



**HAL**  
open science

# Apport d'une conception centrée utilisateur adaptée selon les besoins des personnes en situation de handicap

Damien Sauzin

► **To cite this version:**

Damien Sauzin. Apport d'une conception centrée utilisateur adaptée selon les besoins des personnes en situation de handicap. Robotique [cs.RO]. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2017. Français. NNT : 2017TOU30043 . tel-01810698

**HAL Id: tel-01810698**

**<https://theses.hal.science/tel-01810698>**

Submitted on 8 Jun 2018

**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.



Université  
de Toulouse

# THÈSE

En vue de l'obtention du

**DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE**

Délivré par

**Discipline ou spécialité : Informatique**

---

---

**Présentée et soutenue le 3 mai 2017 par**

**DAMIEN SAUZIN**

**Titre : Apport d'une conception centrée utilisateur adaptée selon les besoins  
des personnes en situation de handicap**

---

---

## JURY

Kolski Christophe – *Rapporteur*

Poirier Franck – *Rapporteur*

Fattal Charles – *Examineur*

Palanque Philippe – Directeur

Vella Frédéric – *Co-encadrant*

Vigouroux Nadine – *Co-encadrante*

Professeur, Université de Valenciennes

Professeur, Université Bretagne Sud

Médecin Chef de la Chataigneraie

Professeur, Université Toulouse 3

Chargé de recherche CNRS

Chargée de recherche CNRS

---

**École Doctorale et spécialité :** Mathématiques, Informatique et Télécommunications de  
Toulouse (MITT) – Image, Information, Hypermédia.

**Unité de Recherche :** Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT) – UMR 5505.

**Directeur de Thèse :** Palanque Philippe.

**Rapporteurs :** Poirier Franck, Kolski Christophe.

## Remerciements

Je remercie l'ensemble des personnes qui sont intervenues au cours de ma thèse et qui m'ont permis l'écriture de ce manuscrit malgré les multiples difficultés rencontrées

Je remercie Philippe Palanque, Frédéric Vella et Nadine Vigouroux pour leur encadrement durant ces années de thèse. Un petit plus pour Frédéric et les discussions hors thèse qui nous ont divertis. Un autre plus pour Nadine qui a survécu à la pluie de fautes d'orthographe. Et un dernier plus pour Philippe pour le soutien et la confiance donnés à cette thèse.

Je remercie « Atouts pour tous » et l'université Paul Sabatier pour le financement de cette thèse, l'IRIT et son personnel pour son lieu de déroulement.

Mes remerciements aux membres du jury : Christophe Kolski, Franck Poirier et Charles Fattal pour avoir participé au jury de cette thèse pour leur lecture du manuscrit et/ou de leur présence à la soutenance. Ainsi que de leurs remarques constructives pour améliorer ce manuscrit.

Merci aussi à l'accueil de l'équipe ELIPSE, les permanents et les doctorants avec l'ambiance agréable du laboratoire.

Je remercie aussi mes participants d'études sans qui je n'aurais pu avoir aucune évaluation de mes solutions.

Je remercie aussi ma famille pour le soutien apporté. Et enfin, Anaïs, ma compagne, pour son aide morale et les perspectives d'un avenir heureux qu'elle va m'apporter grâce au joyeux évènement qui nous attend d'ici quelques mois.



# Table des matières

Table des matières .....	3
Introduction .....	21
1. Quelles sont les situations de handicap en France ? .....	23
2. Le handicap moteur .....	24
3. Les aides techniques .....	25
3.1. L'influence des différentes affections sur l'usage des aides techniques.....	26
3.2. La capacité d'interaction.....	27
4. Objectifs de la thèse.....	30
Chapitre 1 : Etude de l'interaction chez les personnes handicapées moteur des membres supérieurs : méthodes et outils .....	35
1. Etude des mouvements d'interaction.....	37
1.1. Approche globale du mouvement .....	37
1.2. Etude des sous-mouvements.....	40
2. La taxonomie des techniques d'interaction.....	43
2.1. Les techniques d'interaction qui agissent sur la cible .....	43
2.2. Les techniques d'interaction qui agissent sur le curseur.....	52
2.3. Synthèse des techniques d'interaction.....	59
3. La méthode de conception centrée utilisateur.....	61
3.1. L'organisation de la méthode centrée utilisateur .....	66
3.2. Les outils de la conception centrée utilisateur .....	68
3.3. L'approche « Do it yourself » .....	69
4. Evaluation des tâches d'interactions .....	70

4.1.	La Loi de Hick-Hyman.....	72
4.2.	La loi de Fitts .....	72
4.3.	Le modèle Soukoreff / Mackenzie .....	75
4.4.	Le modèle GOMS .....	76
5.	La variabilité entre individus .....	77
5.1.	L'expérience du participant .....	77
5.2.	L'âge du participant .....	78
5.3.	Situation de handicap moteur d'un participant .....	78
6.	Outils utilisés : MPH et ECSD.....	80
6.1.	La plateforme MPH [Thèse F. Vella 2008] .....	80
6.2.	ECSD pour l'analyse des couples participants dispositif.....	84
7.	Choix du dispositif de la personne .....	89
7.1.	Apparatus.....	89
7.2.	Résultats et Discussion.....	91
7.3.	Conclusion.....	93
8.	Conclusion du chapitre 1.....	93
 <b>Chapitre 2 : Conception d'interface virtuelle pour commander un bras robotique .....</b>		<b>97</b>
1.	Introduction.....	99
2.	Etude des commandes des bras de préhension .....	101
2.1.	Histoire des bras robotiques de préhension.....	102
2.2.	Les commandes de contrôle de bras robotique .....	105
2.3.	Vers une plus grande accessibilité du bras JACO.....	113
3.	Méthodologie de conception des interfaces .....	114
3.1.	Brainstorming.....	114

3.2.	Focus Group .....	117
3.3.	Résultats et discussions du focus group .....	119
4.	Protocole d'évaluation d'interface.....	122
4.1.	Les participants à l'étude .....	123
4.2.	Design d'expérimentation pour la technique de pointage et de Goal Crossing..	124
4.3.	Design d'expérimentation pour les interfaces JACO .....	132
5.	Evaluation Complémentaire.....	141
6.	Résultats croisés MPH JACO et discussion .....	148
7.	Conclusion du chapitre 2.....	153
 <b>Chapitre 3 : SoKeyTo pour la conception de systèmes de communication et de contrôle d'environnement .....</b>		<b>157</b>
1.	Introduction.....	159
2.	La plateforme SoKeyTo (Soft Keyboard Toolkit) .....	159
2.1.	Etat des lieux des plateformes.....	160
2.2.	SoKeyTo version 2 .....	162
2.3.	La conception d'une interface avec SoKeyTo .....	163
2.4.	La configuration pour la création d'un profil utilisateur .....	167
2.5.	L'utilisation des interfaces .....	175
2.6.	Module d'évaluation théorique.....	176
3.	HandyMathKey.....	176
3.1.	L'expression de la demande .....	177
3.2.	Démarche méthodologique .....	178
3.3.	Evaluations d'HandiMathKey .....	186
3.4.	Conclusion sur HandyMathKey.....	196
3.5.	Perspectives .....	197

4. Système CECI (Contrôle d'Environnement et Communication Intégrée).....	198
4.1. Contexte.....	198
4.2. La genèse du système CECI.....	199
4.3. Etat des lieux des communicateurs et contrôles d'environnement.....	199
4.4. La méthode de conception pour Matthieu.....	201
4.5. L'architecture et l'interopérabilité du système CECI.....	202
4.6. Conception de trois CECI.....	204
4.7. Vers une version générique de l'interface CECI.....	211
5. Conclusions.....	213
6. Perspectives.....	214
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>216</b>
1. Chapitre 1.....	218
2. Chapitre 2.....	219
3. Chapitre 3.....	221
4. Synthèse générale .....	222
<b>Perspectives .....</b>	<b>228</b>
1. Les interfaces produites par la plateforme SoKeyTo .....	230
2. Le projet JACO .....	231
3. Evolution de la conception centrée utilisateur .....	232
<b>Bibliographie .....</b>	<b>236</b>
<b>Annexe 1 : Questionnaire JACO.....</b>	<b>256</b>
<b>Annexe 2 : Normalisation de la taille des touches.....</b>	<b>260</b>
1. Phase 1 : Connaissance initiale des composants graphiques .....	261
2. Phase 2 : le Calcul d'un centre de gravité .....	263

3. Phase 3 : Le calcul de la distance moyenne au centre de gravité de chacun des composants de la figure .....	264
Annexe 3 : Tableau de données MPH.....	270
Annexe 4 Tableau de données JACO .....	272
Annexe 5 Avantages et Inconvénients des concurrents de SoKeyTo .....	276
1. Les interfaces de saisie .....	276
2. Les plateformes Scientifiques .....	281
Annexe 6 Notice du fonctionnement de la plateforme SoKeyTo.....	285
1. Les fonctions des touches .....	285
2. La gestion des couches.....	288
3. Description DTD du fichier XML des interfaces SoKeyTo.....	289
4. Description du fichier DTD des traces .....	293
Annexe 7 Liste des fonctions du protocole HandiMathKey .....	298
Annexe 8 Questionnaire HandiMathKey .....	302
Annexe 9 Résultats de l'étude sur les personnes valides pour HandiMathKey .....	304
Annexe 10 Les concurrents du système CECI .....	308
Annexe 11 Questionnaire de satisfaction de Matthieu .....	314
Annexe 12 Présentation de l'ensemble des itérations du système CECI pour le participant 1.....	320
Annexe 13 Participant 2 et 3 du projet CECI.....	324

1. Participant 2 à la Clinique de l'Ourcq.....	324
2. Participant 3 à la Clinique de l'Ourcq.....	325

## Table des figures

Figure 1 : Situations de handicap en France .....	23
Figure 2 : Au cœur de l'interaction.....	28
Figure 3 : Expérimentation de pointage une dimension [G. Casiez et al. 2008].....	40
Figure 4 : Variation du mouvement, (a) Target Re-Entry, (b) Task Axis Crossing, (c) Movement Direction Change, (d) Orthogonal Direction Change [I.S. Mackenzie et al. 2001].....	41
Figure 5 : Comparaison entre "Movement Variability", "Movement Error" et "Movement Offset" [I.S. Mackenzie et al. 2001].....	42
Figure 6 : Différence entre à gauche un mouvement d'atteinte classique, et à droite l'atteinte d'une cible en bord d'écran [C. Appert et al. 2008].....	44
Figure 7 : Automatisation des cibles vs pointage.....	46
Figure 8 : Voronoï et Starburst [P. Baudisch et al. 2008].....	48
Figure 9 : le Drag'n Pick [P. Baudisch et al. 2003] .....	49
Figure 10 : Pie Menu [J. Callahan et al. 1988].....	51
Figure 11 : Différentes extensions de Pie Menu [S. Gebhardt et al. 2013] .....	52
Figure 12 : Bubble Cursor [T. Grossman et R. Balakrishnan 2005] .....	53
Figure 13 : Exemple de Kinematic Templates .....	55
Figure 14 : Ninja Cursor [M Kobayashi et T. Igarashi 2008].....	56
Figure 15 : Nine Cursor [L Dai et al. 2014].....	57
Figure 16 : Stratégie de balayage [C. E. Steriadis et P. Constantinou 2008].....	58
Figure 17 : Clavier balayage de contrôle de souris [M. Ader et al. 2007].....	58
Figure 18 : Curseur Radar de Civikey.....	59
Figure 19 : Les flux de la Conception centrée utilisateur.....	63
Figure 20 : Cycle de conception .....	64
Figure 21 : Expérience d'acquisition de cible [I.S. MakKenzie 1992].....	73

Figure 22 : Détermination des variables a et b. Loi de Fitts [I.S. MacKenzie 1992].....	73
Figure 23 : Modélisation Vella [F. Vella et N. Vigouroux 2014] .....	79
Figure 24 : Architecture de l'application MPH [thèse Vella Frédéric 2008].....	81
Figure 25 : Expérience MPH 1D [Fitts,1954][F. Vella 2008] .....	82
Figure 26 : Expérience MPH 2D (à gauche avec une cible centrale, à droite avec un repère)	83
Figure 27 : Exercice de Goal Crossing.....	83
Figure 28 : Structure ECSD .....	85
Figure 29 : Les filtres de données ECSD .....	86
Figure 30 : Menu de l'application ECSD .....	87
Figure 31 : Graphique polaire, Analyse du TRE en fonction de la direction .....	87
Figure 32 : Sélection des données à afficher .....	88
Figure 33 : Les throughput de l'expérimentation 1 .....	92
Figure 34 : Les throughput de l'expérimentation 2 .....	92
Figure 35 : Bras robotique « Handy » ( <a href="http://handicap4.e-monsite.com/pages/le-futur-des-amenagements-et-des-equipements.html">http://handicap4.e-monsite.com/pages/le-futur-des-amenagements-et-des-equipements.html</a> ).....	102
Figure 36 : Bras robotique Manus ( <a href="http://handicap4.e-monsite.com/pages/le-futur-des-amenagements-et-des-equipements.html">http://handicap4.e-monsite.com/pages/le-futur-des-amenagements-et-des-equipements.html</a> ).....	102
Figure 37 : Bras Jaco de la société Kinova .....	104
Figure 38 : Les 3 outils de commande du bras MANUS, le clavier, le joystick et le display [N. Biard 2008] .....	106
Figure 39 : Joystick du bras JACO .....	108
Figure 40 : Easy Rider HMC emprunté sur <a href="http://www.hmc-nv.be/">http://www.hmc-nv.be/</a> .....	109
Figure 41 : La brique qu'ajoute l'interface virtuelle.....	113
Figure 42 : Premier prototype clavier virtuel avec des labels.....	115
Figure 43 : Maquette clavier virtuel avec des images.....	115
Figure 44 : Maquette clavier virtuel en pavé de couleur selon les modes .....	115

Figure 45 : Pie Menu à 2 niveaux .....	116
Figure 46 : Pie Menu avec extension .....	117
Figure 47 : Représentation visuelle du clavier virtuel après plusieurs cycles itératifs avec l'équipe des ergothérapeutes Version 2.0 .....	120
Figure 48 : Représentation visuelle du Pie Menu après plusieurs cycles itératifs avec l'équipe des ergothérapeutes, Version 2.0.....	120
Figure 49 : Les interfaces Virtuelles pour le bras JACO.....	121
Figure 50 : Dispositifs Clavier avec guide doigts du participant 2.....	123
Figure 51 : Dispositifs Trackball du participant 1 .....	123
Figure 52 : MPH Version 2.1 – Pointage.....	124
Figure 53 : MPH Version 2.1 Goal Crossing.....	124
Figure 54 : Installation pour l'expérimentation MPH .....	126
Figure 55 : Participant 1 MPH Pointage .....	127
Figure 56 : Participant 1 MPH Goal Crossing .....	127
Figure 57 : Temps moyen en fonction des directions pour le Pointage par le Participant 1.	128
Figure 58 : Target Re-Entry (TRE) du participant 1 en fonction des directions pour le pointage .....	128
Figure 59 : Temps moyen en fonction des directions pour le Goal Crossing Participant 1...	128
Figure 60 : Ecart-type du temps en fonction de l'IDe pour le pointage.....	129
Figure 61 : Ecart-type du temps en fonction de l'IDe pour le Goal Crossing.....	129
Figure 62 : Participant 2 MPH Pointage .....	130
Figure 63 : Participant 2 MPH Goal Crossing .....	130
Figure 64 : Participant 2 Distance Effective par rapport au temps pour le Goal Crossing ....	130
Figure 65 : Temps moyen en fonction des directions pour le Pointage par le Participant 2.	131
Figure 66 : Target Re-Entry (TRE) du participant 2 en fonction des directions pour le pointage .....	131

Figure 67 : Temps moyen en fonction des directions pour le Goal Crossing Participant 2 ...	131
Figure 68 : Ecart-type du temps en fonction de l'IDe pour le pointage.....	132
Figure 69 : Ecart-type du temps en fonction de l'IDe pour le goal crossing .....	132
Figure 70 : Positionnement des objets des exercices de l'expérimentation .....	134
Figure 71 : Situation d'expérimentation .....	134
Figure 72 : Interface de gestion du protocole JACO .....	135
Figure 73 : Actions supplémentaires pour le Participant 1 .....	136
Figure 74 : Actions supplémentaires pour le Participant 2 .....	136
Figure 75 : Temps total pour le Participant 1.....	137
Figure 76 : Temps total pour le Participant 2.....	137
Figure 77 : Répartition du temps entre interface et bras (Participant 1) .....	138
Figure 78 : Répartition du temps entre interface et bras (Participant 2) .....	138
Figure 79 : Préférences parmi les interfaces.....	139
Figure 80 : Evaluation du ressenti des participants pour les interfaces .....	140
Figure 81 : Résultats du Participant 1 pour l'étude complémentaire.....	143
Figure 82 : Moyenne des temps pour les exercices du participant 1 .....	143
Figure 83 : Moyenne du nombre d'actions moyen pour les exercices du participant 1 .....	144
Figure 84 : Résultats du Participant 2 pour l'étude complémentaire.....	146
Figure 85 : Moyenne des temps pour les exercices du participant 2 .....	147
Figure 86 : Moyenne du nombre d'actions par exercice du participant 2.....	147
Figure 87 : Participant 1 Exercice 1 Déviation Clavier.....	149
Figure 88 : Participant 1 Exercice 1 Déviation Pie Menu Niveau .....	149
Figure 89 : Participant 1 Exercice 1 Déviation Pie Menu Extension.....	149
Figure 90 : Participant 1 Exercice 2 Déviation Clavier.....	150
Figure 91 : Participant 1 Exercice 2 Déviation Pie Menu Niveau .....	150

Figure 92 : Participant 1 Exercice 2 Déviation Pie Menu Extension.....	150
Figure 93 : Participant 2 Exercice 1 Déviation Clavier.....	151
Figure 94 : Participant 2 Exercice 1 Déviation Pie Menu Niveau .....	151
Figure 95 : Participant 2 Exercice 1 Déviation Pie Menu Extension.....	151
Figure 96 : Participant 2 Exercice 2 Déviation Clavier.....	152
Figure 97 : Participant 2 Exercice 2 Déviation Pie Menu Niveau .....	152
Figure 98 : Participant 2 Exercice 2 Déviation Pie Menu Extension.....	152
Figure 99 : Architecture de SoKeyTo v2 .....	163
Figure 100 : SoKeyTo : Module d'agencement, exemple interface du clavier Metropolis [S. Zhai et al. 2000].....	164
Figure 101 : Arborescence Balayage .....	165
Figure 102 : Description Physique d'une touche .....	166
Figure 103 : Choisir la fonction d'une touche .....	166
Figure 104 : Configuration du pointage .....	168
Figure 105 : Configuration de la Temporisation .....	169
Figure 106 : Configuration du Balayage .....	170
Figure 107 : Balayage avec retour automatique.....	171
Figure 108 : Balayage avec ajout d'une sélection Retour .....	172
Figure 109 : Balayage à 2 contacteurs .....	172
Figure 110 : Configuration Feedback visuel .....	174
Figure 111 : Configuration Feedback audio .....	175
Figure 112 : Fichier pour l'utilisation .....	176
Figure 113 : Méthode de conception centrée utilisateur HandiMathKey.....	180
Figure 114 : Première version d'un clavier mathématique.....	180
Figure 115 : Prototype papier n°1 .....	182

Figure 116 : Prototype papier n°2 .....	182
Figure 117 : Version finale de l'interface Collège .....	183
Figure 118 : Espace visuel utilisé par l'interface HandiMathKey .....	185
Figure 119 : Version Lycée HandiMathKey .....	185
Figure 120 : Temps de saisie, en minutes, de l'ensemble des formules mathématiques pour chacune des parties.....	188
Figure 121 : Distance en pixels, parcourue par le curseur lors de la saisie des formules mathématiques pour les parties "Général" et "Probabilités" .....	189
Figure 122 : Nombre de sélections de touches effectué lors de la saisie des formules mathématiques pour les parties "Général" et "Probabilités" .....	190
Figure 123 : HandiMathKey - étude du temps avec les personnes valides .....	193
Figure 124 : HandiMathKey - étude du nombre d'actions avec les personnes valides .....	193
Figure 125 : La distance par clics pour les personnes valides sur HandiMathKey.....	194
Figure 126 : Notre approche de Conception.....	201
Figure 127 : Boitier de commande et de contrôle d'environnement .....	202
Figure 128 : Interface décomposée en sous interfaces .....	202
Figure 129 : Envoi d'une commande de contrôle d'environnement.....	203
Figure 130 : Gestion de l'interaction sur les interfaces SoKeyTo avec le boitier.....	204
Figure 131 : Conception CECI générique .....	205
Figure 132 : Version 1 de l'interface du participant 1.....	206
Figure 133 : Version 7 de l'interface du participant 1.....	208
Figure 134 : Nombre d'erreurs et d'actions d'interactions du Participant 1 .....	210
Figure 135 : Taux d'erreurs des scénarii du participant 1 .....	210
Figure 136 : Apport de la Conception Centrée Utilisateur.....	223
Figure 137 : Evolution de la conception centrée utilisateur .....	232
Figure 138 : Forme de bouton.....	260

Figure 139 : Mouvements sur un exercice Fitts 1D.....	261
Figure 140 : Dessiner une touche rectangle .....	262
Figure 141 : Dessiner une touche PIE menu .....	263
Figure 142 : Représentations de 2 types de touches à gauche le rectangle, à droite une touche de Pie Menu .....	264
Figure 143 : Calcul de la distance moyenne découpage des éléments .....	265
Figure 144 : Calcul de distance à un point d'un segment .....	266
Figure 145 : Calcul de distance à un point d'un arc de cercle.....	267
Figure 146 : Présentation de solution commerciale, A Civikey, B KeyVit, C Discover Envoy, D Clavicom NG, E Qualikeys et F Hot Virtual Keyboard.....	276
Figure 147 : Contrôleur de souris par balayage de CiviKey.....	277
Figure 148 : Contrôleur de souris "Radar" de Civikey .....	277
Figure 149 : Fonction de mouvement Hot Virtual Keyboard .....	280
Figure 150 : Plateforme de modification de clavier pour Hot Virtual Keyboard .....	281
Figure 151 : TnToolkit image [ S.J. Castellucci, I.S. MacKenzie, 2009] .....	282
Figure 152 : TnToolkit évaluation [S.J. Castellucci, I.S. MacKenzie, 2009].....	283
Figure 153 : E-Assist II Evaluation emprunté à B. Merlin et al. 2012.....	284
Figure 154 : Barre de création de Macro .....	286
Figure 155 : Choisir l'option d'identification de la fonction.....	287
Figure 156 : Choix du pictogramme .....	288
Figure 157 : Gestion des couches et de la sélection des touches.....	289
Figure 158 : Accessman avec Pictocom emprunté sur le site <a href="http://www.access-man.com">www.access-man.com</a> .....	308
Figure 159 : Control Omni emprunté au site <a href="http://www.cree.fr">www.cree.fr</a> .....	309
Figure 160 : Housemate Control emprunté au site <a href="http://www.domodep.com">www.domodep.com</a> .....	310
Figure 161 : James4 (emprunté au site <a href="http://www.domodep.com">www.domodep.com</a> ).....	310

