et al.*, 1990] David E. Meyer, J. E. Keith Smith, Sylvan Kornblum, Richard A. Abrams, and Charles E. Wright. Speed-accuracy tradeoffs in aimed movements : Toward a theory of rapid voluntary action. In M. Jeannerod, editor, *Attention and Performance XIII*, pages 173–226. Lawrence Erlbaum, Hillsdale, NJ, 1990. http ://www.umich.edu/˜bcalab/Meyer_Bibliography.html.

[Miller, 1981] Dwight P. Miller. The Depth/Breadth Tradeoff in Hierarchical Computer Menus. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 25(1) :296–300, October 1981.

[Miner, 2001] Cameron Miner. Pushing functionality into even smaller devices. *Commun. ACM*, 44(3) :72–73, March 2001.

[Mistry *et al.*, 2009] Pranav Mistry, Pattie Maes, and Liyan Chang. Wuw - wear ur world : a wearable gestural interface. In *CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '09, pages 4111–4116, New York, NY, USA, 2009. ACM.

[Müller *et al.*, 2008] Jörg Müller, Marc Jentsch, Christian Kray, and Antonio Krüger. Exploring factors that influence the combined use of mobile devices and public displays for pedestrian navigation. In *Proceedings of the 5th Nordic conference on Human-computer interaction : building bridges*, NordiCHI '08, pages 308–317, New York, NY, USA, 2008. ACM.

[Murray-Smith *et al.*, 2008] Roderick Murray-Smith, John Williamson, Stephen Hughes, and Torben Quaade. Stane : synthesized surfaces for tactile input. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '08, pages 1299–1302, New York, NY, USA, 2008. ACM.

[Narayanaswami *et al.*, 2002] Chandrasekhar Narayanaswami, Noboru Kamijoh, Mandayam T. Raghunath, Tadanobu Inoue, Thomas M. Cipolla, James L. Sanford, Eugene S. Schlig, Sreekrishnan Venkiteswaran, Dinakar Guniguntala, Vishal Kulkarni, and Kazuhiko Yamazaki. Ibm's linux watch : The challenge of miniaturization. *IEEE Computer*, 35(1) :33–41, 2002.

[Ni and Baudisch, 2009] Tao Ni and Patrick Baudisch. Disappearing mobile devices. In *Proceedings of the 22nd annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '09, pages 101–110, New York, NY, USA, 2009. ACM.

[Nigay and Coutaz, 1996] Laurence Nigay and Joelle Coutaz. Espaces conceptuels pour l'interaction multimédia et multimodale. *TSI, spécial Multimédia et Collecticiel, AFCET & Hermes Publ.*, 15(9) :1195–1225, 1996.

© 2013 TELECOM ParisTech

[Norman and Bobrow, 1975] D. A. Norman and D. G. Bobrow. On Data-limited and Resource-limited Processes. *Cognitive Psychology*, 7(1) :44–64, 1975.

[Norman and Bobrow, 1976] D. A. Norman and D. G. Bobrow. On the analysis of performance operating characteristics. *Psychology Review*, 83(1) :508–510, 1976.

[Olafsdottir *et al.*, 2012a] Halla B. Olafsdottir, Yves Guiard, Olivier Rioul, and Simon T. Perrault. A new test of throughput invariance in fitts' law : role of the intercept and of jensen's inequality. In *Proceedings of the 26th Annual BCS Interaction Specialist Group Conference on People and Computers*, BCS-HCI '12, pages 119–126, Swinton, UK, UK, 2012. British Computer Society.

[Olafsdottir *et al.*, 2012b] Halla B. Olafsdottir, Yves Guiard, Olivier Rioul, and Simon T. Perrault. A new test of throughput invariance in fitts' law : role of the intercept and of jensen's inequality. *Interfaces*, 93(Winter2012) :119–126, 2012.

[Pasquero *et al.*, 2011] Jerome Pasquero, Scott J. Stobbe, and Noel Stonehouse. A haptic wristwatch for eyes-free interactions. In *Proceedings of the 2011 annual conference on Human factors in computing systems*, CHI '11, pages 3257–3266, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[Pebble, 2013] Pebble. Site web de pebble. http://getpebble.com/, 2013.