Figure 162 : EDiTH Interface pour lire du texte emprunté à la thèse de Souhir Ghedira 2009 .....	312
Figure 163 : Autonomia, Fenêtre écriture et domotique, emprunté à C.E. Steriadis et P. Constantinou, 2003 .....	313
Figure 164 : Version 1 de l'interface du participant 1.....	320
Figure 165 : Version 2 de l'interface du participant 1.....	320
Figure 166 : Version 3 de l'interface du participant 1.....	321
Figure 167 : Version 4 de l'interface du participant 1.....	321
Figure 168 : Version 5 de l'interface du participant 1.....	322
Figure 169 : Version 6 de l'interface du participant 1.....	322
Figure 170 : Version 7 de l'interface du participant 1.....	323
Figure 171 : interface du participant 2 de CECI.....	325
Figure 172 : Echelle de douleur pour le participant 2.....	325
Figure 173 : interface du participant 3 de CECI.....	326

## Table des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des techniques d'interaction .....	60
Tableau 2 : Indices de difficulté (Apprentissage et Test) .....	90
Tableau 3 : Synthèse des commandes de bras robotique .....	112
Tableau 4 : Avis des personnes en situation de handicap .....	118
Tableau 5 : Avis des thérapeutes .....	119
Tableau 6 : Les quatre états des cibles pour la technique du pointage, MPH Version 2.0 ...	125
Tableau 7 : Les deux états des cibles pour la technique du Goal Crossing, MPH Version 2.0 .....	125
Tableau 8 : Les sessions de l'expérimentation.....	133
Tableau 9 : L'ordre de passation des exercices lors de la session 9 .....	133
Tableau 10 : Description des exercices .....	134
Tableau 11 : Tableau de contingence Participant 1 pour les actions supplémentaires et le temps.....	137
Tableau 12 : Tableau de contingence Participant 2 pour les actions supplémentaires et le temps.....	137
Tableau 13 : Taux de réussite des participants pour l'expérimentation 1 JACO .....	138
Tableau 14 : Réussite des exercices en % .....	142
Tableau 15 : Nombre d'erreurs d'interaction avec l'interface pour le participant 1 .....	145
Tableau 16 : Nombre d'erreurs d'interaction avec l'interface pour le participant 2 .....	147
Tableau 17 : Synthèse des plateformes concurrentes à SoKeyTo .....	161
Tableau 18 : Verbatim pour Word et HandiMathKey .....	195
Tableau 19 : Synthèse des communicateurs et contrôles d'environnement .....	199
Tableau 20 : Résultats MPH du participant 1 pour le Pointage .....	270
Tableau 21 : Résultats MPH du participant 1 pour le Goal Crossing .....	270

Tableau 22 : Résultats MPH du participant 2 pour le Pointage .....	271
Tableau 23 : Résultats MPH du participant 2 pour le Goal Crossing .....	271
Tableau 24 : Participant 1 Clavier Déviation Exercice 1 .....	272
Tableau 25 : Participant 1 PIE Menu Niveau Déviation Exercice 1 .....	272
Tableau 26 : Participant 1 PIE Menu Extension Déviation Exercice 1.....	272
Tableau 27 : Participant 1 Clavier Déviation Exercice 2 .....	273
Tableau 28 : Participant 1 PIE Menu Niveau Déviation Exercice 2 .....	273
Tableau 29 : Participant 1 PIE Menu Extension Déviation Exercice 2.....	273
Tableau 30 : Participant 2 Clavier Déviation Exercice 1 .....	274
Tableau 31 : Participant 2 PIE Menu Niveau Déviation Exercice 1 .....	274
Tableau 32 : Participant 2 PIE Menu Extension Déviation Exercice 1.....	274
Tableau 33 : Participant 2 Clavier Déviation Exercice 2 .....	275
Tableau 34 : Participant 2 PIE Menu Niveau Déviation Exercice 2 .....	275
Tableau 35 : Participant 2 PIE Menu Extension Déviation Exercice 2.....	275
Tableau 36 : Tests statistiques sur la Distance.....	304
Tableau 37 : Tests statistiques sur la distance par clic.....	305
Tableau 38 : Table de corrélation et de p-value sur la distance par clic et par session .....	305
Tableau 39 : Tests statistiques sur le nombre d'actions .....	305
Tableau 40 : Tests statistiques sur le temps par session .....	306





# Introduction



Au 1<sup>er</sup> janvier 2015 nous étions 66,3 millions d'habitants résidents en France [INSEE<sup>1</sup>]. L'enquête Handicap-Santé de l'INSEE estime la proportion de personnes en situation de handicap à environ 14% de la population française. Il est estimé qu'un français sur deux sera porteur d'un handicap au cours de sa vie. En 2013, 5,5 millions de personnes se sont déclarées en situation de handicap et près de 5 millions bénéficient d'une aide régulière (financière, aide technique, animal ou humaine) pour accomplir les tâches de la vie quotidienne [AGEFIPH, Association de Gestion du Fonds pour l'Insertion professionnelle des Personnes Handicapées]. En 2012, on dénombre à 2,51 millions, le nombre de personnes en âge de travailler et bénéficiaires de la reconnaissance en qualité de travailleur handicapé RQTH [DARES<sup>2</sup> 2012]. Enfin, d'après le Ministère de l'Éducation Nationale et de son rapport [RERS 2013 (Repères et références statistiques)], le nombre d'élèves en situation de handicap était de 298.361.

Voici d'autres chiffres de l'INSEE, 15% des personnes en situation de handicap ont un handicap survenu dès la naissance ou avant l'âge de 16 ans, dont 85% se sont retrouvées en situation de handicap à l'âge adulte. Il faut aussi tenir compte que 15% des personnes en situation de handicap cumulent au minimum deux types de handicaps. Et surtout, le nombre de personnes en situation de handicap augmente d'environ 300.000 chaque année.

## 1. Quelles sont les situations de handicap en France ?

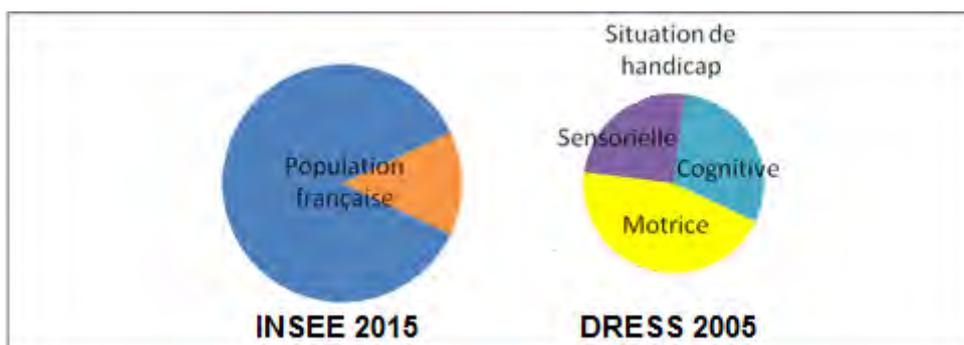


Figure 1 : Situations de handicap en France

<sup>1</sup> INSEE [http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?reg\\_id=0&id=4561](http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?reg_id=0&id=4561) et [http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?reg\\_id=0&id=4211](http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?reg_id=0&id=4211)

<sup>2</sup> Drees. Études et résultats n°416, 2005

La Figure 1 est une synthèse des données de l'INSEE [enquête Handicap-santé 2008-2009]. L'enquête découpe les situations de handicap en 3 groupes parmi la population Française :

- 9% déclarent une déficience et une limitation motrice ;
- 6% déclarent soit une déficience cognitive et une limitation comportementale, soit une limitation intellectuelle, soit une déficience de l'appareil locuteur ;
- 5% déclarent soit une déficience visuelle et une limitation visuelle, soit une déficience auditive et une limitation auditive.

Parmi les 3 groupes définis par l'INSEE, **le handicap moteur représente une part importante du handicap en France. Nous ferons par la suite un focus sur ce dernier.**

## 2. Le handicap moteur

Nous avons, au contact de personnes en situation de handicap moteur, observé une **forte demande** d'aides techniques et de techniques d'interactions. Notre grand challenge est la considération de la grande variabilité dans les capacités motrices de ces utilisateurs. Il faut des interfaces très individuelles, ce qui implique une capacité de configuration suffisante pour s'adapter aux besoins et caractéristiques de l'utilisateur. De plus, les causes du handicap moteur sont variées. Il existe différentes échelles pour les définir. Nous proposons de les identifier au travers des 2 classifications complémentaires faites par M. Delcey (2002). Il propose, en premier, une classification par différents critères. La **date d'apparition** du handicap est importante. Le handicap peut être congénital s'il est dépisté dès la naissance, ou acquis si son apparition survient plus tard. L'échelle « Alberta Infant Motor Scale » [I.C. van Haastert et al. 2006] peut permettre d'observer l'évolution motrice de prématurés, et l'échelle « Activities-specific Balance Confidence (ABC) scale » [S. Schepensa et al. 2010], pour des personnes âgées, permet d'estimer leur capacité d'équilibre. L'**origine** du handicap moteur peut être une malformation, une blessure traumatique, une maladie, ou due à l'âge. De plus, le handicap moteur peut être aussi **évolutif ou non évolutif**. Dans ce cas il peut y avoir une importance pour l'adaptation d'un poste de travail et de son évolution. Pour les infirmes moteurs cérébraux, l'évaluation Motrice Fonctionnelle Globale [F. Girardot 2005], permet de définir l'évolution motrice d'une personne. Cela aidera l'entourage médical à mieux définir les exercices de rééducations. L'une des solutions d'évaluation de la capacité

motrice d'une personne est de proposer des exercices moteurs soit 32 exercices [C. Bérard et al. 2006], soit 21 exercices [C De Lattre et al. 2011]. Il existe aussi des échelles plus ciblées, par exemple, pour l'évaluation de la rééducation des membres supérieurs [C.E. Lang et al. 2006].

Il est important aussi de définir par **mécanismes lésionnels** le handicap. [M. Delcey 2002] définit 3 types de lésions :

- Cérébrales : IMC, IMOC, Traumatismes crâniens, AVC, tumeurs cérébrales, malformations cérébrales, ou d'autres encéphalopathies
- Médullaires et neuromusculaires : blessés médullaires, spina bifida, autres myélopathies, poliomyélite, amyotrophies spinales, neuropathies, myopathies et autres lésions neuromusculaires
- Ostéo-articulaires : malformations, amputations, dysplasies et dystrophies osseuses, scoliose, lésions inflammatoires, infectieuses et, ou, rhumatismales, autres lésions ostéo-articulaires

Cette classification nous permet de voir qu'il existe un grand nombre de pathologies. "*Le handicap est donc une réalité plurielle et nécessairement complexe à mesurer*" [Mormiche, 2000]. Il existe aussi des échelles qui peuvent servir pour évaluer les effets des rééducations motrices. Ces échelles vont servir à l'entourage médical pour nous donner les limitations des personnes en situation de handicap et à partir d'un échange avec le corps médical, nous verrons **comment adapter les aides techniques à une personne en situation de handicap moteur et comment les faire évoluer ?**

### 3. Les aides techniques

La dépendance physique a des répercussions sur la vie quotidienne avec son entourage médico-social et familial. Cette dépendance diminue la qualité de vie des personnes concernées et de leur entourage.

Par exemple, la tétraplégie qui affecte les quatre membres est souvent due à un traumatisme au niveau des vertèbres ou des cervicales. Néanmoins la tétraplégie peut aussi survenir à la suite des maladies neuromusculaires, de la paralysie cérébrale, de la sclérose en

plaques, ainsi que d'autres maladies. La tétraplégie est aussi souvent associée à divers troubles neurologiques cognitifs et/ou sensoriels qui peuvent rendre l'interaction avec une interface ou leur environnement plus difficile.

La prise en charge, le dépistage, le diagnostic et les soins prodigués auprès de ces personnes ont permis d'augmenter leur espérance de vie [B. Azéma, N. Martinez 2005]. Il faut tout de même tenir compte d'autres événements de la vie quotidienne (vieillesse, maladies, accidents) qui engendrent des difficultés supplémentaires et augmentent la dépendance vis-à-vis de l'environnement. A ce stade, économiser les forces devient primordial. Les technologies de suppléance ont pour objectif de réaliser les activités de la personne en toute autonomie avec un minimum de fatigue.

### **3.1. L'influence des différentes affections sur l'usage des aides techniques**

L'usage d'une aide technique par des personnes en situation de handicap moteur est soumis à plusieurs contraintes. Le handicap moteur provoque généralement une fatigabilité rapide qui peut restreindre la durée d'utilisation d'une aide technique dans des conditions optimales [C. Bérard 2004], [F. Vella et N. Vigouroux 2007].

Une faible coordination des mouvements peut empêcher l'utilisation ou augmenter la difficulté d'accessibilité à toutes ou certaines fonctionnalités des aides techniques qui nécessitent plusieurs mouvements pour interagir. La capacité de préhension peut être limitée, ce qui peut rendre difficile la prise en main d'un dispositif. De plus, un manque de sensation, des tremblements, des spasmes peuvent provoquer des erreurs d'interaction ce qui augmente le temps pour réaliser une tâche. Pour pallier ces problèmes, il faut adapter l'aide technique pour permettre à la personne d'être plus précise et plus efficace.

L'une des adaptations consiste par exemple à ralentir l'interaction avec une aide technique, pour diminuer l'effet des mouvements involontaires, ce qui augmente la précision d'atteinte

d'une cible<sup>3</sup>. A l'inverse, un manque de force et une lenteur du mouvement, peuvent nécessiter une accélération (sensibilité du curseur) de l'interaction pour aider la personne en situation de handicap à atteindre les menus, les icônes et les applications qui nécessitent une grande distance de mouvement. De plus, cela évite une grande fatigue due à l'usage de la technique dans le temps.

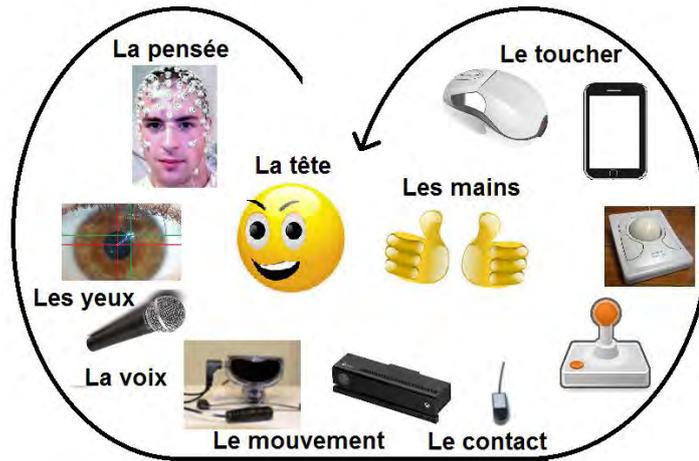
Il est à noter que ces différentes affections, vont influencer les habiletés motrices des membres supérieurs des personnes en situation de handicap. Cette différence va varier suivant les pathologies mais aussi au sein d'une même pathologie. **De plus, l'interaction de l'homme avec une machine (Interface Homme-Machine, IHM), se fait généralement avec les mains, (clavier, souris, tactile ...). Dans la suite de ce manuscrit, nous ne nous intéresserons plus qu'aux personnes ayant une déficience motrice au niveau des membres supérieurs.**

### 3.2. La capacité d'interaction

Ces aides doivent être adaptées à la déficience motrice de la personne pour qu'elle soit maître de son interaction. Le choix des dispositifs dépend des mouvements possibles des membres supérieurs de la personne, mais aussi, de sa capacité à effectuer les mouvements nécessaires en se fatiguant le moins possible. Plus la capacité motrice de la personne est importante plus la quantité de dispositifs qu'il pourra utiliser sera variée (Figure 2).

---

<sup>3</sup> Nous donnerons comme définition de cible, tous objets avec lesquels souhaite interagir l'utilisateur : Bouton, Image, Texte, Menu...



**Figure 2 : Au cœur de l'interaction**

Le comportement d'interaction d'une personne en situation de handicap diffère de celui d'une personne valide. En termes d'interaction, une personne en situation de handicap moteur, aura tendance à faire des mouvements moins linéaires et aura des temps de pause plus importants entre 2 mouvements que des personnes valides [F. Hwang et al. 2004]. L'interface homme-machine a déjà fait l'objet de nombreuses recherches.

Par exemple, dans le domaine de la saisie de textes, plusieurs solutions ont été proposées pour réduire la fatigue et augmenter la vitesse d'écriture. Certaines d'entre elles sont basées sur des systèmes de prédiction de mots [N. Garay-Victoria et J Abascal 2006] et/ou les systèmes de complétion [P. Boissière et al. 2012]. Ces systèmes vont diminuer le nombre d'actions de l'utilisateur. Il est aussi possible d'optimiser l'agencement des touches de claviers [M. Raynal et N. Vigouroux 2005], ce qui permet de diminuer la distance à parcourir par l'utilisateur pour saisir du texte.

Ces claviers sont généralement utilisés avec la technique d'interaction du pointage mais lorsque la personne ne peut pas déplacer le curseur, elle va utiliser la technique d'interaction du balayage<sup>4</sup>. Dans le cas de la technique d'interaction du balayage, la stratégie de balayage permet d'optimiser le temps d'attente des différentes fonctions suivant, par exemple, la fréquence d'usage. C.E. Steriadis et P. Constantinou [2003] montre par exemple que la vitesse d'écriture avec des systèmes de balayage est de 2,34 mots minute pour un balayage par ligne, 2,35 mots pour un balayage en diagonale et de 2,30 pour une écriture par sous matrice. En sachant que la vitesse de balayage est dépendante du nombre de boutons il est aussi possible d'associer le balayage à des outils de prédiction [R.C. Simpson et al. 2006], [T.D. Sanger et J. Henderson 2007]. L'objectif de ces solutions vise à réduire autant que possible l'effort physique et/ou cognitif [H. Horstmann Koester et S.P. Levine 1994], [D. Niemijer 2005].

Grâce à une synthèse [thèse Y. Guerrier, 2015], pour la saisie de texte et la communication, les avantages et les inconvénients pour les personnes atteintes d'IMC ont été identifiés. Cette synthèse a permis à l'auteur de concevoir une aide mobile adaptée, nommée COMMOB pour ces personnes sur l'aspect communication.

**Toutes ces solutions développées pour l'écriture et la communication, ainsi que d'autres solutions détaillées ultérieurement, font partie de l'environnement de cette thèse. Elle va s'enrichir des travaux réalisés pour essayer d'aller au-delà et répondre à différents objectifs en permettant à des personnes d'accéder à leurs besoins en accessibilité et confort d'interaction.**

---

<sup>4</sup> La technique du balayage est un moyen pour la personne tétraplégique de naviguer sur son interface. Elle est composée d'items positionnés en ligne/colonne, 1) Le système balaye les lignes, 2) L'utilisateur en sélectionne une avec son contacteur, 3) le système balaye les colonnes de la ligne, 4) l'utilisateur sélectionne le dernier item.

#### 4. Objectifs de la thèse

En partant des besoins des personnes en situation de handicap, et des solutions proposées dans la littérature, cette thèse a pour objectif d'utiliser des cadres **méthodologiques de conception et d'évaluation expérimentale**. Elle nécessite aussi le développement **d'environnements technologiques de prototypages pour la conception d'interfaces virtuelles de commande et de communication** pour les personnes ayant des **troubles neuro-moteurs et langagiers**. Le but sera de se rapprocher d'une solution appropriée en fonction des pathologies et des besoins.

**Il sera mis en œuvre une conception centrée utilisateur qui permettra de concevoir des solutions adaptées selon les besoins des personnes en situation de handicap. Cette méthode de conception centrée utilisateur sera mise en œuvre dans trois conditions : en premier, une conception centrée utilisateur traditionnelle, avec la personne au cœur du processus de conception, une deuxième, où des personnes mutiques ont besoin de leurs aidants professionnels ou familiaux pour exprimer leurs besoins et enfin une troisième où les experts (professionnels) expriment les besoins des personnes.**

Pour des personnes en situation de handicap moteur des membres supérieurs, la tâche de pointage est difficile. Le Chapitre 1, est composé de plusieurs parties, en premier il sera proposé de réaliser un état de l'art sur le **mouvement de pointage**. Ce dernier est composé d'un mouvement balistique (approche rapide et grossière vers une cible) et d'un mouvement correctif (mouvement de correction de trajectoire pour atteindre la cible). Ces mouvements sont eux même décomposés en sous-mouvements pour l'étude du geste de pointage. Plusieurs métriques ont été définies pour étudier la trajectoire de mouvements et l'atteinte de cibles.

L'identification des difficultés dans un mouvement a vu l'émergence de **solutions d'interaction** qui seront classifiées en fonction : de la modification de la taille des cibles, de la capacité à déplacer des cibles automatiquement, du guidage de l'utilisateur dans les tâches d'interaction pour atteindre les cibles. Ces solutions ont pour but d'améliorer l'accessibilité d'une interface.

Nous compléterons cette première partie du chapitre avec différents **modèles psychomoteurs** de la littérature sur l'étude de cette interaction en particulier avec la loi prédictive de Fitts. De plus une pré-étude avec des personnes valides montrera la différence entre un dispositif dont les utilisateurs sont experts versus novices et une deuxième étude entre 2 dispositifs pour des novices.

En deuxième partie du chapitre 1, nous aborderons la méthode centrée utilisateur, de conception ainsi que la philosophie « Do It Yourself » [A. Hurst et J. Tobias 2011]. Ces méthodes sont au centre de cette thèse. Nous les avons utilisées pour répondre aux besoins des personnes en situation de handicap. Puis, nous aborderons nos outils pour analyser et quantifier l'utilisabilité des solutions générées par cette conception centrée utilisateur. Ces outils (MPH et ECSD) permettront d'aboutir à des **profils utilisateurs de l'interaction** des personnes en situation de handicap.

Ces derniers seront utilisés pour les différents projets autour desquels gravite à cette thèse. L'objectif du travail présenté dans le chapitre 2 concerne la conception centrée utilisateur et l'évaluation des interfaces de commandes alternatives au joystick, pour **le bras robotique de préhension JACO**. Pour atteindre cet objectif, il a été utilisé une méthode participative (brainstorming, focus groupe) qui a permis de définir la base de la conception de trois interfaces virtuelles (un clavier virtuel, un PIE menu niveau et un PIE menu extension). Au cours d'un protocole avec 2 personnes en situation de handicap, les interfaces ont été évaluées en réalisant des tâches écologiques et comparées au joystick d'origine. Les retours de ces expérimentations (données + retour questionnaires) sur les interfaces virtuelles de commande du bras JACO seront étudiés en les confrontant aux résultats des tâches contrôlées de pointage obtenu avec les exercices de la plateforme MPH. Par la suite nous étudierons un autre cadre de conception centrée utilisateur où celui-ci sera indirectement au centre de notre méthode.

Le chapitre 3, quant à lui, répond aux besoins de conceptions d'interfaces virtuelles pour les personnes en situation de handicap moteur. Pour nous aider dans la conception centrée utilisateur, nous utiliserons la **plateforme SoKeyTo**. Elle a été poursuivie et améliorée dans le cadre de la thèse. C'est une boîte à outils qui permet de spécifier des événements à associer à des touches. L'interface de SoKeyTo permet de définir, à la fois, les caractéristiques

morphologiques de la touche (taille, couleur, forme, agencement spatial) et l'événement associé (entrée de texte, message de restitution vocale, appel à des applications). Elle permet également de choisir et de paramétrer la technique d'interaction.

La plateforme SoKeyTo [D. Sauzin et al. 2014] a été comparée aux outils de conception d'interface virtuelle. SoKeyTo possède comme spécificité une configuration fine des techniques d'interaction (pointage, clic temporisé et balayage) et une gestion des erreurs d'interaction.

Les aides techniques que nous avons analysées répondent souvent d'une manière très générale aux besoins des personnes ; en ce sens, elles ne satisfont pas toujours aux demandes multiples et variées des utilisateurs. Il faudra donc réfléchir aux besoins spécifiques à chaque personne. SoKeyTo permet donc de créer une solution adaptée à la personne, en plaçant la personne ou ses aidants (professionnels et/ou familiaux) au cœur du processus de conception. La méthode de conception centrée utilisateur et la plateforme SoKeyTo ont été mises en œuvre dans la conception de deux types d'interfaces de commandes : les interfaces virtuelles CECI et HandyMathKey.

Les **interfaces virtuelles CECI**, conçues avec le concept « do it yourself » [A. Hurst et J. Tobias 2011] a pour but de répondre aux besoins des personnes ayant des troubles neuro-moteurs. Elles accèdent, ainsi, à leurs différents besoins (communication, contrôle de l'environnement, loisirs...). De plus, ces interfaces ont été conçues avec les équipes cliniques de centres de rééducation.

L'interface **HandiMathKey** quant à elle émerge d'un besoin exprimé par des ergothérapeutes et des professeurs de mathématiques travaillant à l'ASEI<sup>5</sup> (Agir, Soigner, Eduquer et Insérer). Les enfants en situation de handicap moteur ont des difficultés pour écrire des formules de mathématique sur l'ordinateur. A partir de notre méthode de conception avec les professeurs et les ergothérapeutes nous avons réalisé l'interface

---

<sup>5</sup>[http://www.asei.asso.fr/index.php%3Foption%3Dcom\\_content%26task%3Dview%26id%3D40%26Itemid%3D84](http://www.asei.asso.fr/index.php%3Foption%3Dcom_content%26task%3Dview%26id%3D40%26Itemid%3D84)

HandiMathKey. Celle-ci est une solution simple pour écrire les formules. Une première évaluation montrera que cette solution permet un gain en termes de temps d'écriture et de distance parcourue sur l'ordinateur pour écrire.

Dans cette thèse, nous montrerons en quoi la méthode centrée utilisateur permet de concevoir des aides techniques prenant en compte les besoins et les aptitudes des personnes.



# **Chapitre 1 : Etude de l'interaction chez les personnes handicapées moteur des membres supérieurs : méthodes et outils**



Une personne en situation de handicap, pour interagir avec un système informatique, va utiliser différentes aides techniques. L'aide technique utilisée dépendra des mouvements résiduels de la personne : mouvements restant après un accident ou d'une maladie. Ces mouvements permettent l'interaction. Celle-ci est composée de déplacements et de validations, qui permettent respectivement de désigner une tâche et de la réaliser. **L'objectif de ce chapitre est de recenser et analyser dans la littérature les solutions d'interaction proposées, les outils des méthodes de conception centrées utilisateur. Nous présenterons par la suite nos outils pour définir un comportement prédictif de nos utilisateurs.**

Pour ce faire, nous allons étudier le mouvement au travers de différentes métriques qui traduisent les difficultés d'interaction qu'un utilisateur peut rencontrer. A la suite une liste exhaustive de solutions sera proposée pour augmenter l'interaction et permettre une facilitation de celle-ci. Ce chapitre se terminera avec les modèles qui permettront d'évaluer les différentes solutions.

Sur un ordinateur, la sélection sera généralement effectuée par le mouvement du curseur à l'écran, le curseur désignant l'objet ou l'action sur lequel il se trouve. **Quelles sont les particularités de ce mouvement ?**

## 1. Etude des mouvements d'interaction

Il existe 2 approches dans la réalisation d'une tâche, une approche globale du mouvement, et une étude des sous-mouvements qui va s'intéresser à leur variation.

### 1.1. Approche globale du mouvement

L'étude du mouvement est ancienne. En 1899, R. Woodworth effectue une expérience qui consiste à déplacer un crayon le long d'une ligne entre 2 repères dont les aller retours sont rythmés par un métronome à la vitesse variable. Pour enregistrer le mouvement, il fait défiler un papier sous l'espace de travail. Il définira de l'analyse de la vitesse du mouvement, 2 phases dans le geste d'atteinte d'une cible. La première phase, **balistique**, consiste à s'approcher rapidement de l'objet cible ; ce mouvement est dit « non contrôlé » au-delà de l'impulsion du mouvement. La vitesse maximale atteinte se produit avant la moitié du parcours (40% d'après M. Jeannerod (1984)). La deuxième phase, **corrective**, permet

d'ajuster le mouvement afin d'acquérir la cible. Lors de ce mouvement, la vitesse peut avoir plusieurs oscillations, chaque oscillation correspond à un ajustement de la trajectoire.

Une autre expérimentation [M.I. Posner et S.W. Keele 1968] propose à l'aide d'un stylet d'atteindre une cible. Ici les participants vont devoir effectuer ce pointage avec lumière une fois sur deux, sinon dans le noir. Lorsque la lumière est allumée le temps d'atteinte de la cible est supérieur de 200 millisecondes. Ce temps correspond à l'utilisation de la vue pour corriger la trajectoire du mouvement de pointage. Cette valeur a été confirmée dans d'autres travaux [L.G. Carlton, 1981], [B. Hawkins et al. 1983]. Cette trajectoire de mouvement est constamment corrigée lors de l'utilisation d'un ordinateur avec une souris.

Pour l'usage d'une souris d'ordinateur, et pour tout autre dispositif manipulant un curseur, il y a 2 mouvements. Le premier est celui de l'utilisateur sur le dispositif et le deuxième celui du curseur dépendant du mouvement de la souris. La vitesse de mouvement du curseur n'est pas forcément égale à la vitesse de déplacement de la souris [C.B. Gibbs 1962] la notion de **Control Display gain** (CD gain (1)) apparaît.

$$CD\ gain = \frac{V\ pointeur}{V\ dispositif} \quad (1)$$

Le CD gain définit la calibration d'un dispositif, c'est-à-dire la vitesse du pointeur en fonction de la vitesse du déplacement du dispositif. Le choix du gain est donc dépendant des mouvements de l'utilisateur et il doit en tenir compte pour le confort de celui-ci. W.L. Jenkins et M.B. Connor en 1949 ont proposé une expérimentation afin de choisir la calibration la plus adaptée. Ils demandent à leurs participants d'atteindre des cibles en effectuant en premier un mouvement balistique rapide vers la cible puis d'ajuster avec un mouvement correctif. Leurs résultats montrent que plus la vitesse est élevée plus les mouvements balistiques sont rapides. Par contre, le mouvement correctif sera plus long. A l'inverse, une vitesse lente, rallongera le mouvement balistique et diminuera aussi le mouvement correctif. Il faut donc choisir un équilibre dans la calibration pour une vitesse la mieux adaptée aux deux mouvements, balistique et correctif.

Il faut donc privilégier un gain modéré [C.B. Gibbs 1962], qui permet d'avoir ni une vitesse trop lente pour le mouvement balistique, ni une vitesse trop rapide pour l'approche corrective. S. Zhai et al. (1996) ont montré que les performances étaient dépendantes des

groupes de muscles (doigt, poignet ...) utilisés pour un dispositif. **Pour une population en situation de handicap moteur des membres supérieurs, dont les performances musculaires varient, nous pouvons poser comme hypothèse que le choix de la calibration est lié aux difficultés motrices.**

Plutôt que de chercher un équilibre entre les deux mouvements balistique et correctif, il a été mis en place sur les différents systèmes d'exploitation une adaptation dynamique du CD gain en fonction de l'accélération du mouvement. Lorsque l'accélération est forte, c'est un mouvement balistique ; le mouvement du curseur doit être rapide. Lorsque l'accélération est faible, c'est un mouvement correctif ; il faut aller lentement pour atteindre une cible avec un minimum d'erreurs.

Pour un gain dynamique nous avons 2 possibilités :

- Avoir un changement de CD gain par paliers, lorsqu'on atteint une valeur, le CD gain change. E. Graham (1996), et, U. Trankle et D. Deutshmann (1991) ont montré qu'un gain non continu n'apporte aucun avantage.
- Avoir un changement de CD gain continu et dépendant de l'accélération. G. Casiez et al. (2008) ont étudié la différence entre un gain constant et un gain dynamique à fonction continue. Il a été demandé aux participants, dans une première étude, d'effectuer une tâche à une dimension d'atteinte de cible (Figure 3). Les cibles varient en fonction de 8 couples « taille et distance ». Chaque participant va utiliser les 2 techniques avec 6 calibrations de gain constant et avec 6 calibrations de gain dynamique. Une deuxième étude concerne l'impact de cible à haut niveau de difficulté d'atteinte (soit lointaine et petite). L'étude est identique à la précédente, mais les couples « distance / taille de cible » sont différents. La conclusion, sur le gain constant contre le gain dynamique, est que le gain dynamique est 3.3% plus performant de façon générale face au gain constant, mais qu'il atteint 5.6% sur les cibles de plus petites tailles.

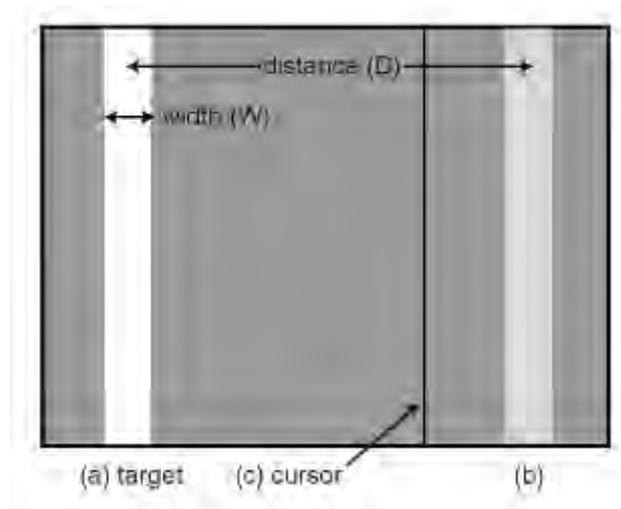


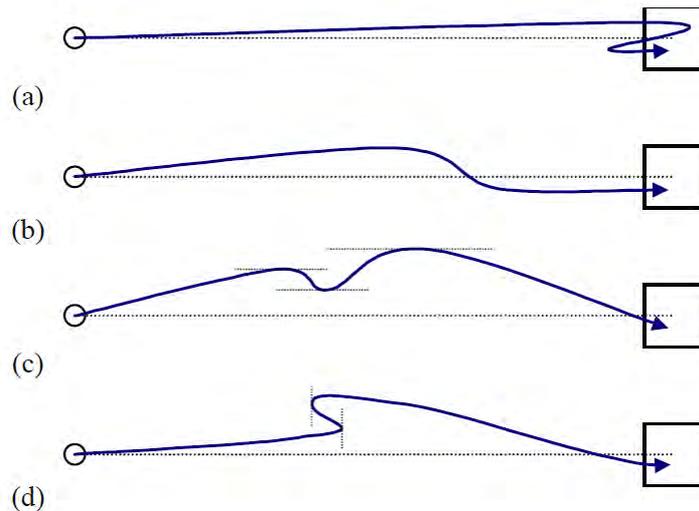
Figure 3 : Expérimentation de pointage une dimension [G. Casiez et al. 2008]

Les gains de performances pour les personnes valides sont intéressants ; ils montrent une étape importante d'adaptation d'un dispositif. Pour les personnes en situation de handicap, c'est une étape importante qui peut affecter grandement le ressenti et les performances. La calibration permet d'optimiser les deux mouvements principaux d'une atteinte de cible. **Il faut adapter et configurer un dispositif à la personne.** Il faut tout de même des métriques pour vérifier si une configuration est adaptée, il est possible d'étudier plus en profondeur les mouvements en analysant les différents sous-mouvements que l'on peut observer.

## 1.2. Etude des sous-mouvements

I.S. Mackenzie et al. (2001) ont proposé de définir plusieurs observations du mouvement. Elles sont représentées dans les 2 figures ci-dessous (Figure 4 et Figure 5).

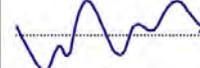
La première métrique proposée par I.S. Mackenzie et al. (2001) est le TRE (Target Re-Entry, Figure 4 (a)). C'est un compteur du nombre de fois que le tracé du mouvement entre et sort d'une cible à atteindre, avant sa validation. L'avantage du TRE est qu'il permet de calculer le nombre de fois où l'utilisateur a effectué un mouvement balistique trop important.



**Figure 4 : Variation du mouvement, (a) Target Re-Entry, (b) Task Axis Crossing, (c) Movement Direction Change, (d) Orthogonal Direction Change [I.S. Mackenzie et al. 2001]**

Les 7 métriques suivantes qu'I.S. Mackenzie et al. (2001) proposent dépendent de l'axe de la tâche. Cet axe de la tâche est défini par la ligne reliant la position initiale du mouvement, au centre de la cible à atteindre. Il représente la distance la plus courte pour atteindre le centre d'une cible ; c'est le mouvement dit idéal.

Le TAC (Task Axis Crossing (Figure 4 (b))), le MDC (Movement Direction Change (Figure 4 (c))) et le ODC (Orthogonal Direction Change (Figure 4 (d))) sont des compteurs. Le TAC représente le nombre de fois pour lesquelles le mouvement va se croiser avec l'axe de la tâche. Le MDC est corrélé au TAC. On pose le mouvement dans un repère avec l'axe de la tâche sur l'abscisse. Le MDC compte le nombre de fois pour lesquelles le mouvement passe d'une augmentation à une diminution de l'ordonnée, et inversement. L'ODC est l'équivalent du MDC pour l'abscisse, il compte le nombre de fois que le mouvement passe d'une augmentation à une diminution de l'abscisse, et inversement. Ces 3 métriques permettent de calculer le nombre de variations de directions dans un mouvement. Plus la valeur est importante, plus elle pourra faire ressortir une instabilité ou des difficultés dans le mouvement.

	Movement Responses			
				
Movement Variability	Low	Low	High	High
Movement Error	Low	Very High	High	Very High
Movement Offset	Low	High	Low	High

**Figure 5 : Comparaison entre "Movement Variability", "Movement Error" et "Movement Offset" [I.S. Mackenzie et al. 2001]**

MV (Movement Variability), ME(Movement Error) et MO (Movement Offset) sont des mesures continues du mouvement par rapport à l'axe de la tâche. Ils permettent de quantifier l'importance des variations du mouvement (Figure 5).

MV (2) est l'écart-type des ordonnées « y » du mouvement par rapport à l'axe de la tâche.

$$MV = \sqrt{\frac{\sum(y_i - \bar{y})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

ME (3) est la distance moyenne du mouvement par rapport à l'axe de la tâche.

$$ME = \frac{\sum |y_i|}{n} \quad (3)$$

MO est la moyenne de l'écart entre les ordonnées « y » par rapport à l'axe de la tâche.

$$MO = \bar{y} \quad (4)$$

Ces mesures sont complémentaires à l'étude du mouvement, un mouvement avec un (des) TRE va nécessiter un temps supplémentaire pour revenir sur la cible pour la valider. Quant au MO, plus il est important, moins le mouvement de pointage est efficace. **Le MO et le TRE sont les deux seules variables indépendantes dans l'étude d'I.S. Mackenzie et al. (2001), qui ont une influence sur l'étude du mouvement.**

F. Hwang et al, 2004, proposent une autre définition du sous-mouvement, il se situe entre les pauses des déplacements du curseur. A partir de cette définition F. Hwang et al, ont proposé un exercice à 6 personnes en situation de handicap et à 3 personnes valides.

L'exercice se composait de 16 cibles rondes d'une taille de 40 pixels positionnées en cercle autour d'une cible central. Une des cibles positionnées sur le cercle s'allumait en rouge aléatoirement, l'utilisateur la pointait, puis revenait sur la cible centrale. A partir de cette expérimentation, il a été démontré que **le comportement d'interaction des personnes en situation de handicap moteur et celui des personnes valides est différent**. Les personnes en situation de handicap ont mis plus de temps pour réaliser les tâches et leur nombre de sous-mouvements a été aussi plus élevé. Ceci explique le temps supplémentaire nécessaire à la réalisation de la tâche.

Les travaux de F. Hwang et al. (2004) et de J.O Wobbrock et K.Z. Gajos (2008) montrent que les déplacements du curseur du dispositif de pointage ont **une plus grande variation**, dans les sous mouvements, pour les personnes en situation de handicap moteur par rapport aux personnes valides. De plus, le temps moyen d'un **clic souris peut être plus lent** chez les personnes en situation de handicap moteur.

Tous ces problèmes de déplacement du curseur et de clics souris empêchent d'interagir correctement avec un ordinateur pour communiquer, accéder à l'information, etc. De plus, si la personne utilise longtemps son ordinateur, elle va ressentir de la fatigue motrice au niveau des membres supérieurs.

Afin d'améliorer l'interaction chez des personnes en situation de handicap moteur, différentes solutions existent. Ces solutions ont pour objectifs de répondre à des besoins ou des difficultés, pour une tâche d'interaction. Nous allons maintenant analyser les différentes solutions qui sont proposées dans la littérature pour améliorer l'interaction pour ces personnes.

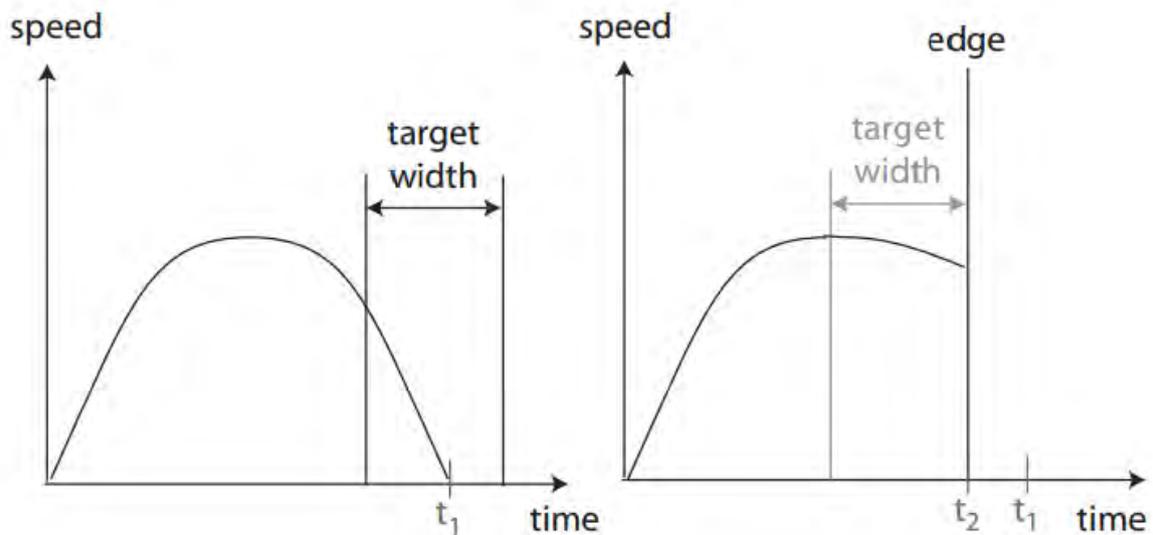
## 2. La taxonomie des techniques d'interaction

Pour faciliter l'interaction nous avons 2 approches possibles, soit **agir sur la cible**, soit **agir sur le curseur**.

### 2.1. Les techniques d'interaction qui agissent sur la cible

Une cible, un bouton d'interaction, est définie par sa taille. Plus elle est petite, plus difficile sera l'atteinte de celle-ci. Elle est aussi définie par sa position à l'écran. C. Appert et al.

(2008), ont proposé une étude sur des cibles qui seraient sur le bord d'un écran. La largeur de la cible sur le bord d'un écran peut être dite infinie. En effet, lorsque le curseur arrive sur le bord de l'écran, il est arrêté et contenu dans la cible. De plus, le mouvement correctif est diminué puisque le bord de l'écran bloquera automatiquement les mouvements balistiques trop amples (Figure 6).