[Perrault *et al.*, 2011] Simon T. Perrault, Gilles Bailly, Yves Guiard, and Eric Lecolinet. Promesses et contraintes de la joaillerie numérique interactive : un aperçu de l'état de l'art. In *23rd French Speaking Conference on Human-Computer Interaction*, IHM '11, pages 14 :1–14 :4, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[Perrault *et al.*, 2012] Simon T. Perrault, Sylvain Malacria, Eric Lecolinet, and Yves Guiard. Watchit : Simple gestures for interacting with a watchstrap. In *CHI Extended Abstracts 2012, Video session*, CHI EA'12, page 1, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[Perrault *et al.*, 2013a] Simon T. Perrault, Hind Gacem, Eric Lecolinet, and Yves Guiard. Augmenting digital jewelry with advanced display capacities. In *CHI 2013 Workshop on "Displays Take New Shape : An Agenda for Interactive Surfaces"*, CHI '13 workshop, pages 1–4, 2013.

[Perrault *et al.*, 2013b] Simon T. Perrault, Eric Lecolinet, James Eagan, and Yves Guiard. Watchit : Simple gestures and eyes-free interaction for wristwatches and bracelets. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '13, pages 1–10, New York, NY, USA, 2013. ACM.

[Pietrzak *et al.*, 2007] Thomas Pietrzak, Isabelle Pecci, and Benoit Martin. Un logiciel d'exploration de schémas de circuits électriques basé sur l'api micole. In *Proceedings of the 19th International Conference of the Association Francophone d'Interaction Homme-Machine*, IHM'07, pages 291–294, New York, NY, USA, 2007. ACM.

[Plamondon and Alimi, 1997] R. Plamondon and A. M. Alimi. Speed/accuracy trade-offs in target-directed movements. *Behavioral and brain sciences*, 20(2) :279–349, 1997.

[Platt, 1964] JR Platt. Strong inference. *Science*, 146(3642) :347–353, 1964.

© 2013 TELECOM ParisTech

[Poirier *et al.*, 2010] Franck Poirier, Jérôme Ah-Leung, and Jean-Yves Antoine. Interaction avec un picoprojecteur : état de l'art et analyse des attentes des utilisateurs. In *Conference Internationale Francophone sur I'Interaction Homme-Machine*, IHM '10, pages 129–132, New York, NY, USA, 2010. ACM.

[Popper, 1962] KR Popper. *The Logic of Scientific Discovery*. New York : Basic Books, 1962.

[Proske and Gandevia, 2012] Uwe Proske and Simon C. Gandevia. The proprioceptive senses : Their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force. *Physiological Reviews*, 92(4) :1651–1697, 2012.

[Rekimoto, 1996] Jun Rekimoto. Tilting operations for small screen interfaces. In *Proceedings of the 9th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '96, pages 167–168, New York, NY, USA, 1996. ACM.

[Rekimoto, 2001] Jun Rekimoto. Gesturewrist and gesturepad : Unobtrusive wearable interaction devices. In *Proceedings of the 5th IEEE International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '01, pages 21–, Washington, DC, USA, 2001. IEEE Computer Society.

[Roberts and Pashler, 2000] Seth Roberts and Harold Pashler. How persuasive is a good fit ? A comment on theory testing. *Psychological Review*, 107 :358–367, 2000.

[Rosenbaum and Gregory, 2002] David A. Rosenbaum and Robert W. Gregory. Development of a method for measuring movement-related effort. Biomechanical considerations and implications for Fitts' law. *Experimental brain research*, 142(3) :365–373, 2002.

[Roudaut and Lecolinet, 2007] Anne Roudaut and Eric Lecolinet. Un espace de classification pour l'interaction sur dispositifs mobiles. In *Proceedings of the 19th International Conference of the Association Francophone d'Interaction Homme-Machine*, IHM '07, pages 99–106, New York, NY, USA, 2007. ACM.

[Roudaut *et al.*, 2008] Anne Roudaut, Stéphane Huot, and Eric Lecolinet. Taptap and magstick : improving one-handed target acquisition on small touch-screens. In *Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces*, AVI '08, pages 146–153, New York, NY, USA, 2008. ACM.