**Figure 6 : Différence entre à gauche un mouvement d'atteinte classique, et à droite l'atteinte d'une cible en bord d'écran [C. Appert et al. 2008]**

Mais la taille et la position d'une cible ne sont pas les seules solutions, il est possible de **donner de l'intelligence à une cible par : l'automatisation des cibles, le grossissement des cibles, le déplacement des cibles et la diminution du nombre de cibles.**

### **2.1.a. Automatisation des cibles**

La première méthode va consister à valider automatiquement les cibles sans effectuer un clic souris. **Le Goal Crossing** (Figure 7) consiste à valider automatiquement une cible traversée par le mouvement du curseur [J. Accot, S. Zhai, 1997 et 2002]. La cible ne nécessite plus un arrêt dessus. Ceci permet, comme pour la cible en bord d'écran, d'avoir une largeur de cible dite infinie pour arrêter le mouvement. La difficulté d'atteinte dépend donc de la taille de la cible qui détermine l'angle d'approche pour l'atteindre. L'avantage pour des personnes en situation de handicap moteur, est que cette technique permet d'enlever la difficulté de l'appui sur le bouton de la souris. Toutefois, l'un des inconvénients de cette

technique est que si d'autres cibles sont sur le trajet de la cible à atteindre, il faudra effectuer un mouvement d'évitement pour ne pas les valider. I.S. MacKenzie, 1992, a proposé la technique du Stroke Through. Elle consiste à utiliser, en plus du Goal Crossing, un clic maintenu lors du passage sur une cible. Toutefois, elle n'a pas l'avantage de ne pas faire d'appui comme le Goal Crossing ; de plus l'action « glisser-lâcher » au-dessus d'une cible est plus contraignante qu'un pointage classique d'atteinte de cible en termes de précision (Avec une souris, 3,5% d'erreur au pointage et 10,8% d'erreur au « glisser-lâcher ») et de temps (Avec une souris, 674ms pour le pointage et 916ms pour le « glisser-lâcher ») [I.S. Mackenzie et al. 1991].

L'une des autres solutions, pour éviter le clic, est d'ajouter au bouton un délai. A la fin de ce dernier, si le curseur reste suffisamment longtemps dans une cible, l'action est automatiquement lancée. Cette solution est nommée **Dwell Clicking** (Figure 7). Elle peut être associée aussi à un effet de répétition si l'on reste encore plus de temps dans une cible. De plus, [A.M. Penkar et al. 2012] ont montré que plus le temps d'attente est élevé, plus la précision est élevée. Toutefois, cette solution demande un temps équivalent au pointage pour l'atteinte d'une cible. Mais en plus, il faudra attendre le temps de temporisation choisi pour cette technique. Cette technique est tout de même à retenir pour les personnes en situation de handicap pour lesquelles l'action de validation est impossible, voire difficile et fatigante.

Sur ce constat W. Feng et al. 2014, ont proposé comme technique le **Reverse Crossing** (Figure 7). Cette technique est similaire au Goal Crossing dans le sens où il suffit d'entrer et de sortir d'une cible pour qu'elle se valide. Toutefois, la sortie de la cible devra s'effectuer du même côté que son entrée. Ceci nécessite un changement de direction du mouvement dans la cible. Par contre, l'avantage est que le Reverse Crossing est plus rapide que le Dwell Clicking de 0,6 seconde. Il peut être un choix à privilégier face au Dwell Clicking. Il a tout de même un inconvénient : la précision du Reverse Crossing (79,3%) est inférieure à celle du Dwell Clicking (96,7%). La précision est directement liée à la taille de la cible ; si elle est suffisamment grande, ce défaut peut devenir négligeable.

Suite à des observations, pour les personnes en situation de handicap, l'automatisation des cibles a pour avantage d'éviter à la personne d'effectuer des validations qui peuvent être

difficiles, douloureuses et fatigantes. De plus j'ai observé sur des personnes en situation de handicap que l'utilisation d'un dispositif de pointage peut nécessiter de lâcher et de reprendre le dispositif pour atteindre les boutons de validation ; l'automatisation est donc une solution pour permettre d'interagir sans lâcher le dispositif.

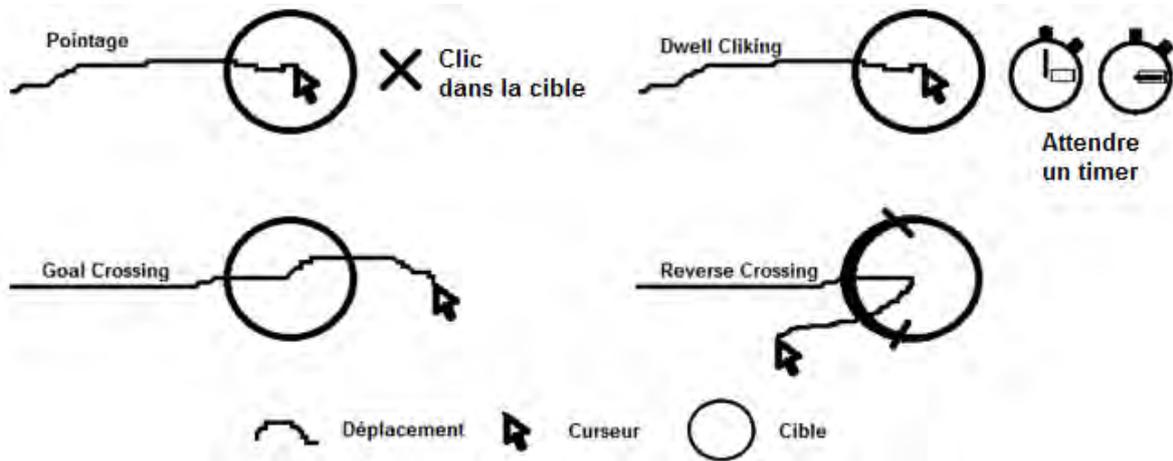


Figure 7 : Automatisation des cibles vs pointage

### 2.1.b. *Grossissement des cibles*

#### 2.1.b.i. *Grossissement de la taille visuelle de la cible*

Augmenter la taille des cibles est une solution pour en faciliter l'atteinte avec précision. De plus, cela augmente la précision du Reverse Crossing [W. Feng et al. 2014], et diminue le temps de mouvement correctif pour l'atteinte de cible. C'est uniquement valable si l'espace moteur<sup>6</sup> de l'utilisateur est aussi augmenté, ce qui se traduit par un mouvement plus important par l'utilisateur pour sortir d'une cible, lorsqu'il est dans la cible. Dans le cas contraire on parlera de Zoom ; que la cible soit grossie ou non, l'utilisateur devra effectuer le même mouvement pour en sortir. Il n'y aura aucun gain de temps, mais cela améliorera la lecture du contenu (label, image, etc.) des petites cibles pour des personnes qui auraient un trouble visuel.

---

<sup>6</sup> L'espace moteur correspond à la distance réelle parcourue par un dispositif physique.

Dans le cas d'un **Fish-Eye** (lentille de grossissement), l'espace moteur d'une cible va augmenter proportionnellement à la taille visuelle de la cible ; plus le curseur s'approche, plus celle-ci devient grande. M. McGuffin et R. Balakrishnan (2004) proposent 2 versions de grossissement. Dans la 1<sup>ère</sup>, les cibles peuvent se superposer mais les cibles qui grossissent vont en cacher d'autres. Dans la deuxième, la cible la plus grosse pousse ses voisines plus petites. S. Zhai et al. 2003, montrent que l'utilisateur peut facilement s'adapter à l'agrandissement des cibles et profiter de ses avantages. A. Firth et A. Cockburn (2003) montrent que le grossissement des touches permet une sélection plus rapide que des touches classiques. Toutefois, l'agrandissement de touches reste plus lent que le Goal Crossing [J. Accot et S. Zhai 2002]. M. Raynal, P. Truillet (2007) ont mis en place le Fish Eye sur un clavier de saisie virtuelle. Ils ont montré que les utilisateurs ont mis moins de temps, ont commis moins d'erreurs et ont parcouru moins de distances qu'avec un clavier virtuel classique. Le système BigKey [K. Al Faraj et al. 2009] est un clavier virtuel de prédiction qui va agrandir uniquement les touches prédites. Ce système permet un gain de l'ordre de 25% par rapport à un clavier virtuel classique.

#### 2.1.b.ii. Grossissement moteur de la cible sans changement graphique

Une autre possibilité est de grossir l'espace moteur associée à la touche sans changer son apparence. Une grande partie d'une interface est inutilisée ; à partir de ce constat, P. Baudisch et al. (2008) proposent deux techniques afin d'utiliser tout l'espace de l'interface. La première, nommée **Voronoi**, est basée sur l'algorithme de S. Fortune (1987), qui consiste à associer tout point de l'espace à la cible la plus proche (Figure 8 b). La deuxième, **Starburst**, consiste à créer des zones de taille égale pour chacune des touches. L'algorithme va créer, par rapport au centre des nuages de cibles, des trainées de chacune des cibles vers l'extérieur du nuage (Figure 8 c). Dans l'analyse des performances du Starburst, l'exécution de l'algorithme est plus longue à mettre en place. Mais le taux d'erreurs est de 4% pour le Starburst contre 10% pour le Voronoi. Pour le temps d'atteinte des cibles, il est équivalent lorsque les cibles sont espacées et peu nombreuses, sinon le Starburst donne un gain de temps de plus en plus important face au Voronoi.

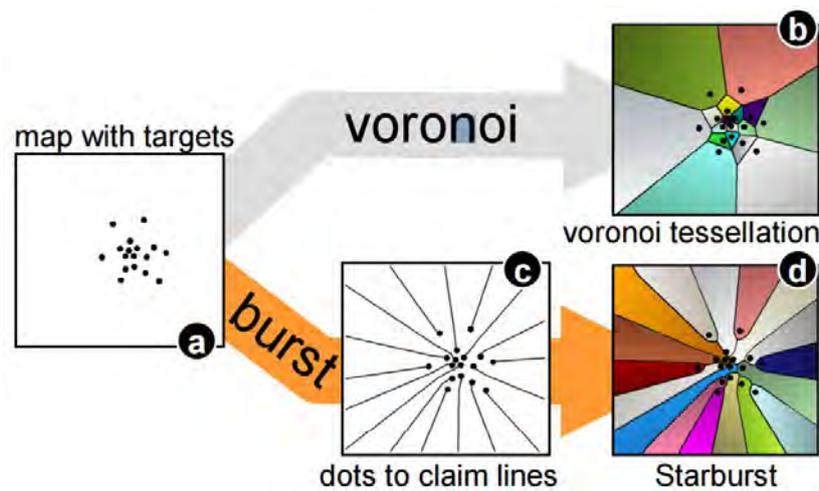


Figure 8 : Voronoï et Starburst [P. Baudisch et al. 2008]

Il existe une autre solution pour améliorer l'espace moteur d'atteinte de cibles. Le **pointage sémantique**, proposé par R. Blanch et al. (2004), en fait partie. Lors de l'entrée d'une cible, le CD Gain va varier afin d'augmenter la distance motrice parcourue dans la cible. Ceci donnera une impression de cible collante. De plus, la difficulté d'atteinte de cibles dépend de la taille de l'espace moteur et non de la taille visuelle, cela rend ces cibles plus simples d'atteinte. L'avantage que propose le pointage sémantique diminue si plusieurs cibles sont dans la trajectoire du mouvement de l'atteinte de la cible souhaitée [G. Casiez et al. 2011]. Une solution à ce défaut est d'ignorer des cibles en fonction du niveau d'accélération du curseur [R Blanch et al. 2004].

Le **sticky icons** proposé par N. Walker et al. (1997), est basé sur le principe de cibles collantes ; à l'approche d'une cible le CD Gain est diminué, ce qui permet d'atteindre plus facilement les petites cibles. Toutefois si le nombre de cibles est important, entre la cible que l'on veut valider et le point initial d'un mouvement, l'effet de cible collante va ralentir l'atteinte de la cible de façon importante. A. Firth et A. Cockburn 2003 proposent d'activer la fonction de colle en fonction de la vitesse ; si l'on est au-delà d'un certain seuil de vitesse, on suppose qu'il s'agit d'un mouvement balistique et qu'il n'est pas encore nécessaire d'améliorer la précision en ralentissant.

Le "**Kinematic Endpoint prediction**" proposé par L. Edward et al. 2007, J. Ruiz et al. 2009, utilise un système de prédiction, qui va grossir les cibles prédites, en fonction de la

trajectoire du mouvement. Ce système augmente la précision d'atteinte de la cible ; il est toutefois dépendant de l'algorithme de prédiction, à savoir s'il agrandit correctement la bonne cible.

Les personnes en situation de handicap avec des mouvements involontaires, peuvent avoir des difficultés à rester sur une cible pour pouvoir la valider. Les solutions de grossissements des cibles permettent de rester et d'atteindre plus facilement des cibles. Toutefois cela nécessite un effort supplémentaire pour quitter une cible qui ne serait pas la bonne [R Blanch et al. 2004]. Ces solutions en réclament d'autres pour permettre de bien désigner la bonne cible.

### 2.1.c. Déplacement des cibles

P. Baudisch et al. (2003) ont mis au point deux techniques appelées **Drag'n Pop** ou **Drag'n Pick** (Figure 9). Le Drag'n Pick va créer un double des cibles à proximité du curseur ; les cibles doublées sont choisies en fonction d'un système de prédiction qui fonctionne à partir de la direction du mouvement. Pour le Drag'n Pop, c'est une évolution du Drag'n Drop : lors d'un Drag'n Drop, sur le même principe que le Drag'n Pick, les cibles qui peuvent interagir avec l'objet saisi (Par exemple un fichier texte qui peut interagir avec Word, Note pad, etc.) vont générer un double du raccourci à proximité du curseur. L'avantage de cette solution est de diminuer la distance parcourue pour atteindre une cible. Mais le principal défaut de cette technique est la capacité du système de prédiction à prédire les cibles à doubler.

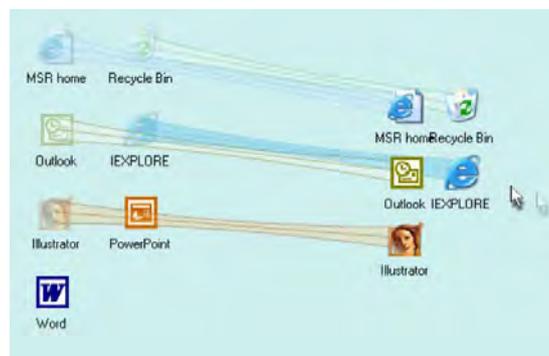


Figure 9 : le Drag'n Pick [P. Baudisch et al. 2003]

#### *2.1.d. Diminution du nombre de cibles aux travers d'une arborescence de menus*

Le nombre de cibles pouvant être très important, Il est possible de créer des menus dans lesquels les utilisateurs vont se déplacer pour accéder, en différentes étapes, au menu souhaité. L'organisation d'un menu a une influence sur les performances de la personne. Ces menus sont présentés sous forme d'arborescence telle que le menu démarrer des systèmes Windows. Ce menu déroule différents sous-menus en colonne, ce qui nécessite un mouvement en ligne droite pour atteindre les différentes cibles (ici un sous-menu).

Parmi les menus nous retenons le **PIE Menu** [J. Callahan et al. 1988] qui est un menu circulaire (Figure 10). Les cibles sont distribuées dans un cercle autour du centre du menu. Le mouvement dans une direction depuis le centre peut être suffisant à la sélection d'un menu ou d'un sous-menu.

Au niveau des performances du PIE Menu (Figure 10) pour une simple sélection de commandes, [Callahan et al. 1988] montre que l'utilisateur réalise ses actions de 15 à 20% plus rapidement. De plus on parcourt moins de distance sur un PIE Menu par rapport au menu Linéaire ; les cibles sont donc plus faciles à atteindre si elles sont de même taille. Le PIE Menu permet une recherche visuelle rapide étant donné le nombre faible d'items dans les menus. De plus si le nombre de cibles devient trop important pour l'affichage (dépend des labels et des pictogrammes), il est possible d'augmenter le nombre de sous menus pour répartir dans les sous menus les différents boutons. Les Pie Menu classiques sont limités à l'exécution unique de commandes. Ils ne permettent pas le choix de valeur en dehors de boutons de valeurs fixées à l'avance ou d'un bouton « - » (Moins) et d'un bouton « + » (Plus) contrairement à des scroll bars ; ce qui s'avère non affordante et peu efficace.

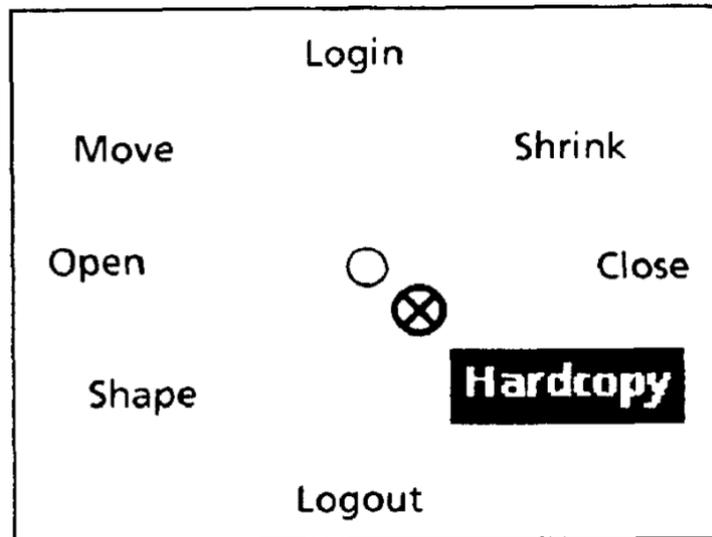


Figure 10 : Pie Menu [J. Callahan et al. 1988]

Les PIE Menus ont pour avantage de pouvoir se coupler aux autres techniques d'interaction qui ont été présentées ainsi que les suivantes qui seront présentées sur la manipulation des curseurs. Par exemple G. Fitzmaurice et al. (2008), propose d'associer au curseur un PIE Menu pour interagir avec une application de dessin, ou toute autre application qui utilise des « toolbars » (des barres d'outils). L'utilisation de cette technique permet de gagner 20% de vitesse par rapport aux barres d'outils.

Il est aussi possible d'augmenter les PIE Menu. Par exemple S. Gebhardt et al. (2013) proposent différentes extensions. Les éléments de base qu'ils proposent en tant qu'éléments des PIE Menu sont : des cases à cocher, des boutons radio, une échelle de valeurs, une grille de couleurs et un éditeur de couleurs (Figure 11). Il est montré que l'ajout d'une extension aux des PIE Menus permet d'améliorer les interactions avec différentes applications.

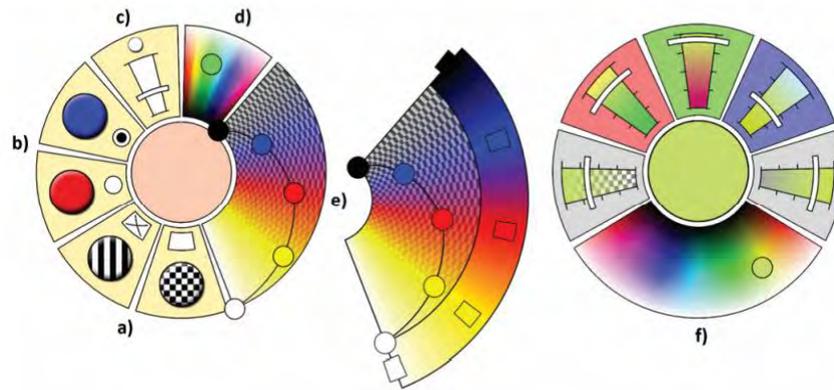


Figure 11 : Différentes extensions de Pie Menu [S. Gebhardt et al. 2013]

Agir sur la cible n'est pas la seule solution. Il est aussi possible d'agir sur le curseur en lui donnant de l'intelligence par : le changement de la taille du curseur, l'effet de la cible sur le mouvement du curseur, les mouvements de plusieurs curseurs et l'interaction sans mouvement, ou avec mouvement automatique.

## 2.2. Les techniques d'interaction qui agissent sur le curseur

### 2.2.a. *Changement de la taille du curseur*

P. Kabbash et W. Buxton (1995), proposent d'agrandir la zone d'interaction du curseur, lors d'une atteinte de cible. La difficulté induite ne provient plus uniquement de la taille de la cible mais aussi de celle du curseur quand ce dernier est plus grand. L'inconvénient est que plusieurs cibles peuvent se trouver dans la zone du curseur. N. Walker et al. (1997) ont proposé de combiner une zone de curseurs et un curseur. Le curseur est au centre de la zone. Si plusieurs cibles se trouvent dans la zone, c'est le curseur central qui permettra de sélectionner la bonne cible. Sur l'expérimentation de Walker et al. [1997], les résultats moyens d'atteinte de cible sont pour la zone de curseurs de 591ms pour les jeunes et de 1204ms pour les personnes âgées alors que pour le curseur normal il est de 759ms pour les jeunes et de 1894ms pour les personnes âgées. De plus dans leur discussion, ces auteurs soulignent que les résultats montrent que le curseur dans la zone n'améliore la technique que pour les cibles proches. Cette technique offre un avantage pour les personnes âgées qui peuvent avoir des difficultés pour atteindre de très petites cibles.

T. Grossman et R. Balakrishnan, (2005), proposent d'ajouter un changement dynamique sur la taille de la zone du curseur (**Bubble Cursor**). Lorsqu'une large zone (Figure 12 (a)) arrive sur une seule cible, elle est dite « capturée » et donc validée. Par contre, si la zone contient 2 cibles (Figure 12 (b)) aucune des deux ne sera capturée. Lorsqu'un minimum de 2 cibles se trouve sous le curseur, la réaction du curseur sera de rétrécir la zone du curseur en gardant le même centre du curseur jusqu'à ce qu'une seule des 2 cibles soit dans la zone (Figure 12 (c) et (d)). Il pourra ainsi capturer la cible restante.

O. Chapuis et al. , 2009, ont proposé d'associer la taille dynamique de la zone du curseur à la vitesse de déplacement de cette dernière. Plus celle-ci est rapide, plus elle grandit jusqu'à une taille maximale. Dans le cas où plusieurs cibles se trouvent dans la zone, ce sera la plus proche du centre qui sera valide. A faible vitesse la zone se comportera tel un curseur classique. La technique est équivalente au Bubble Cursor soit 18% plus performante qu'un curseur classique.

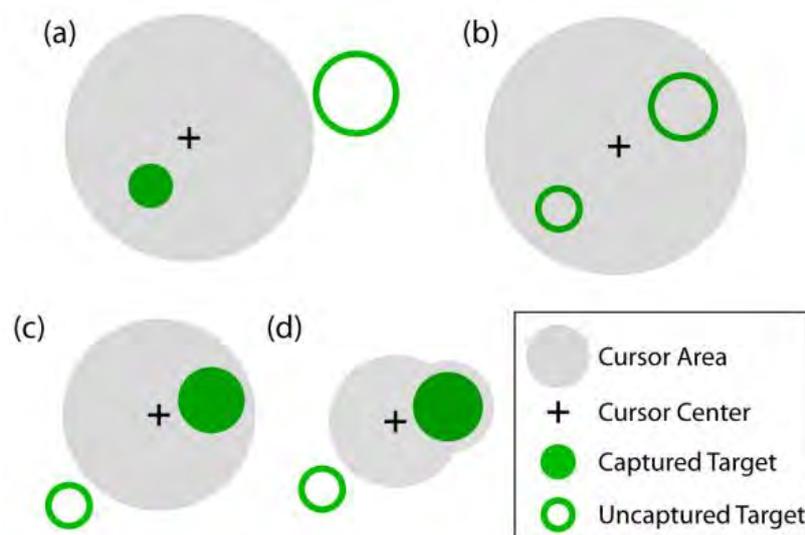


Figure 12 : Bubble Cursor [T. Grossman et R. Balakrishnan 2005]

### 2.2.b. Effet de la cible sur le mouvement du curseur

Il est aussi possible d'ajouter des effets de déplacements sur le curseur. Il faut différencier les éléments de l'interface qui permettent l'affichage d'information et les zones d'interaction. Sur une interface 98,9%, des pixels [R. Balakrishnan 2004] ne sont pas nécessaires à l'interaction.

Y. Guiard et al. (2004) proposent d'ignorer les pixels non utiles. A la sortie d'une zone utile, ils téléportent le curseur sur la cible la plus proche en tenant compte de la direction du mouvement.

Cette technique se heurte à l'identification des zones non utiles, puisque en fonction de l'activité, le nombre de zones peut être important et petit.

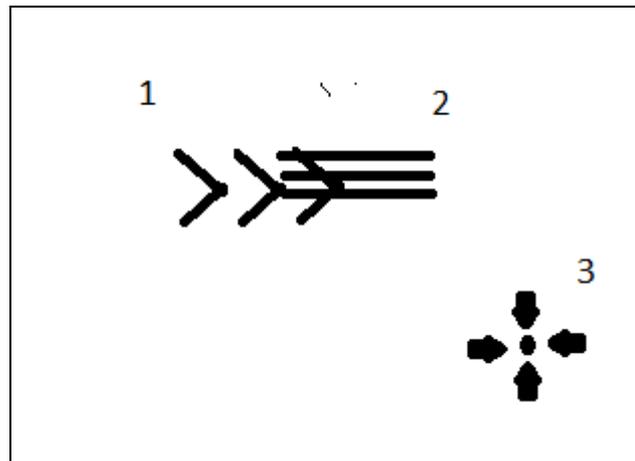
T. Asano et al. (2005) proposent de coupler la téléportation du curseur avec un système de prédiction ; ce système se nomme « **Delphian Desktop** ». En fonction du pic d'accélération du déplacement du curseur et de la direction, le système prédit la cible que l'utilisateur souhaite atteindre, et le système amène le curseur sur la cible, en affichant un feedback. Il affiche un trait rouge qui représente le déplacement automatique du curseur entre le moment où s'est déclenché le mouvement et l'arrivée du curseur sur la cible. Ce système permet de diminuer significativement la distance que parcourt l'utilisateur pour atteindre une cible. Toutefois la prédiction n'est efficace qu'au-delà des cibles à plus de 800 pixels et le gain de temps est d'environ 100ms.

Une autre solution proposée par A. Hurst et al. (2007) est d'utiliser la connaissance d'usage de l'interface par l'utilisateur et d'ajouter sur cette interface de la **poussière magnétique** qui aura pour effet d'attirer le curseur vers les zones les plus utilisées.

Il est aussi possible de ralentir le mouvement, lors de l'apparition de sous mouvements, ce qui signifie en général le passage d'un mouvement balistique à un mouvement correctif. Cette approche nommée **Point Assist** montre une amélioration de la précision pour les jeunes enfants [J.P Hourcade et al. 2010] ainsi que pour les personnes âgées [J.P. Hourcade et al. 2008].

Fung et al. (2008) proposent de combiner les différents effets afin d'aider l'utilisateur à réaliser différentes tâches avec un curseur. Les effets sur le curseur sont la vitesse, l'attraction, la répulsion et le guidage. Ils nomment cette technique **Kinematic Templates**. Elle ajoute sur une interface un modèle d'interaction qui utilise ces différents effets. Ces derniers peuvent être spécifiques à une zone de l'interface ou combinés, ce qui permet d'associer à une zone de l'interface des effets d'interaction [Fung et al. 2008]. La Figure 13

montre un exemple de Kinematic Templates qui représente l'écran, la zone 1 ralentit le curseur dans une des directions, la zone 2 guide les mouvements du curseur sur une direction parallèle aux droites, la zone 3 attire vers son centre le curseur lorsqu'il s'approche de cette zone. Il y a une zone commune aux zones 1 et 2 ; sur cette zone commune les deux effets s'appliquent.



**Figure 13 : Exemple de Kinematic Templates**

### *2.2.c. Les mouvements de plusieurs curseurs*

Le **Ninja Cursor** (Figure 14) proposé par M. Kobayashi et T. Igarashi (2008), ajoute à l'interface plusieurs curseurs, tous synchronisés avec la souris. Ils permettent d'accéder plus rapidement à la cible. La présence de plusieurs curseurs permet sur de grands écrans de diminuer la distance parcourue. Dans le cas où plusieurs curseurs seraient sur une cible en même temps, un algorithme permet de choisir le bon curseur en désactivant les curseurs que l'on ne souhaite pas utiliser. La technique devient toutefois moins efficace que le pointage classique lorsque le nombre de curseurs et de cibles est important.

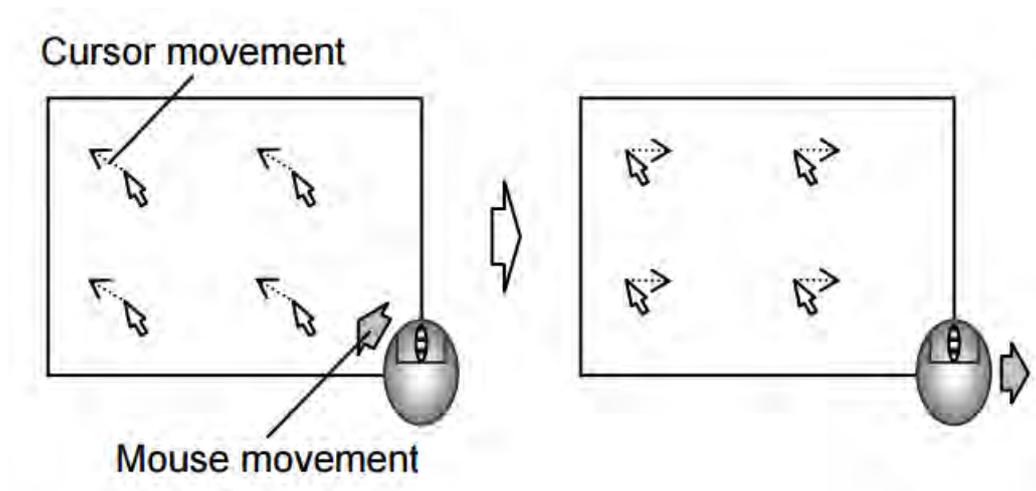


Figure 14 : Ninja Cursor [M Kobayashi et T. Igarashi 2008]

Une technique d'interaction utilisant le suivi du regard, nommée « MAGIC un Gaze pointing », a été proposée par S. Zhai et al. (1999). Le curseur est déplacé automatiquement dans la zone que regarde l'utilisateur. Il peut ensuite déplacer le curseur afin d'atteindre une cible à proximité, l'objectif étant d'éviter d'effectuer de grands mouvements d'atteinte de cible. Le suivi du regard a aussi été combiné au Ninja Cursor par R. Blanch et M Ortega 2009, nommé le « **Rake Cursor** ». Ici le curseur actif est désigné par le regard. Une étude classera le temps d'attente d'une cible du plus lent au plus rapide : le pointage classique, Magic et le plus rapide le Rake Cursor.

#### 2.2.d. *Interaction sans mouvement, ou avec mouvement automatique.*

Précédemment nous avons vu comment améliorer l'utilisation d'un curseur et son mouvement. Seulement, des personnes en situation de handicap moteur des membres supérieurs dont les mouvements résiduels ne permettent pas le déplacement d'un curseur dans leur espace moteur, vont devoir utiliser des techniques d'interaction sans le déplacement du curseur.

Une autre combinaison est l'usage d'Area Cursor et de la synthèse vocale avec le **Nine Cursor** de L. Dai et al. (2014), Figure 15). Ici l'utilisateur a une grille de 9 zones à l'écran, il désigne vocalement l'une des zones ; si elle comporte plusieurs cibles une nouvelle grille est proposée dans la zone, jusqu'à n'avoir plus qu'une seule cible.

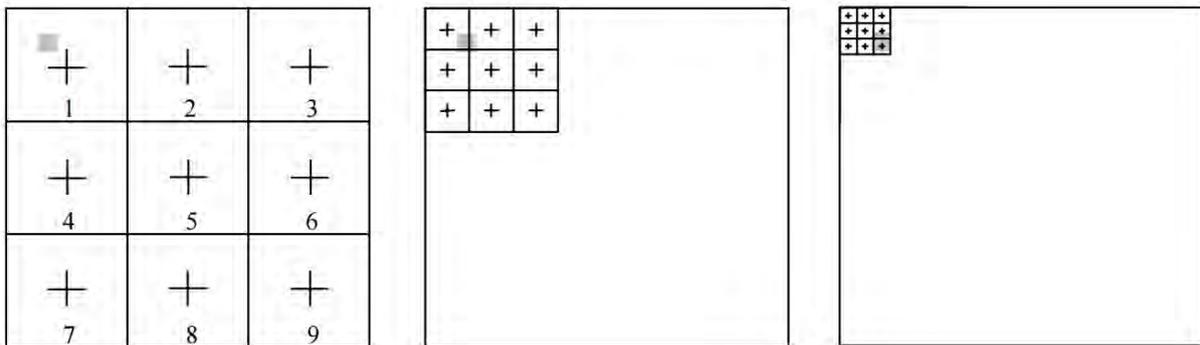


Figure 15 : Nine Cursor [L Dai et al. 2014]

Une autre possibilité est aussi de s'extraire de la notion de mouvement du curseur. Il est possible de créer une interface sans mouvement en proposant les éléments sélectionnables de l'interface automatiquement. Cette technique d'interaction s'appelle le **balayage** ou le **défilement**. Chaque item sera proposé l'un après l'autre, suivant un chronomètre qui laisse le temps à l'utilisateur de sélectionner une cible. Pour des interfaces de grandes tailles, il sera plus intéressant de choisir, en premier, un ensemble de cibles avant d'en effectuer la sélection. Le choix d'un ensemble de cibles sur l'interface peut être important. Sur la Figure 16 sont proposées 3 solutions : la première en « ligne / colonne » a pour avantage de suivre le sens de la lecture du français. Nous posons comme hypothèse que cela va faciliter l'apprentissage en partant sur un acquis des personnes qui savent lire. La seconde, en sous matrice, va diminuer le mouvement du regard sur l'interface. Enfin la dernière, une sélection en diagonale, va réduire le temps d'accès moyen à toutes les touches. Plus le balayage avance de proposition en proposition, plus l'ensemble d'éléments proposé sera de plus en plus petit (exemple on commence par proposer un ensemble de 5 cibles suivie d'un ensemble de 4 cibles, etc.). Cela aura pour effet de diminuer le temps d'accès à la cible temporellement la plus éloignée.

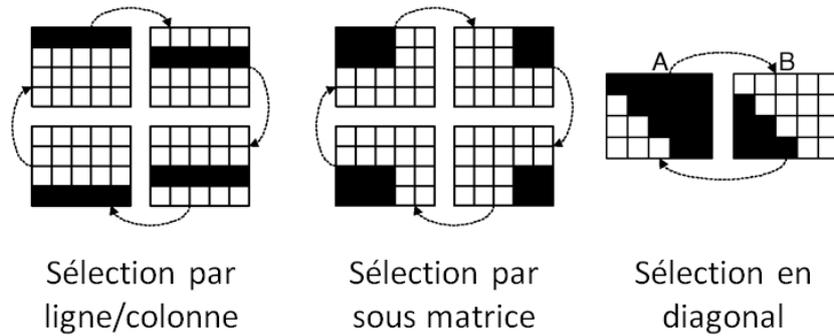


Figure 16 : Stratégie de balayage [C. E. Steriadis et P. Constantinou 2008]

Le balayage peut être aussi utilisé pour créer une nouvelle technique d'interaction avec un curseur contrôlé à partir d'un clavier (Figure 17). Par exemple, l'utilisateur va choisir le bouton haut du clavier, le curseur va se déplacer vers le haut tant que l'utilisateur maintiendra le clic. Il pourra ainsi utiliser toutes les possibilités qu'offre le déplacement d'un curseur. C'est l'application qui déplacera le curseur automatiquement en fonction des commandes entrées sur le clavier de balayage.



Figure 17 : Clavier balayage de contrôle de souris [M. Ader et al. 2007]

Il existe d'autres solutions de déplacement du curseur automatique. L'application **Civikey** propose deux types de souris virtuelles (Figure 18) :

- La première (Déplacement Ecran Scindé) consiste à diviser l'écran de l'utilisateur en quatre parties, une division sur la verticale centrale de l'écran et une autre sur l'horizontale centrale. Ces quatre parties sont parcourues successivement via un système de balayage. Le programme balaye les différentes possibilités jusqu'à ce que l'utilisateur valide la zone qu'il souhaite sélectionner. L'action va se répéter récursivement sur la sélection pour que la zone de balayage soit suffisamment précise pour déplacer le curseur sur la cible que l'utilisateur souhaite atteindre.
- La deuxième solution proposée est un curseur de type radar ; l'utilisateur appuie sur un contacteur, ce qui active le curseur, un cercle muni d'une flèche entoure le curseur. La flèche tourne autour du cercle jusqu'à validation de l'utilisateur pour choisir la direction de déplacement du curseur. Ensuite celui-ci se déplace dans la direction de la flèche. Un nouvel appui stoppera le déplacement.

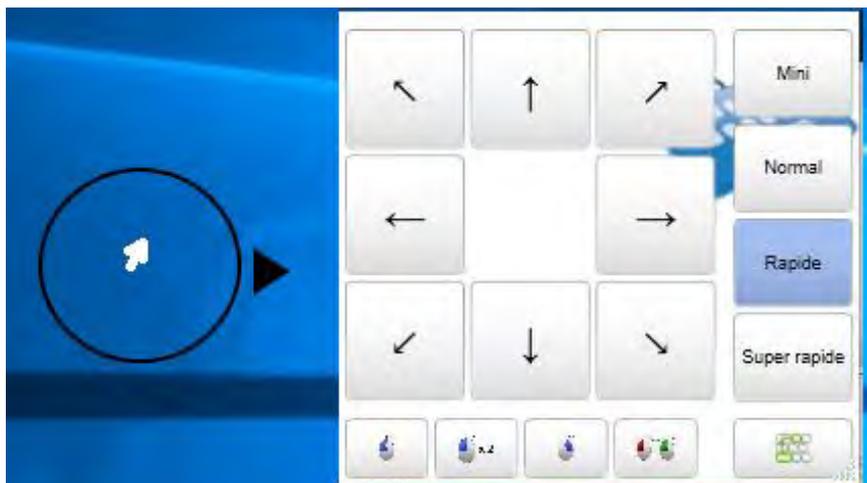


Figure 18 : Curseur Radar de Civiquey

Dans Civiquey, un menu est proposé pour effectuer en balayage le clic gauche ou droit d'une souris.

### 2.3. Synthèse des techniques d'interaction

Le Tableau 1 présente une classification des techniques d'interaction que nous avons présentées précédemment. Nous les avons classifiées en fonction d'un critère de facilitation permettant d'aider les personnes en situation de handicap. Pour le choix d'une technique d'interaction pour une personne en situation de handicap, l'identification des difficultés

dans le mouvement de cette personne, va trouver une première solution dans cet ensemble de solutions. Dans le cas où la personne éprouve des difficultés sur la distance du mouvement parcouru, des systèmes de déplacement automatique, ou d'accélération du mouvement sont une première solution. Il est aussi possible de déplacer les cibles vers le curseur. Mais dans le cas où la personne n'a pas la possibilité d'effectuer de mouvements, alors la solution de balayage sera choisie (Tableau 1).

**Tableau 1 : Synthèse des techniques d'interaction**

Nom de la technique	Sur quoi elle agit	Intérêt de la technique
<b>Les difficultés pour la validation</b>		
Goal Crossing	Cible	Validation Automatique des cibles
Dwell Clicking	Cible	
Reverse Crossing	Cible	
<b>Les améliorations de la précision de l'atteinte des cibles</b>		
Fish-Eye	Cible	Augmentation de la taille des cibles (Particularité de Kinematic : Fonctionne avec une prédiction)
Voronoi	Cible	
Starburst	Cible	
Kinematic Endpoint prediction	Cible	
Pointage sémantique	Cible	Accroche le curseur sur la cible
Sticky icons	Cible	
Drag'n Pop	Cible	Attire les cibles vers le curseur Diminue les distances parcourues pour atteindre les cibles
Drag'n Pick	Cible	
Bubble Cursor	Curseur	Augmentation de la taille du curseur Augmentation de la précision pour l'atteinte des cibles
<b>Les aides à la mémorisation et la visualisation</b>		
Menu	Cible	Organise les cibles dans des menus ce qui diminue le nombre de cibles affichées
Pie Menu	Cible	

Les difficultés pour le déplacement du curseur		
Delphian Desktop	Curseur	Téléporte le curseur vers une cible Diminue la distance parcourue
Poussière magnétique	Curseur	Attraction du curseur pour les zones les plus fréquemment visitées
Kinematic Templates	Curseur	Ajout de règles au mouvement du curseur par zone de l'interface
Ninja Cursor	Curseur	Multiplication des curseurs
MAGIC un Gaze pointing	Curseur	Diminue les distances (Particularité Magic : Utilisation du regard pour choisir le bon curseur)
Nine Cursor	Curseur	Automatisation du déplacement du curseur
Balayage	Curseur	

Quelle que soit la solution retenue, il est nécessaire de configurer correctement le dispositif. Cette liste de techniques d'interactions est la base des solutions que nous apportons à des personnes en situation de handicap. Maintenant quelle va être la méthode utilisée pour pouvoir créer et configurer ces différentes solutions auprès de personnes en situation de handicap ? L'une des possibilités pour proposer la bonne solution est tout simplement de se rapprocher des utilisateurs et de bien définir leurs besoins, et au travers de différents essais de définir la solution qui convient le mieux.

### 3. La méthode de conception centrée utilisateur

Les recherches en IHM ont étudié de nouveaux paradigmes pour faciliter l'accessibilité des dispositifs et des interfaces pour les personnes handicapées. Il est important de tenir compte de leurs besoins afin d'éviter leur exclusion du monde du travail, de la culture et de l'éducation. Il s'agit aussi de faciliter ou d'améliorer leurs rapports avec leur environnement social. Il est essentiel que les technologies d'assistance soient étroitement adaptées aux besoins et aux capacités de l'utilisateur. Nous rapportons ici quelques paradigmes en IHM sur la conception d'interfaces accessibles. Les interfaces graphiques de l'utilisateur sont souvent difficiles à utiliser pour les personnes ayant une déficience motrice. Une des raisons de cette difficulté est l'atteinte des cibles avec des dispositifs de pointage. Un grand nombre

de cibles (par exemple boutons, cases à cocher, des menus, des boutons radio), sont disponibles et obligent l'utilisateur à pointer à l'intérieur avant de les activer. Souvent les solutions existantes ne répondent pas totalement aux besoins ou sont trop onéreuses. En conséquence, on remarque qu'un tiers des aides techniques sont abandonnées [B. Philips et H. Zhao 1993][S. Federici et S. Borsci 2011].

Pour que les aides techniques soient acceptées par les personnes, il faut prendre en compte des facteurs préférentiels de la personne. Dillon et Morris [A. Dillon et M. Morris 1999] propose trois facteurs qui définissent l'acceptabilité :

- **“Utility** (i.e., functionality, capability): *This refers to the technical capability of the tool to actually support tasks that the user wishes to perform. This can be established in most cases objectively by audit or inspection of the specification or working version. In normal application, completing a task analysis will provide sufficient information to establish the utility level of any tool.”*
- **“User Attitude** (i.e., perceptions, affect): *This refers to users' subjective evaluation of the information system. While two systems may have identical utility and both prove usable, users may express a preference for a system based on personal judgment, previous experience, aesthetics, cost etc. Therefore, the final driver of use must be the user's perceptions of or attitude toward the technology.”*
- **“Usability** (i.e., operability, user performance with the tool): *This is the classic behavioural data set employed HCI studies. Usability refers to the extent to which users can exploit the utility of the system. Thus, systems with equivalent utility may result in different levels of usability depending on how the design is implemented.”*

Nous définirons dans la langue française, l'« utility » par l'utilité, « user attitude » par expérience utilisateur et l'« usability » par l'utilisabilité.

Pour répondre à ces trois facteurs, nous proposons de l'associer à la méthode de conception centrée utilisateur [A. D. Norman et W. S. Draper, 1986]. L'étude [S. Federici et al. 2016] confirme le succès de cette méthode pour la conception des dispositifs pour la mobilité et l'audition.

Nous faisons les hypothèses suivantes :

- Le facteur utilité sera défini par les retours d'entretien et des observations par rapport aux attentes ou besoins de la personne ;
- Le facteur expérience utilisateur sera exprimé par des questionnaires de satisfaction et des interviews ;
- Le facteur utilisabilité sera mesuré au moyen de paramètres déterminés par l'analyse des logs d'activités de la personne sur l'interface utilisée.

Suite à ces hypothèses, nous allons maintenant expliquer les différentes étapes de la méthode de conception centrée utilisateur. L'objectif de cette méthode est l'insertion d'utilisateurs finaux dans le processus de conception des systèmes pour les rendre plus « utiles et utilisables ». La première étape se déroule avec les utilisateurs afin d'analyser leurs besoins [A. D. Norman 1998]. Cette méthode requiert des concepteurs ayant la capacité d'évaluer le matériel utilisé par les personnes. Ce matériel peut se composer de périphériques effecteurs ou capteurs. Il est nécessaire pour les concepteurs de déterminer la manière dont les utilisateurs les emploient dans leur activité afin d'évaluer leur utilisabilité et satisfaction.