[Roudaut *et al.*, 2009a] Anne Roudaut, Mathias Baglioni, and Eric Lecolinet. Timetilt : Using sensor-based gestures to travel through multiple applications on a mobile device. In *Proceedings of the 12th IFIP TC 13 International Conference on Human-Computer Interaction : Part I*, INTERACT '09, pages 830–834, Berlin, Heidelberg, 2009. Springer-Verlag.

[Roudaut *et al.*, 2009b] Anne Roudaut, Gilles Bailly, Eric Lecolinet, and Laurence Nigay. Leaf menus : Linear menus with stroke shortcuts for small handheld devices. In *Proceedings of the 12th IFIP TC 13 International Conference on Human-Computer Interaction : Part I*, INTERACT '09, pages 616–619, Berlin, Heidelberg, 2009. Springer-Verlag.

[Roudaut *et al.*, 2009c] Anne Roudaut, Eric Lecolinet, and Yves Guiard. Microrolls : expanding touch-screen input vocabulary by distinguishing rolls vs. slides of the thumb. In *Proceedings*

 © 2013 TELECOM ParisTech

of the 27th international conference on Human factors in computing systems, CHI '09, pages 927–936, New York, NY, USA, 2009. ACM.

[Roudaut *et al.*, 2011] Anne Roudaut, Henning Pohl, and Patrick Baudisch. Touch input on curved surfaces. In *Proceedings of the 2011 annual conference on Human factors in computing systems*, CHI '11, pages 1011–1020, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[Roudaut *et al.*, 2013] Anne Roudaut, Andreas Rau, Christoph Sterz, Max Plauth, Pedro Lopes, and Patrick Baudisch. Gesture output : Eyes-free output using a force feedback touch surface. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '13, pages 1–10, New York, NY, USA, 2013. ACM.

[Roussel *et al.*, 2012] Nicolas Roussel, Géry Casiez, Jonathan Aceituno, and Daniel Vogel. Giving a hand to the eyes : leveraging input accuracy for subpixel interaction. In *Proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '12, pages 351–358, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[Sakata *et al.*, 2009] Nobuchika Sakata, Teppei Konishi, and Shogo Nishida. Mobile interfaces using body worn projector and camera. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Virtual and Mixed Reality : Held as Part of HCI International 2009*, VMR '09, pages 106–113, Berlin, Heidelberg, 2009. Springer-Verlag.

[Schmidt *et al.*, 1979] R. A. Schmidt, H. Zelaznik, B. Hawkins, J. S. Frank, and J. T. Quinn. Motor-output variability : a theory for the accuracy of rapid motor acts. *Psychology Review*, 86 :415–451, 1979.

[Schwarz *et al.*, 2010] Julia Schwarz, Chris Harrison, Scott Hudson, and Jennifer Mankoff. Cord input : an intuitive, high-accuracy, multi-degree-of-freedom input method for mobile devices. In *Proceedings of the 28th international conference on Human factors in computing systems*, CHI '10, pages 1657–1660, New York, NY, USA, 2010. ACM.

[Shannon, 1948] C. E. Shannon. A mathematical theory of communication. *Bell System Technology Journal*, 27 :379–423 and 623–656, 1948.

[Sony, 2013] Sony. Annonce de la sortie de la smartwatch. http://www.sonymobile.com/fr/products/accessories/smartwatch/, 2013.

[Soukoreff and Mackenzie, 2004] R Soukoreff and I Mackenzie. Towards a standard for pointing device evaluation, perspectives on 27 years of Fitts ? law research in HCI. *International Journal of Human-Computer Studies*, 61(6) :751–789, December 2004.

[Soukoreff and MacKenzie, 2009] R. William Soukoreff and I. Scott MacKenzie. An Informatic Rationale for the Speed-Accuracy Trade-Off. In *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pages 2890–2896, 2009.

[Stevens, 1946] S.S. Stevens. On the theory of scales of measurement. *Science*, 103(2684) :677–680, 1946.

© 2013 TELECOM ParisTech

[Tahir *et al.*, 2008] Muhammad Tahir, Gilles Bailly, Eric Lecolinet, and Gérard Mouret. Tactimote : a tactile remote control for navigating in long lists. In *Proceedings of the 10th international conference on Multimodal interfaces*, ICMI '08, pages 285–288, New York, NY, USA, 2008. ACM.