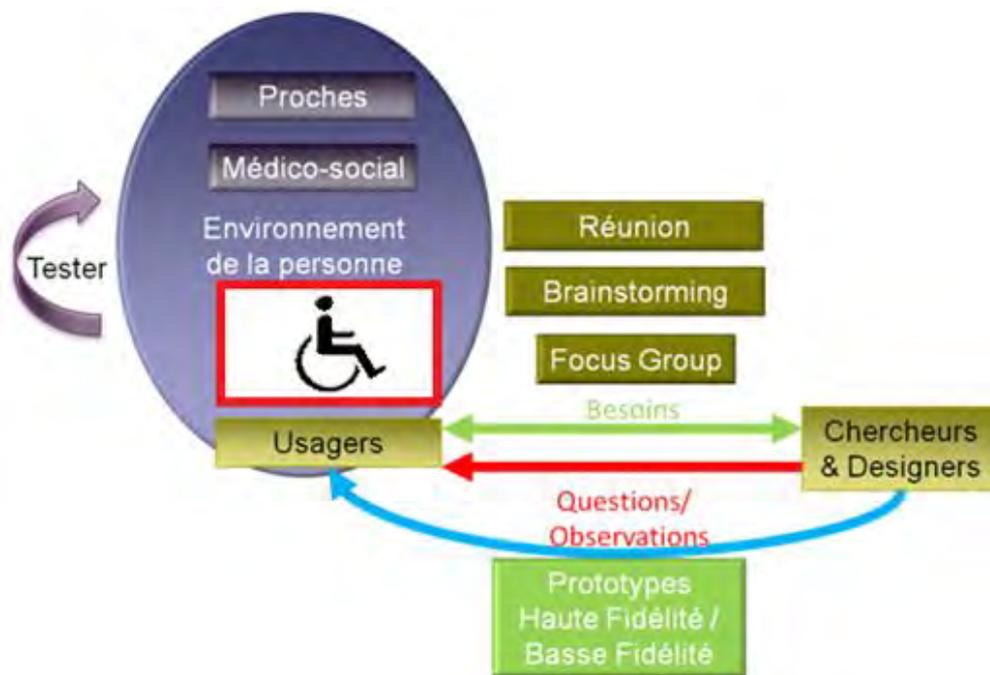


Figure 19 : Les flux de la Conception centrée utilisateur

La Figure 19 montre l'ensemble des éléments qui interviennent lors d'une conception centrée utilisateurs. Celle-ci fait intervenir quatre étapes : la définition des besoins, la production d'idées de solution, la conception et le prototypage, et l'évaluation des solutions produites par la méthode (Figure 20).



**Figure 20 : Cycle de conception**

Il est important que les usagers participent à chacune des phases. En premier, il est demandé à l'utilisateur de décrire ses besoins ; cela peut s'effectuer au travers de questionnaires, d'interviews, ou encore de l'observation de la personne dans la réalisation de ses tâches de la vie courante. Durant cette étape, il est important d'identifier les limitations fonctionnelles de la personne. L'approche AMICAS [Roche et al. 2014] propose même d'aligner les besoins à un profil utilisateur qui décrit la personne et ses limitations, afin d'identifier les tâches possibles pour l'utilisateur et améliorer la décision pour l'étape suivante qui consiste à proposer des solutions.

Dans la deuxième partie, il est nécessaire de proposer différentes méthodes comme le brainstorming pour générer des idées de solutions. Il est important de se concentrer sur la méthode avec laquelle l'utilisateur veut interagir ainsi que de tenir compte de ses éventuelles limitations motrices.

La troisième partie correspond à la conception des solutions retenues. C'est durant cette étape que les différents prototypes sont conçus. Le choix des solutions se fait en fonction des idées générées collectivement. Ces prototypes vont être utilisés pour valider ou non les idées et les interactions qui ont été mises en place. De plus, au cours de ce cycle de conception des nouvelles idées de prototypes peuvent être proposées.

Toutefois cette méthode de conception centrée utilisateur repose sur la communication, il faut donc se poser la question, comment faire avec des personnes qui ont des incapacités sensorielles, motrices ou cognitives, ou des troubles mentaux ?

Pour y répondre nous allons regarder une première proposition qui repose sur conception participative de M.J Muller et S. Khun. (1993). Cette méthode participative a été adaptée [A. Brock et al. 2010] pour des personnes non-voyantes. A. Brock et al. 2010 ont identifié différentes recommandations pour adapter cette méthode. Ces recommandations sont :

*"- Choisir des moyens de communication accessibles, tels Google site ou Doodle.*

*- Pour la composition de groupes d'utilisateurs déficients visuels, intégrer les critères spécifiques comme le niveau de déficience, sa durée (de naissance ou tardive), l'autonomie, la capacité à lire le braille ou l'expérience des outils informatiques.*

*- Choisir le lieu de réunion en tenant compte de son accessibilité par les transports publics, éventuellement prévoir des moyens de transports alternatifs ou accompagner les personnes.*

*- Limiter la taille des groupes (environ 10 personnes).*

*- Placer les personnes en fonction de l'accessibilité et dans une salle assez grande pour faciliter l'identification vocale des participants, garder des places fixes pendant la réunion.*

*- Faire un tour de table ordonné de tous les participants ou observateurs au début de chaque réunion.*

*- Bien gérer le brainstorming en contrôlant le tour de parole, donner du feedback sonore aux notations, répéter les idées, réorganiser ou structurer oralement les idées pour faciliter la mémorisation.*

*- Pour un premier travail avec des utilisateurs non-voyants, analyser à la fois les besoins de la tâche et les spécificités qu'entraîne la déficience pour l'usage du système interactif.*

*- Pour le maquettage choisir les méthodes et les outils selon les modalités d'interaction envisagées en remplacement de la modalité visuelle.*

- *Pour la réalisation du prototype (basse et haute fidélités) penser d'abord à l'accessibilité du système en fonction du dispositif interactif visé (lecteur d'écran, tactile) et choisir des technologies et outils adaptés.*
- *Prévoir un pré-test d'accessibilité des solutions avant toute présentation aux utilisateurs*
- *Développer et évaluer sur les équipements ciblés (par exemple PC équipé d'un lecteur d'écran), adapter si possible le dispositif aux paramètres habituels de chaque utilisateur pour les tests.*
- *Faire une interview au lieu des questionnaires, ou réaliser un questionnaire interactif si celui-ci n'est pas trop long à compléter par l'utilisateur."*

L'ensemble de ces recommandations tient compte des différents éléments pour inviter des personnes déficientes visuelles : le transport, l'installation de la personne, les temps de parole et d'explication. Cet ensemble d'éléments entrent en jeu lors de chacune des étapes de la conception centrée utilisateur.

Dans la littérature une autre proposition porte sur l'autisme [M. Guffroy 2017]. Une personne Autiste a une altération de ses interactions sociales et communicationnelles. Elle peut aussi avoir des troubles comportementaux. Une personne Autiste peut donc avoir des difficultés pour participer aux différentes étapes de la conception centrée utilisateur. Pour pallier à ces difficultés, il est proposé d'intégrer un médiateur qui connaît la personne Autiste et qui peut communiquer avec elle. Cela peut-être un membre de sa famille ou un éducateur. La présence du médiateur permet d'identifier les demandes de l'utilisateur, de choisir des solutions et d'évaluer les technologies d'assistances conçues par la méthode centrée utilisateur.

### **3.1. L'organisation de la méthode centrée utilisateur**

Les discussions pour le recueil des besoins ou pour la génération de nouvelles idées sont au centre de la méthode centrée utilisateur. Pour le partage d'idées et la communication, nous avons utilisé les concepts de brainstorming, de focus groupe et de réunion de travail.

#### **3.1.a. Brainstorming**

Le brainstorming est l'une de ces méthodes. Son but principal est la création de solutions à des besoins. Il consiste à réunir toutes les personnes ou un maximum de personnes

concernées par la recherche d'une solution à un besoin. Si le nombre de participants est élevé, il sera nécessaire de les séparer en différents groupes selon les critères des organisateurs du brainstorming.

Le brainstorming commence avec une question qui cible un besoin. A partir de là, les participants discutent entre eux librement et proposent des solutions pour répondre à ce besoin. Toutes les idées sont nécessairement écrites sur une ou plusieurs feuilles. Le partage d'idées est important, puisque une solution proposée par un participant pourra pousser un autre participant à proposer une autre solution que lui aura inspiré un autre participant. A l'avance, l'organisateur a la possibilité de préparer des solutions, pour les présenter aux différents groupes qui auraient des difficultés à discuter, ou à trouver des solutions.

Au bout d'un temps déterminé à l'avance, la fin de la concertation sera annoncée. Si plusieurs groupes existent, chacun des groupes présentera ses idées aux autres groupes.

Dans tous les cas, à la suite de cela, une concertation générale sera effectuée dans le but, cette fois-ci, de discuter uniquement des propositions qui ont été proposées afin de retenir les idées qui semblent le mieux correspondre à une solution au besoin.

### ***3.1.b. Focus Group***

Le Focus group permet de confronter des solutions à une population spécifique ; cela peut être par exemple des futurs utilisateurs, des personnes d'un environnement médico-social, ou autre.

Dans un premier temps, il sera présenté à la population choisie les différentes solutions et à quels besoins ces solutions répondent. La présentation se fait au travers de démonstrations d'usage et d'explication des prototypes basse ou haute-fidélité. La démonstration de ces solutions est suivie d'une discussion ouverte, qui a pour but de confronter les opinions de chacun. Il pourra être nécessaire d'organiser un temps de parole afin que chacun des participants ait la possibilité de s'exprimer.

A la fin de ce Focus group, un questionnaire de satisfaction sur ces solutions et un questionnaire à réponses libres seront distribués.

La synthèse du focus groupe aura pour conséquence l'orientation des améliorations, ou du choix des solutions principales à concevoir et à tester.

### **3.1.c. Réunion de travail**

La réunion de travail est plus fréquente que les deux autres méthodes qui demandent de la préparation. Il est ici possible d'inviter l'ensemble des intervenants à la conception. La réunion a différents buts :

- préparer l'organisation d'un brainstorming ou d'un focus group ;
- vérifier si les conceptions vont dans le sens des solutions choisies ;
- exprimer de nouveaux besoins qui émergeraient de l'utilisation des solutions générées ;
- préparer des évaluations et des tests ;
- signaler différentes anomalies découlant du fonctionnement des solutions.

La réunion comporte une phase de discussion et peut aussi se finir avec un questionnaire. Il est nécessaire d'avoir un compte-rendu de réunion, afin d'acter l'ensemble des décisions et actions à réaliser par l'ensemble des personnes. Dans le cas de personnes qui auraient des troubles de la parole, ou mutiques, il est important de noter que le temps des réunions sera plus important, afin de laisser la personne exprimer ses idées.

## **3.2. Les outils de la conception centrée utilisateur**

Pour communiquer avec des personnes non expertes, il est nécessaire d'expliquer de façon concrète les différents fonctionnements des solutions. Cela se fera au travers de prototypes qui permettent à la personne de visualiser un fonctionnement là où un expert du domaine utilise des mots techniques non accessibles à un non-averti. De plus, l'utilisation de ces outils peut intervenir à chacun des niveaux de la conception centrée utilisateur. De l'usage de prototypes, il est possible de voir l'émergence de nouveaux besoins, ou d'améliorer l'expression de ces besoins. Pour donner des idées aux participants, des prototypes peuvent être présentés. Dans cette thèse, nous avons utilisé des prototypes basse-fidélité et haute-fidélité.

### **3.2.a. *Prototype basse fidélité***

Pour des raisons de coût et / ou de temps, un prototype basse fidélité correspond à un prototype sur papier ou avec un éditeur de présentations. Ce prototype peut être le résultat d'un Brainstorming, ou d'une réunion. Sur le prototype il sera simulé le fonctionnement d'une solution, afin de montrer rapidement aux personnes si cela peut répondre à leurs besoins. L'un des avantages est de pouvoir proposer rapidement une ou plusieurs solutions.

Ce prototype peut être dessiné sur des feuilles de papier pour simuler l'interaction des personnes. Il est possible de créer des interfaces, dont les fonctions ne sont pas intégrées, dans le but de se focaliser sur la présentation de l'interface. Le prototype basse-fidélité peut aussi déjà intégrer des fonctionnalités qui pourront être éventuellement testées.

### **3.2.b. *Prototype haute-fidélité***

Lorsque les besoins de la personne ont été bien ciblés, et que les solutions principales à tester ont été choisies, la conception passe à une conception haute-fidélité. Cela correspond à une version du produit fini, qui pourra être réitéré autant de fois que possible jusqu'à atteindre une solution adaptée à la personne. Ce prototype doit contenir l'ensemble des fonctionnalités définies qui doivent répondre à l'ensemble des besoins de la personne.

Un ensemble de solutions est ainsi créé. Il est aussi intéressant de se poser la question de comment partager des solutions et de permettre à des personnes en situation de handicap de les utiliser.

## **3.3. *L'approche « Do it yourself »***

Cette approche « Do-it-yourself » [A. Hurst, J. Tobias, 2011] vise en particulier les personnes en situation de handicap. Souvent les aides techniques sont abandonnées par ces personnes pour les raisons suivantes : l'absence de concertation avec la personne concernée, la difficulté à obtenir le matériel adéquat, des performances médiocres des solutions ou tout simplement l'évolution des besoins de la personne en fonction de sa pathologie évolutive. Il faut donc permettre l'accès à des technologies adéquates à la personne. « Do-it-yourself » doit permettre la création, la modification et la construction d'aides techniques par tous. Le

fait de pouvoir créer sa propre assistance technologique permet d'améliorer le processus d'adoption par la personne.

Une des particularités du « Do-it-yourself » est d'être communautaire. Les solutions qui sont créées sont reproductibles, sous condition que cela ne soit pas dans un but lucratif. Ceci a permis l'essor de cette méthode qui a trouvé ses adeptes. Certaines technologies, comme les imprimantes 3D, permettent la création de différentes pièces et composants, jouent aussi un rôle important dans cet essor.

Il est montré qu'un ensemble de composants bas coût peut permettre de créer des solutions plus performantes que des réponses commerciales aux besoins. De plus il y a une grande différence dans les priorités de chacune des personnes ; le confort, les fonctions ou l'esthétique peuvent être des critères importants dans l'acceptation de la technologie. Pour les personnes en situation de handicap, le « Do-it-yourself » donne aussi un sentiment d'indépendance vis-à-vis des entreprises, tout en permettant l'échange et la communication avec des personnes qui auraient des solutions à partager avec elles.

De plus, pour cette approche, la personne n'est pas seule. M. Dawe (2006) a constaté que de nombreuses personnes (familles, enseignants, cliniciens, amis, soignants, spécialistes des technologies d'assistance) peuvent intervenir et être impliquées dans l'ensemble des étapes visant à l'adoption d'une technologie d'assistance.

L'intérêt de l'approche « Do-it-yourself » pour la science est de permettre aux personnes d'accéder plus rapidement à de nouvelles technologies. De plus, pour les chercheurs, l'amélioration, l'adaptation, voire tout simplement l'usage de ces technologies peuvent servir d'éléments d'évaluation des technologies. Il faut vérifier l'adéquation entre l'utilisateur et son aide technique afin d'observer que celle-ci lui soit utilisable. Pour cela, il existe différents modèles permettant d'étudier le comportement d'interaction de la personne.

#### **4. Evaluation des tâches d'interactions**

Le modèle du processeur humain de S.K. Card et al. (1983), considère l'être humain comme un processeur de traitement de l'information. En premier, les récepteurs sensoriels captent

l'information pour la transmettre au cerveau. Ils vont traiter l'information avec la mémoire perceptive, pour ensuite la transmettre à la mémoire de travail. Un processus cognitif se lance et recherche dans la mémoire de travail, les informations associées aux informations transmises. Au final, la décision est transmise au contrôle moteur afin de réaliser l'action physique. L'interaction avec un ordinateur suit le même processus pour réaliser une tâche d'interaction. Elle est décomposée en un ensemble d'opérateurs. Ils peuvent représenter différentes étapes d'interaction comme la validation, le déplacement du curseur, etc. Grâce à ces opérateurs nous pouvons concevoir des modèles pour reproduire une tâche. Les modèles peuvent être prédictifs ou descriptifs et permettre d'évaluer, théoriquement à l'avance, les résultats d'une interaction. Les modèles peuvent aussi servir à comparer 2 états, 2 tâches, 2 techniques, etc., afin d'effectuer une comparaison et de déterminer la meilleure solution.

Différents modèles existent dans la littérature, pour ce qui concerne l'interaction :

- La prédiction du temps de visualisation d'un item, dans un ensemble de choix possibles, selon la loi de Hick-Hyman [W.E. Hick 1952], [R. Hyman 1953], est utile pour modéliser la perception ;
- La performance du mouvement effectué par un utilisateur avec la loi de Fitts [P.M. Fitts 1954], modélise la motricité. Cette loi exprime que plus la cible est éloignée et petite, plus elle est difficile à atteindre. Cette difficulté est appelée Indice de Difficulté. Elle dépend donc de la taille (A) et de la distance (W) ;
- La prédiction du temps de saisie estimée par le modèle de R.W. Soukoreff et I.S. Mackenzie (1995) tient compte de la loi de Fitts et de la probabilité que le caractère soit choisi (adapté à une langue) ;
- La prédiction du temps de réalisation d'une tâche d'interaction qui est décomposée en opérateurs, se retrouve dans le modèle de GOMS [S.K. Card et al. (1983)].
- Le modèle Vella basé sur la loi de Fitts, tient compte de la variabilité intra-population grâce aux encadrements par intégrale [F. Vella et N. Vigouroux, 2013]. Ce modèle est actuellement adapté à trois populations : tétraplégiques, myopathes et valides.

#### 4.1. La Loi de Hick-Hyman

La loi de Hick (5) permet d'estimer le temps qu'un utilisateur va mettre pour prendre une décision parmi un ensemble de possibilité. C'est le temps de réaction, qui suit une loi logarithmique dont la formule s'écrit :

$$H = \log_2(N) \quad (5)$$

H est la quantité d'informations et N est le nombre des possibilités. Hyman a supposé que chaque N possibilités a une probabilités d'occurrence  $P_i$ . Dans le cas d'un environnement équiprobable la formule devient :

$$P = \frac{1}{N} \rightarrow H = \log_2\left(\frac{1}{P}\right) \quad (6)$$

Enfin, la formule finale de Hick-Hyman (7) permet de calculer le temps de perception RT pour des personnes novices ; pour les personnes expertes ce temps tend vers 0 :

$$RT = a + b * H \quad (7)$$

La loi de Hick-Hyman est proche de la formulation de la loi de Fitts. Une explication de ce type de forme est que le temps de recherche d'un élément est non linéaire. Chaque étape de la prise de décision enlève un nombre important de décisions pour se recentrer le plus rapidement possible vers le choix final.

#### 4.2. La loi de Fitts

Basée sur les travaux de R. Woodworth 1899, expliqués précédemment (Section 1.1 : Approche globale du mouvement), Fitts (1954) propose une expérimentation d'atteinte de cible avec un stylet. L'utilisateur doit alterner entre des cibles de droite et de gauche, la taille et la distance des cibles étant variables (Figure 21).

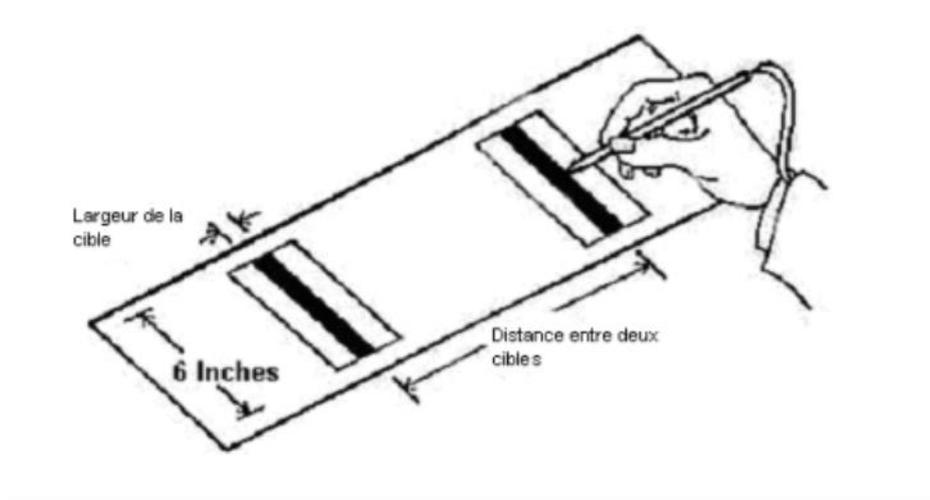


Figure 21 : Expérience d'acquisition de cible [I.S. MakKenzie 1992]

L'expérimentation a amené l'auteur à proposer une loi ((8) et (9)) qui estime le « temps de prédiction » du mouvement en fonction de la distance entre les cibles (A) et leur taille (W) :

$$MT = a + b * ID \quad (8)$$

$$ID = \log_2 \left( \frac{2 * A}{W} \right) \quad (9)$$

ID est l'indice de difficulté en bits, MT est le temps de prédiction du mouvement pour se déplacer entre 2 cibles ; a et b sont des valeurs empiriques qui décrivent le profil moteur d'un utilisateur. Elles se déterminent par régression linéaire (Figure 22).

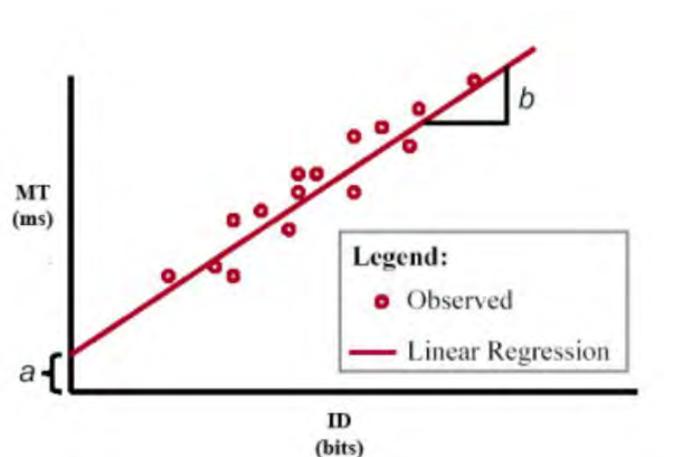


Figure 22 : Détermination des variables a et b. Loi de Fitts [I.S. MacKenzie 1992]

S.K. Card et al. (1978) ont montré que la loi de Fitts pour une tâche de pointage de cible virtuelle, sur un ordinateur, est valable. Pour une tâche en 2 dimensions, le paramètre W de la largeur de la cible est calculé en fonction de la trajectoire de l'utilisateur.

La loi de Fitts a montré des imperfections au niveau des résultats empiriques. Différents travaux se sont intéressés à des améliorations du paramètre ID. A.T. Welford (1968) a proposé (10) pour des tâches dites « faciles » avec un indice de difficulté inférieur à 3 une amélioration de la formule :

$$MT = a + b * \log_2\left(\frac{A}{W} + 0,5\right) \quad (10)$$

Mais cette modélisation n'est pas suffisante, puisqu'il est possible d'avoir des indices de difficultés négatifs lorsque l'on prend plusieurs cibles de même taille disposées à une distance donnée (D.J. Gillan, et al 1990).

A partir de la théorie de l'information de Shannon, I.S. Mackenzie 1992, a proposé (11) une autre modification de la loi de Fitts. Avec cette formulation, quels que soient les couples distance / taille des cibles, l'indice de difficulté est forcément positif :

$$MT = a + b * \log_2\left(\frac{A}{W} + 1\right) \quad (11)$$

C'est cette dernière formulation qui a été prise dans la Norme ISO 9241-9 pour tous les calculs empiriques des tâches de pointage. Il est possible de redéfinir la loi de Fitts avec un indice de difficulté effectif (12). Cet indice se fait pour chacune des acquisitions de cibles en récupérant la distance effective (« De » est la distance parcourue, par un utilisateur, pour une atteinte de cible). IDe peut remplacer ID dans la formule de Fitts.

$$IDe = \log_2\left(\frac{De}{4,1333 * SDx} + 1\right) \quad (12)$$

SDx est l'Ecart-type de la moyenne des x avec x distance entre l'acquisition et le centre de la cible.

Les variables de la loi de Fitts sont utilisées pour comparer 2 dispositifs, en termes de performance. Pour cela, on utilise le Throughput (TP (13)) lorsqu'on calcule le nombre d'actions qu'un dispositif permet. Sur un exercice donné, il peut permettre de définir le dispositif avec lequel un utilisateur a été le plus performant. La norme ISO 9241-9 propose comme formulation :

$$TP = \frac{IDe}{MT} \quad (13)$$

Il existe plusieurs interprétations de cette formulation. La première, TPa (14), consiste à définir les valeurs empiriques a et b, afin de calculer pour chaque ID, un MT associé. On calcule la moyenne de tous les ID, et de tous les MT, puis on les divise pour obtenir le nombre d'actions réalisées (en bits). TPa d'un point de vue graphique sur une régression de Fitts représente le Barycentre de l'ensemble des points de mesure.

$$TPa = \frac{\overline{ID}}{\overline{MT}} \quad (14)$$

D'après Zhai (2004), la valeur empirique « a » représente l'aspect non informationnel pour l'évaluation d'un dispositif d'entrée et la valeur empirique « b », son aspect informationnel des performances. Dans le cas d'une comparaison entre 2 dispositifs, il est possible de considérer la valeur « a » comme nulle ! Dans ce cas, on peut simplifier TPa en TPb (15) :

$$TPb = \frac{1}{b} \quad (15)$$

Toutefois, TPb se limitera au dispositif et ne permettra pas d'en choisir un pour un utilisateur. La solution passe par un calcul de TP par action de l'utilisateur et la moyenne. Ceci nous donne le TPc :

$$TPc = \overline{TPi} = \sum_{i=1}^n \frac{IDi}{MTi} \quad (16)$$

Dans l'optique d'une comparaison de différents dispositifs pour un utilisateur, les TPa et TPc semblent les plus pertinents pour évaluer les performances du couple utilisateur / dispositif. Puisque TPb se limite aux informations propres aux dispositifs et alors que pour les personnes en situation d'handicap, il est important de tenir compte de la variabilité de chaque personne, nous ne nous limitons pas uniquement au dispositif.

Le mouvement d'atteinte de cible n'est pas la seule composante qui détermine le temps d'atteinte d'une cible. Nous allons voir d'autres modèles psychomoteurs.

### 4.3. Le modèle Soukoreff / Mackenzie

Pour un clavier virtuel de saisie de texte, la tâche de saisie correspond à une succession de « tâches de pointages ». R.W. Soukoreff et I.S. MacKenzie (1995) en ont adapté la loi de Fitts.

Ils prennent en compte la probabilité d'apparition des lettres. Ils proposent la formule suivante :

$$MT = \sum_{i=1}^{27} \sum_{j=1}^{27} \frac{P_{ij}}{IP} \left[ \log_2 \left( \frac{A_{ij}}{W_j} + 1 \right) \right] \quad (17)$$

L'intervalle 1 à 27 correspond aux 26 lettres de la langue anglaise avec en plus le séparateur espace. « Pij » est la probabilité pour que, depuis la touche « i », l'utilisateur se déplace vers la touche « j ». « Aij » est la distance au centre des touches « i » et « j ». « Wj » est la largeur de la touche « j ». « IP » est l'index de performance qui correspond au TPb. Cette modélisation permet de prédire la vitesse d'écriture en fonction du clavier d'écriture proposé.

#### 4.4. Le modèle GOMS

Les modèles peuvent aussi être définis pour des tâches plus complexes que le pointage. S.K. Card (1980) propose le modèle GOMS (Goal, Operators, Methods, Selection rules). Le modèle GOMS est décrit par un scénario définissant la tâche ; celle-ci est décomposée en sous tâches appelées opérateurs. A partir de là, on réalise le modèle permettant de modéliser le temps pour effectuer la tâche.

Le modèle dérivé de GOMS le plus utilisé en IHM (Interaction Homme Machine) est le modèle KLM (Keystroke-Level Model) de S.K. Card et al. (1983). C'est un modèle descriptif et prédictif. Il décrit comment l'utilisateur va réaliser une tâche avec une interface homme-machine, par exemple un clavier virtuel avec comme tâche, la saisie d'un texte qui elle-même est décomposée en déplacement du curseur, en temps de visualisation du caractère, en activité mentale et en validation.

Toutefois, les modélisations proposées précédemment ne tiennent pas compte des variabilités des populations. De plus, lors d'expérimentations, S. Keates et al. (2000), G. Ashlock et al. (2003) et Vigouroux et al. (2004) ont rapporté que la grande variabilité des résultats des personnes en situation de handicap, permet de contrôler un écart important entre les résultats théoriques et expérimentaux.

## 5. La variabilité entre individus

Il existe différentes comparaisons possibles entre des populations, pour l'utilisation de techniques d'interaction. Ces comparaisons sont : 1) La culture, puisque certaines cultures peuvent rejeter la technologie. Par exemple les personnes âgées rejetant la technologie car elle est trop complexe pour eux ; 2) Le milieu sociétal, tels que les moyens financiers de la personne peuvent empêcher de se financer une aide technique si celle-ci ne peut pas l'acheter ; Nous allons faire un focus sur 3) L'expérience ; 4) L'âge ; 5) Le handicap. Ces trois derniers sont pour nous les éléments les plus importants impactant sur la perception des systèmes de suppléance et de leurs performances.

### 5.1. L'expérience du participant

L'apprentissage et l'expertise s'acquiert avec le temps. Ceci est démontrable par exemple pour l'apprentissage d'une interface de clavier virtuel, [I.S. MacKenzie et S.X. Zhang 1999]. Ces auteurs montrent le nombre important de sessions nécessaires à l'apprentissage d'une interface pour une utilisation experte.

Dans le cas des techniques d'interaction, il existe différentes études qui comparent les usages en fonction de l'expérience des participants. Dans l'article [D. Natapov et I.S. MacKenzie 2010], sur l'analyse d'une manette de Xbox modifiée avec un trackball, une étude comparative est effectuée entre des utilisateurs réguliers de manettes de Xbox classique et des personnes novices. Les résultats montrent que l'expérience des utilisateurs est conservée et qu'il y a un transfert de connaissances vers le dispositif modifié. Les résultats des utilisateurs avancés sont largement supérieurs en termes de précision et de temps d'action par rapport à ceux des participants novices. Dans une étude utilisant le modèle de Fitts, l'apprentissage du système de pointage est donc un facteur important puisque l'expertise entre 2 dispositifs peut se transmettre. Dans le cas d'étude sur l'interaction, il y a donc une importance sur l'apprentissage des participants d'étude :

- Soit l'utilisateur se conduit comme un expert et visualise directement l'action à réaliser et sa stratégie de mise en œuvre sans les chercher ;
- Soit il connaît une technique proche à partir de laquelle il peut effectuer un transfert de connaissances [D. Natapov et I.S. MacKenzie 2010] ;

- Soit il est totalement novice et prend un « certain temps » à trouver à choisir ses stratégies [I.S. Mackenzie et S.X. Zhang, 2001]. Plus l'utilisateur s'exerce, plus le comportement moteur de ce dernier convergera vers le comportement d'une personne experte.

## **5.2. L'âge du participant**

L'âge est complémentaire à l'apprentissage. Ainsi des études sur les populations sont effectuées en fonction de l'âge des participants. M.W. Smith et al. (1999) dans leur article, ont comparé le niveau de réalisation de tâches avec la souris en fonction de l'âge des participants avec trois groupes distincts : (20-39 ans), (40-59 ans) et (60-75 ans). Les résultats indiquent que pour des actions simples et des doubles clics, la population la plus jeune a moins de difficultés que la population la plus âgée. Avec l'âge la capacité d'apprentissage diminue. Cela impacte donc la capacité à apprendre de nouvelles tâches.

Une autre étude de J.P. Hourcade et al. (2004) compare des enfants de 4 ans, 5 ans et des adultes. La taille des cibles a une plus grande influence sur la difficulté pour les jeunes enfants, dans l'acquisition de cibles. Une cible trop réduite provoque d'après l'étude pour les jeunes de 4 ans un taux d'erreur de 50% et pour les jeunes de 5 ans, 25% d'erreur contre 5% pour une personne adulte. De plus, les stratégies employées dans les mouvements changent, en fonction de l'âge, pour gagner en précision. Ici les enfants de 4 ans manquent encore de certaines connaissances, qui leur permettraient de faciliter leur apprentissage moteur dans l'acquisition de cible.

## **5.3. Situation de handicap moteur d'un participant**

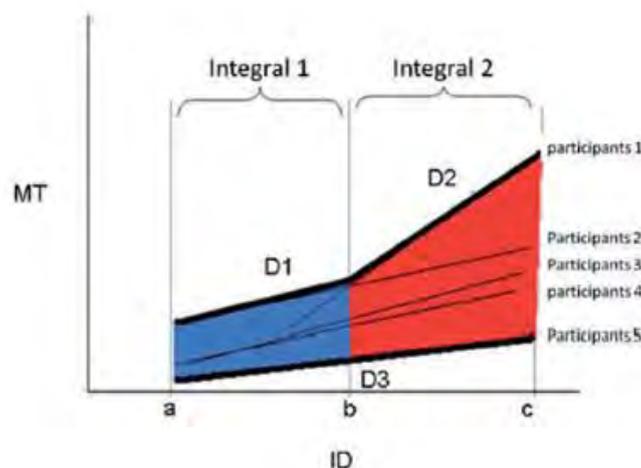
Outre des capacités d'apprentissage et des connaissances acquises, la capacité d'une personne à utiliser un dispositif, ou une technique d'interaction dépend aussi de sa capacité motrice, et des différentes situations de handicap.

Dans la littérature, pour la loi de Fitts, des études ont été menées avec différentes personnes en situation de handicap. Pour utiliser un ordinateur, une personne a besoin de trois éléments : la perception, la cognition et la capacité motrice [F. Vella, N. Vigouroux 2007]. La variation de ces éléments est importante d'un individu à un autre. Cette variation

est encore importante quand on compare une personne handicapée avec une personne valide. Le temps total de l'expérimentation est plus long pour les participants handicapés moteur. Il faut donc pour eux adapter les modèles existant de la loi de Fitts.

La différence de comportement entre des personnes valides et des personnes handicapées a été traduite par les modèles psychophysiques. Un écart important, entre les deux populations, entre les résultats expérimentaux et théoriques, a été démontré dans le cadre d'évaluations des performances humaines dans une tâche de saisie de texte [S. Zhai et al. 2002] et [N. Vigouroux et al 2004], à savoir que les paramètres de la loi de Fitts et du modèle KLM estiment mal les comportements moteurs et perceptifs de cette population. Cela confirme que les estimations théoriques pour la loi de Fitts sont éloignées du comportement réel de cette population.

Du fait que les personnes en situation de handicap ont un degré de motricité différent d'une personne à une autre, Il faut prendre en compte la variabilité de toutes les données, Vella et Vigouroux (2014) proposent un encadrement par intégral afin de modéliser le comportement d'une population en situation d'handicap (Figure 23).



**Figure 23 : Modélisation Vella [F. Vella et N. Vigouroux 2014]**

La loi de Fitts et les *throughput*, dans cette thèse, vont servir de référence à l'évaluation des dispositifs. Ils montrent aussi l'intérêt de bien définir une tâche, et de bien définir la population qui va réaliser cette tâche. L'utilité sera de permettre d'obtenir des métriques

pour la configuration d'un dispositif pour une personne. En premier, sera proposé un exercice lié à la loi de Fitts, les résultats seront évalués pour vérifier l'adéquation entre l'utilisateur et son dispositif. Ceci permettra de définir des recommandations ou d'améliorer la configuration. Pour définir le couple utilisateur / dispositif adéquat nous disposons d'une plateforme d'exercices. Nous allons maintenant expliquer les objectifs et le fonctionnement de celle-ci.

## 6. Outils utilisés : MPH et ECSD

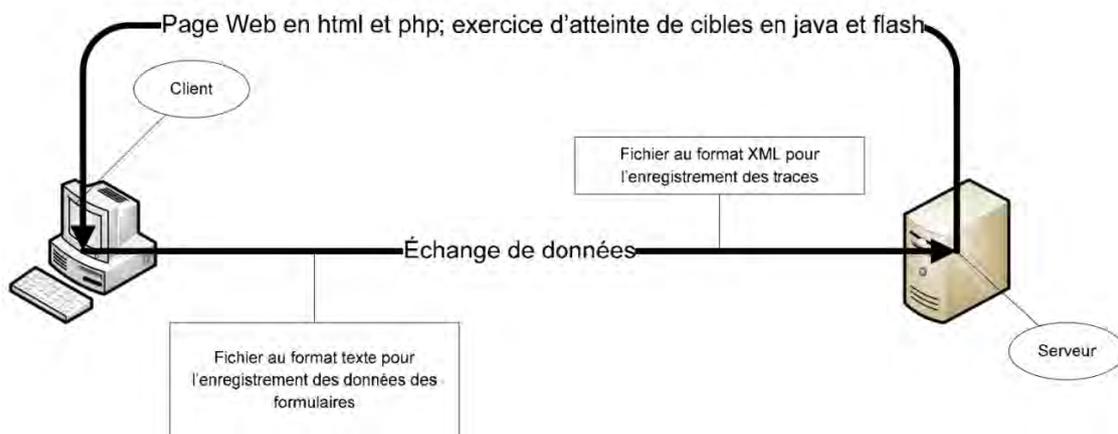
Il est nécessaire d'évaluer l'interaction pour en comprendre le comportement. La loi de Fitts est utilisée et adaptée pour prédire le temps d'atteinte des cibles des différentes interfaces telle que la saisie de texte avec des claviers virtuels (exemple : R.W. Soukoureff et I.S. Mackenzie 2004). Une analyse théorique des performances de la personne est nécessaire afin de pouvoir définir le profil utilisateur de la personne. **Ce profil est défini par plusieurs indicateurs qui sont les paramètres des différentes lois présentées précédemment et les paramètres qui définissent les trajectoires du curseur au travers des tâches de pointage contrôlées.** Ces profils vont permettre de connaître les performances des utilisateurs dans le cas de tâches de Goal Crossing et de pointage. Ces dernières sont les interactions que l'on rencontre dans l'usage des interfaces conçues dans le cadre de cette thèse. Ces exercices sont effectués sur l'application MPH (Modèle Processeur Humain) pour évaluer le couple dispositif / personne au travers d'exercices de pointage.

### 6.1. La plateforme MPH [Thèse F. Vella 2008]

Afin d'avoir des profils moteurs de personnes en situation de handicap nous avons besoin d'une plateforme permettant de recueillir des données de pointage et de définir des exercices de pointage par rapport à nos besoins d'expérimentation. Pour cela nous disposons à l'IRIT d'une plateforme appelée MPH. Ce profil est défini par la loi de Fitts qui permet pour un couple Dispositif / Personne de prédire un temps théorique pour la réalisation d'une tâche contrôlée, dite simple d'atteinte de cible ou de validation. Cela nous permettra d'évaluer l'écart entre les tâches contrôlées pour lesquelles il est demandé à l'utilisateur d'atteindre une cible précise dans un ordre prédéfini, et les tâches écologiques pour lesquelles l'utilisateur est libre de choisir ses cibles et l'ordre dans lequel il effectue ses actions pour réaliser une tâche demandée. Cette dernière est affectée par différents

paramètres de l'environnement tels que des obstacles, ou tout simplement par la complexité des tâches à réaliser

A l'origine MPH servait à modéliser par la loi de Fitts le pointage des personnes afin de modéliser l'atteinte de cible par une personne en situation de handicap. Cette application a permis la modélisation par intégrale vue dans la partie précédente [F. Vella et N. Vigouroux 2013]. La plateforme MPH est accessible sur l'adresse <http://www.irit.fr/MPH> [F. Vella et N. Vigouroux, 2007]. L'architecture de l'application est client/serveur (Figure 24), la partie client accessible par internet permet d'effectuer les exercices « in situ » au domicile de la personne. En effet, le poste de travail des personnes est adapté aux personnes ce qui permet d'avoir de meilleures conditions d'expérimentation [B. Oriola et al. 2007]. L'application serveur permet de mutualiser différentes expérimentations, et d'archiver anonymement les traces d'usage ainsi que des questionnaires d'usage ou de fiches d'identification (âge, handicap ...). Cela permet la comparaison inter expérimentation mais aussi l'analyse pour une personne en particulier.



**Figure 24 : Architecture de l'application MPH [thèse Vella Frédéric 2008]**

L'application propose deux types d'exercices. Le premier est la reproduction de l'expérience de Fitts, 1954, (Figure 25). L'utilisateur doit atteindre la bande orange le plus rapidement et le plus précisément possible (soit le centre de la bande). La position entre la bande bleue et orange s'alterne à chaque atteinte de la bande orange. Une série d'exercices correspond à l'atteinte de la bande droite puis de la bande gauche. Une série est définie par la largeur de la bande  $W$  et la distance entre le centre des deux bandes  $A$ .

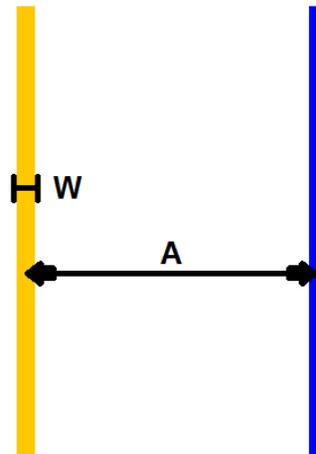
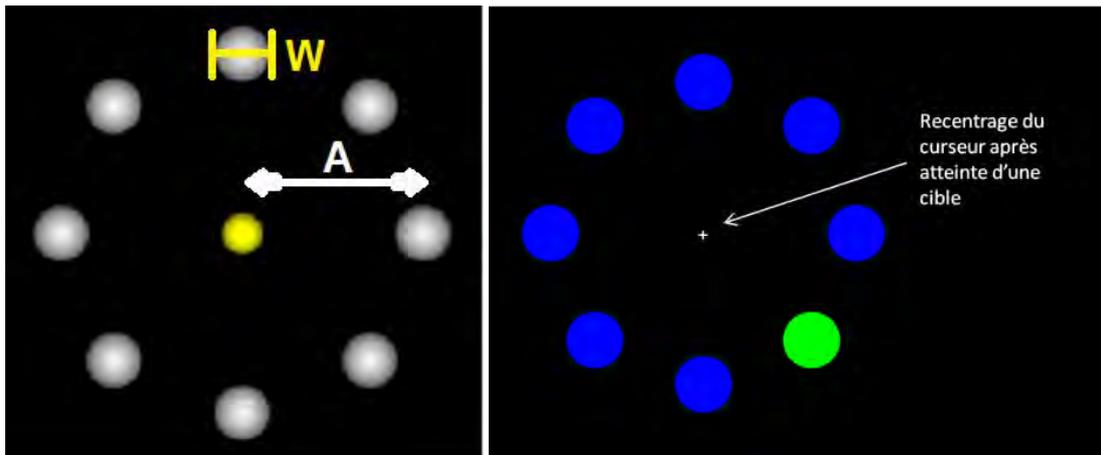


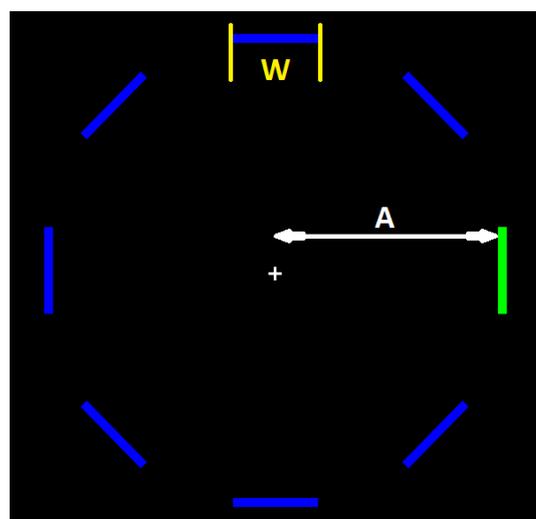
Figure 25 : Expérience MPH 1D [Fitts,1954][F. Vella 2008]

Le deuxième type d'exercice est une adaptation en 2 dimensions de l'exercice de Fitts, illustre par la Figure 26, autour d'une cible centrale ou d'un point de repère. 8 cibles sont positionnées aux points cardinaux nord, sud, est, ouest ainsi que leurs intermédiaires nord-est, sud-est, sud-ouest et nord-ouest. La position du centre de la cible est calculée en fonction du centre de la cible centrale. Pour chaque couple de Fitts ( $W$ ,  $A$ ), on définira une série d'exercices de 8 atteintes de cible. Parmi les 8 cibles, aléatoirement l'une s'allumera en jaune ; il faudra l'atteindre le plus rapidement possible et le plus précisément possible en visant le centre des cibles. Suite à l'atteinte d'une cible, il existe 2 solutions, soit nous demandons à l'utilisateur de revenir sur la cible centrale pour qu'il se positionne pour l'atteinte suivante (Figure 26 Gauche) avec pour avantage que l'utilisateur ne perde pas de vue le curseur, soit le curseur de la souris est téléporté au centre du repaire, automatiquement après une atteinte de cible (Figure 26 Droite). Pour ce dernier, l'avantage est de diviser par 2 la distance parcourue pour réaliser l'exercice, ce qui permet de diminuer la fatigue de l'utilisateur sur les déplacements du curseur. Le choix des couples ( $W$ ,  $A$ ) de chaque série est à déterminer avant une expérimentation. Ce seront les mêmes couples pour chaque participant. Ils seront tous proposés autant de fois avec un ordre d'apparition des séries aléatoire, ce qui provoquera plus de variabilité dans les résultats avec l'avantage de pouvoir plus facilement généraliser ces derniers.