[Tarun *et al.*, 2011] Aneesh P. Tarun, Byron Lahey, Audrey Girouard, Winslow Burleson, and Roel Vertegaal. Snaplet : using body shape to inform function in mobile flexible display devices. In *CHI '11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '11, pages 329–334, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[Vardy *et al.*, 1999] Andrew Vardy, John Robinson, and Li te Cheng. The wristcam as input device. In *in Proc. International Symp. on Wearable Computing*, pages 199–202, 1999.

[VEADigital, 2013] VEADigital. Site web de vea digital. http://www.veadigital.com, 2013.

[Vogel and Baudisch, 2007] Daniel Vogel and Patrick Baudisch. Shift : a technique for operating pen-based interfaces using touch. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, CHI '07, pages 657–666, New York, NY, USA, 2007. ACM.

[Wacharamanotham *et al.*, 2010] Chatchavan Wacharamanotham, Jonathan Meyer, Jonathan Diehl, and Jan Borchers. The interactive bracelet : An input device for bimanual interaction. In *Mobile HCI 2010 Workshop on Ensembles of On-Body Devices*, Lisbon, Portugal, September 2010.

[Ware and Mikaelian, 1987] Colin Ware and Harutune H. Mikaelian. An evaluation of an eye tracker as a device for computer input2. In *Proceedings of the SIGCHI/GI Conference on Human Factors in Computing Systems and Graphics Interface*, CHI '87, pages 183–188, New York, NY, USA, 1987. ACM.

[Welford *et al.*, 1969] A.T. Welford, A.H. Norris, and N.W. Shock. Speed and accuracy of movement and their changes with age. *Acta Psychologica*, 30(0) :3–15, 1969.

[Werner *et al.*, 2008] Julia Werner, Reto Wettach, and Eva Hornecker. United-pulse : feeling your partner's pulse. In *Proceedings of the 10th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services*, MobileHCI '08, pages 535–538, New York, NY, USA, 2008. ACM.

[Wigdor and Balakrishnan, 2003] Daniel Wigdor and Ravin Balakrishnan. Tilttext : using tilt for text input to mobile phones. In *Proceedings of the 16th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '03, pages 81–90, New York, NY, USA, 2003. ACM.

[Wigdor *et al.*, 2007] Daniel Wigdor, Clifton Forlines, Patrick Baudisch, John Barnwell, and Chia Shen. Lucid touch : a see-through mobile device. In *Proceedings of the 20th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '07, pages 269–278, New York, NY, USA, 2007. ACM.

[Wobbrock *et al.*, 2003] Jacob O. Wobbrock, Brad A. Myers, and John A. Kembel. Edgewrite : a stylus-based text entry method designed for high accuracy and stability of motion. In *Pro-*

© 2013 TELECOM ParisTech

ceedings of the 16th annual ACM symposium on User interface software and technology, UIST '03, pages 61–70, New York, NY, USA, 2003. ACM.

[Wobbrock *et al.*, 2011] Jacob O. Wobbrock, Kristen Shinohara, and Alex Jansen. The effects of task dimensionality, endpoint deviation, throughput calculation, and experiment design on pointing measures and models. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, pages 1639–1648, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[Woodworth, 1899] Robert S. Woodworth. The accuracy of voluntary movement. *Psychological Review Monographs*, 3(3), 1899.

[Zhai *et al.*, 2002] Shumin Zhai, Alison Sue, and Johnny Accot. Movement model, hits distribution and learning in virtual keyboarding. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '02, pages 17–24, New York, NY, USA, 2002. ACM.

[Zhai, 2004] Shumin Zhai. Characterizing computer input with fitts' law parameters : the information and non-information aspects of pointing. *Int. J. Hum.-Comput. Stud.*, 61(6) :791–809, December 2004.

[Zhao *et al.*, 2007] Shengdong Zhao, Pierre Dragicevic, Mark Chignell, Ravin Balakrishnan, and Patrick Baudisch. Earpod : eyes-free menu selection using touch input and reactive audio feedback. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, CHI '07, pages 1395–1404, New York, NY, USA, 2007. ACM.

© 2013 TELECOM ParisTech