**Figure 26 : Expérience MPH 2D (à gauche avec une cible centrale, à droite avec un repère)**

Pour le projet JACO qui sera expliqué dans le chapitre 2, il a été ajouté un 3ème exercice. Le Goal Crossing (Figure 27) consiste à passer la souris sur une cible. Le fait d'atteindre la cible, la valide automatiquement. Ces cibles sont de formes rectangulaires. La grande longueur des rectangles représente la valeur  $W$  de Fitts. Ce côté est orienté perpendiculairement au point central de l'écran à une distance  $A$ . Les couples  $(W, A)$  sont les mêmes que ceux de l'exercice de pointage. Mais, l'ordre d'apparition des séries est toujours aléatoire ainsi que l'ordre d'apparition d'une cible de la série. Le curseur est automatiquement, après validation, replacé au centre. Pour éviter toute influence entre deux atteintes de cible, le curseur doit marquer un temps de pause forcé. L'utilisateur peut ainsi stopper son mouvement avant l'affichage de la cible suivante tout en ayant eu le temps de voir le curseur au centre.



**Figure 27 : Exercice de Goal Crossing**

Les données de l'application MPH sont enregistrées dans les fichiers traces qui s'incrémentent à chaque mouvement du dispositif, lors de l'utilisation de ses boutons, ou lors du changement de séries. A partir de ces données un outil a été développé pour les analyser.

## **6.2. ECSD pour l'analyse des couples participants dispositif**

Afin de définir le comportement d'interaction de la personne, il est nécessaire d'analyser les traces d'usage des interfaces ou des exercices de la plateforme MPH. Il est donc raisonnable de disposer d'un outil qui permette la visualisation et le calcul des différentes métriques de la littérature. De plus, à terme cet outil pourra servir à la décision d'outils d'interaction pour l'aide à la décision des personnels médico-sociaux. Nous appellerons cette application ECSD pour Etude des Couples Participant / Dispositif.

L'application (écrite en java) ECSD propose plusieurs adaptations de la loi de Fitts au moyen d'outils tels que la régression linéaire et son intégrale qui se calcule en fonction de l'ID ou de l'IDe. Les fonctionnalités de l'application correspondent à des besoins d'analyses pour donner des métriques d'aide à la décision. L'application permet d'effectuer une comparaison entre plusieurs couples participant/dispositif.

La trace des fichiers est convertie dans un format de données (Figure 28) qui permet d'effectuer le calcul de plusieurs métriques de la littérature. Les données peuvent être fusionnées et filtrées. La structure de données contient la liste des actions des utilisateurs de l'une de nos applications. Chacune des actions contient la liste des déplacements du curseur qui ont été nécessaires pour l'atteinte d'une cible avec le temps correspondant au déplacement. Il contient aussi la liste des cibles atteintes par le curseur sur lesquelles l'utilisateur est passé.

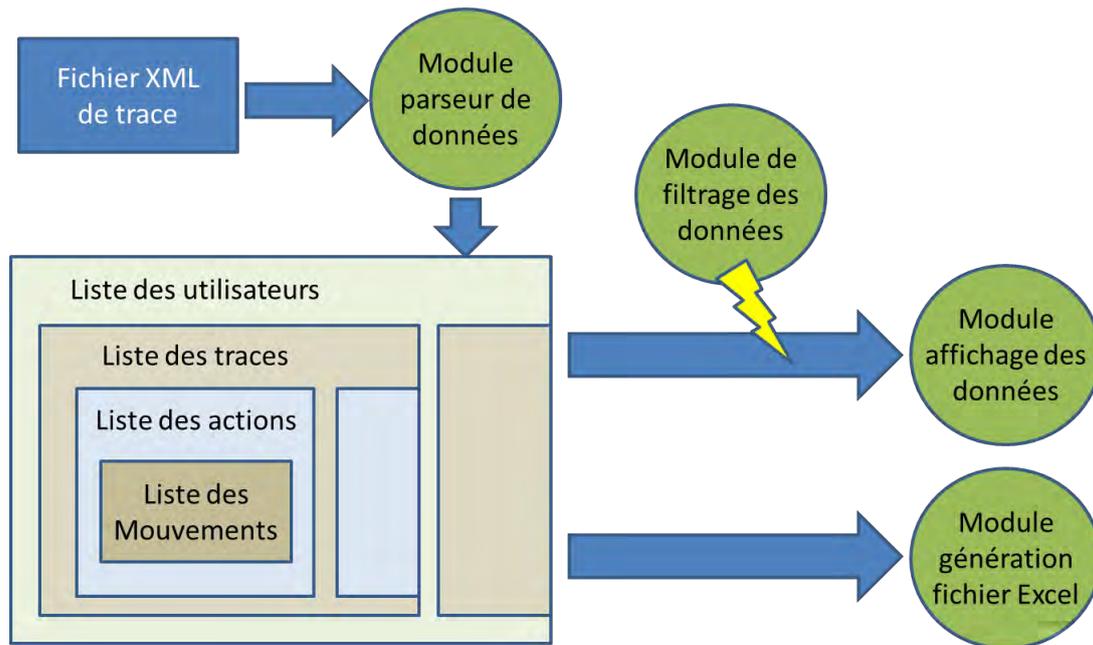
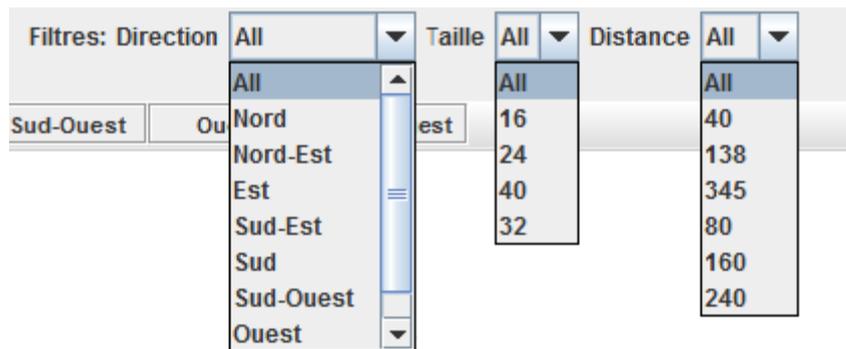


Figure 28 : Structure ECSD

L'architecture de l'application est expliquée par la Figure 28. Dans cette figure des filtres apparaissent. Les filtres de l'application correspondent à la création d'instances de leurs classes en enlevant les données qu'ils filtrent, afin de pouvoir faire l'étude d'une variable avec le plus de finesse possible. Nous avons proposé différents filtres (Figure 29):

- Filtre direction : permet d'analyser une direction en particulier, un utilisateur peut avoir une ou plusieurs direction(s) préférentielle(s). Il permet aussi de définir des directions qui posent des problèmes pour diverses raisons telles que les difficultés motrices de la personne pour se déplacer dans une direction.
- Filtre distance cible (en pixels) : permet d'analyser une distance de cible en particulier, pour mieux voir l'impact que peut avoir la taille d'une cible pour un couple Participant-dispositif.
- Filtre taille cible (en pixels) : permet d'analyser une taille de cible en particulier, pour mieux voir l'impact que peut avoir la distance d'une cible pour un couple Participant-dispositif.
- Filtre déplacement : permet d'analyser un type de déplacement particulier ; à terme ce filtre permettra de définir plusieurs types de sous-déplacements. Ce filtre permet d'étudier la trajectoire réalisée par la personne.



**Figure 29 : Les filtres de données ECSD**

Une interface graphique a été conçue afin de pouvoir sélectionner les données que l'on souhaite analyser. En utilisant le module de parseur de données (Figure 30 B), on ajoute à la structure de données de nouvelles informations. Cette structure de données est enregistrable en fichiers binaires java (Figure 30 A) et permet de faciliter le stockage des résultats des expérimentations.

L'application possède aussi un module d'affichage de données. Sur le principe d'un bureau, les données sont affichées dans des fenêtres que l'on peut déplacer et ordonner (Figure 30 D). Parmi les données affichables, il est possible d'afficher la courbe de régression de la loi de Fitts pour un enregistrement donné. Un autre affichage possible est l'analyse en fonction de la direction (Figure 30 C). Cet affichage va faire apparaître sous forme de graphique polaire, les différentes métriques de la littérature après les avoir calculées, exemple le TRE (Target Re-Entry) sur la Figure 31.

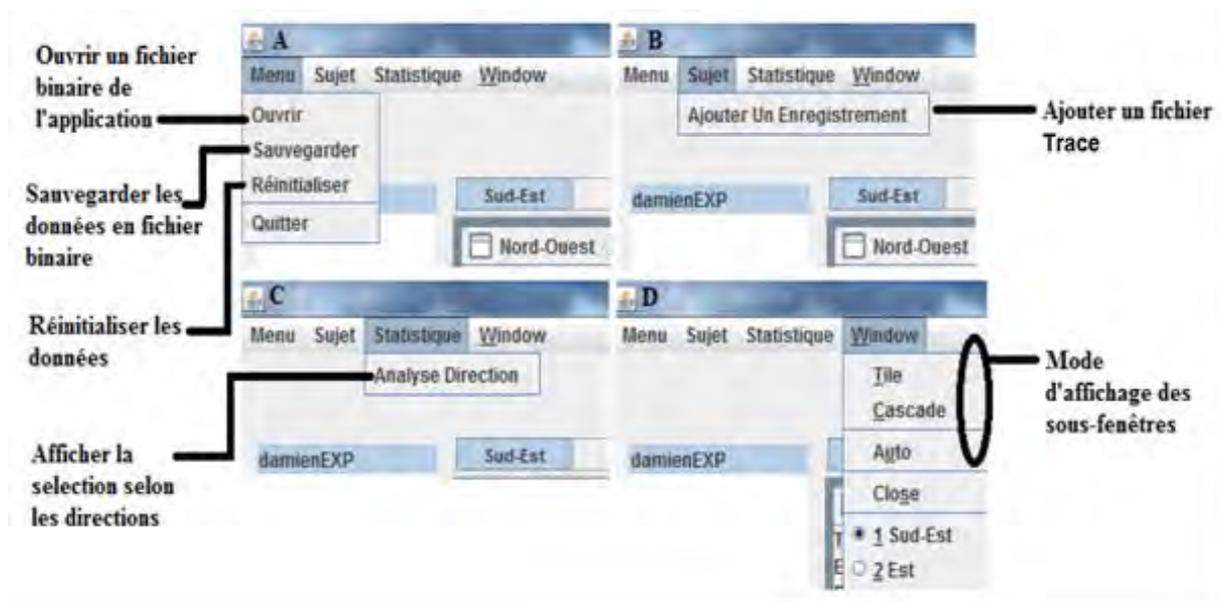


Figure 30 : Menu de l'application ECSD

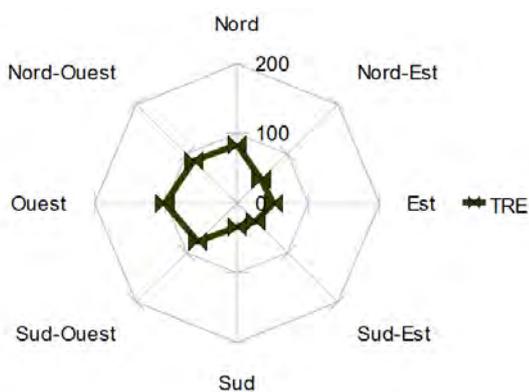


Figure 31 : Graphique polaire, Analyse du TRE en fonction de la direction

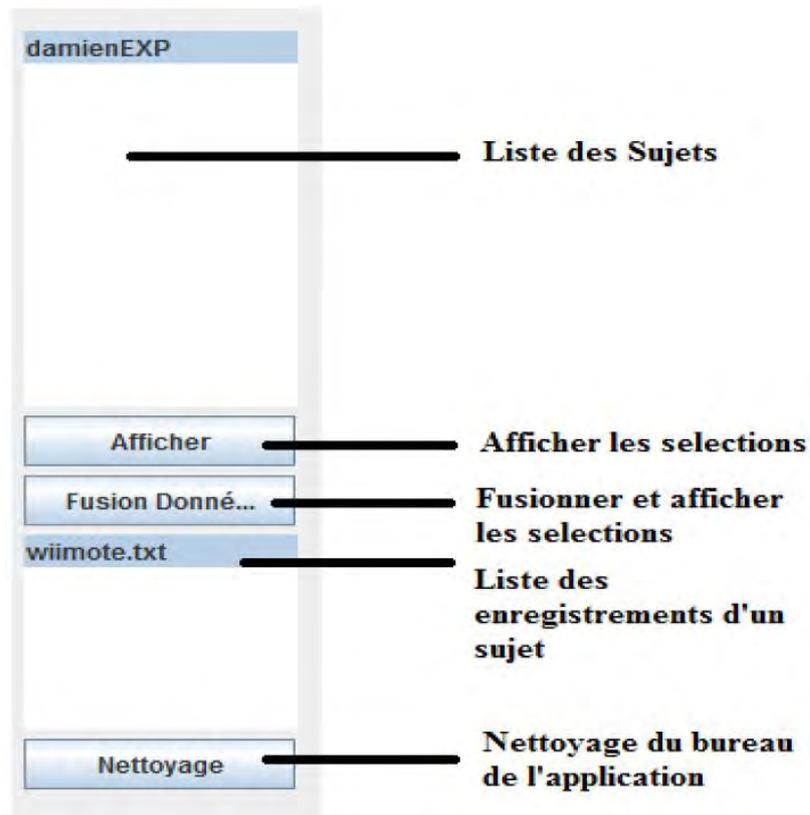


Figure 32 : Sélection des données à afficher

Sur l'interface, le menu de gauche (Figure 32), permet de sélectionner les participants, ainsi que 1 ou plusieurs dispositifs au travers de 2 listes. Il y a 2 affichages possibles des données sélectionnées : soit pour chacune des sélections nous obtiendrons 1 graphique qui représente 1 participant avec 1 dispositif, soit 1 seul graphique apparaît mais il contient l'ensemble des données. Le menu de filtrage de l'application (Figure 30) peut être utilisé sur ces affichages.

Pour chacune des données et métriques d'ECSD, il est possible d'obtenir les statistiques descriptives : la valeur minimale, maximale, moyenne, le calcul de l'écart-type, du médian et du MAD (median absolute deviation).

ECSD permet aussi de calculer la régression linéaire de Fitts avec l'ID et l'IDe avec les formules vues précédemment [P.M. Fitts 1954]. Ces métriques se placent avec le calcul de la précision, des throughputs, mais aussi du calcul de l'intégrale de la régression de Fitts, dans un intervalle donné. Deux variables ont été ajoutées : la première concerne l'écart entre la distance du mouvement et la distance optimale, et la deuxième le calcul de la vitesse du

déplacement du curseur. Pour l'analyse des sous mouvements, ECSD propose aussi les variables de I.S. Mackenzie (2001), TRE, TAC, MDC, ODC, MV, ME, et du MO.

Une fonction permet aussi de créer un fichier compatible Excel, après sélection et utilisation ou non de filtres pour permettre l'utilisation d'autres applications statistiques, telles que R ou Matlab.

A partir de nos outils et de nos interfaces, il faut maintenant évaluer les solutions que nous avons mises en place pour des personnes en situation de handicap. Dans un premier temps nous allons essayer de justifier le choix d'un dispositif pour une personne.

## **7. Choix du dispositif de la personne**

Nous proposons d'effectuer un exercice de Fitts en utilisant la plateforme MPH. Notre objectif est d'étudier le comportement des utilisateurs entre deux dispositifs différents selon leurs expériences.

### **7.1. Apparatus**

Pour l'exercice, l'atteinte de cible débute toujours par le centre de la cible centrale en direction d'une cible qui s'allume aléatoirement. Au cours de l'exercice le participant devra atteindre 2 fois les 8 cibles, de 15 couples de cibles, de tailles et de distances différentes. Les 15 couples ont été empruntés à [J.O. Wobbrock, K.Z. Gajos 2008] et [K.Z. Gajos et al 2008] (Tableau 2), qui a proposé un exercice similaire avec des personnes avec divers degrés de handicap moteur. L'objectif étant que des personnes en situation de handicap puissent effectuer l'exercice.

**Tableau 2 : Indices de difficulté (Apprentissage et Test)**

Apprentissage			Test		
A	W	ID	A	W	ID
128	128	1	128	16	3,169925
256	96	1,87446912	128	32	2,32192809
384	32	3,70043972	128	64	1,5849625
			128	96	1,22239242
			128	128	1
			256	16	4,08746284
			256	32	3,169925
			256	64	2,32192809
			256	96	1,87446912
			256	128	1,5849625
			384	16	4,64385619
			384	32	3,70043972
			384	64	2,80735492
			384	96	2,32192809
384	128	2			

Pour répondre à notre objectif, nous avons identifié deux situations dont découlent les deux évaluations décrites ci-dessous :

La première expérience a pour objectif de comparer un dispositif novice versus un dispositif expert au travers des valeurs du throughput. 18 participants valides experts dans l'utilisation de la souris et novices dans l'utilisation d'un trackball ont participé à cette expérimentation. Ils ont effectué 2 fois l'exercice MPH : pour une moitié en premier avec une souris, suivi du trackball et l'autre moitié inversement.

La deuxième expérience vise à comparer deux dispositifs novices. 23 autres participants valides *a priori* novices pour l'utilisation d'un trackball et d'un touchpad ont participé à cette deuxième expérience. Cependant 10 utilisateurs ont reconnu au cours de l'expérimentation avoir déjà utilisé un touchpad. En effet le terme touchpad a été mal compris malgré un descriptif correct et complet au téléphone. Ces 10 participants ont été exclus dans la présentation des résultats.

Il a été demandé à chaque participant pour chaque dispositif, de choisir la calibration qui leur semble la plus utilisable par personne. En effet, dans le protocole il est décrit que chaque personne handicapée est unique, et par conséquent toutes n'auront pas une calibration identique pour le confort de l'interaction. Durant les exercices nous avons récupéré toutes les traces de mouvement du curseur pour calculer les throughput. L'expérimentation a été complétée par des questionnaires portant, sur le ressenti de la fatigue et sur l'utilisation de chacun des dispositifs. A la fin, il a été demandé aux participants de sélectionner un dispositif, tout en précisant les 3 critères qui les portent vers cette décision parmi 6 critères (Force, Précision, Vitesse, Maniabilité, Confort et Effort). Le test de Shapiro-Wilk a montré que la distribution des données était normale. Cette normalité nous permet d'étudier la différence significative à travers une analyse des variances (ANOVA).

## 7.2. Résultats et Discussion

La première expérimentation a comparé la souris et le trackball. L'hypothèse que nous formulons est que la souris est un dispositif plus performant que le trackball pour tous nos participants valides de par leurs expertises.

La Figure 33 représente pour chacun des participants la différence entre le TPa souris et le TPa trackball, de même pour TPc. Dans le cas de cette expérimentation les différences pour les 18 participants ont des valeurs positives. Une valeur positive donne l'avantage pour la souris. Ceci est conforté par une analyse ANOVA à un facteur qui nous donne une différence significative de p-value pour le TPa de  $1,235e-05$  et pour le TPc de  $6,815e-06$ . Ce résultat d'identification du dispositif le plus performant au moyen des divers throughput confirme les résultats de la littérature [I.S. MacKenzie et al. 2001] et notre hypothèse pour cette population d'étude.

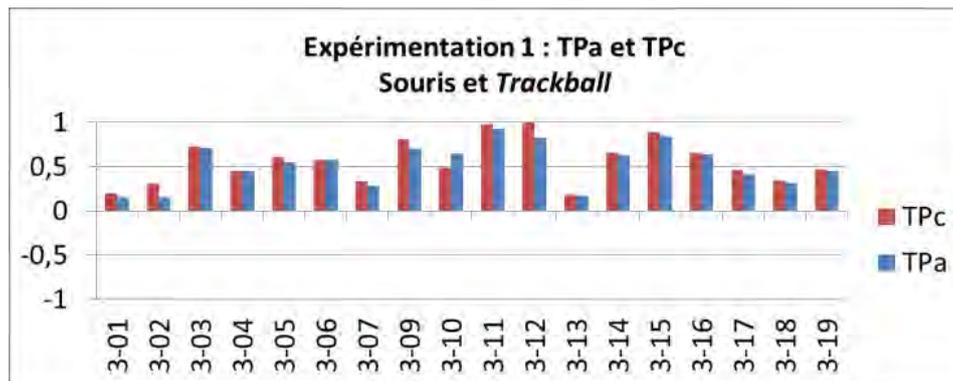


Figure 33 : Les throughput de l'expérimentation 1

La deuxième expérimentation a pour but de vérifier l'utilisation des throughput en tant que valeur de décision d'un dispositif le plus performant. Nous avons conservé le trackball peu connu du grand public et ajouté le touchpad qui est présent sur la majorité des ordinateurs portables.

L'objectif est de déterminer si le throughput est capable de prendre la décision du dispositif le plus performant pour la personne. Les résultats de la Figure 34 montrent que les différences sont plus proches de la valeur 0 que pour l'expérimentation 1. Une valeur de 0 signifie que les dispositifs seraient équivalents en termes de performance.

On notera que pour les participants 6-01 et 6-06, les deux valeurs TPa et TPc sont en désaccord sur le dispositif le plus performant car l'un est positif et l'autre est négatif.

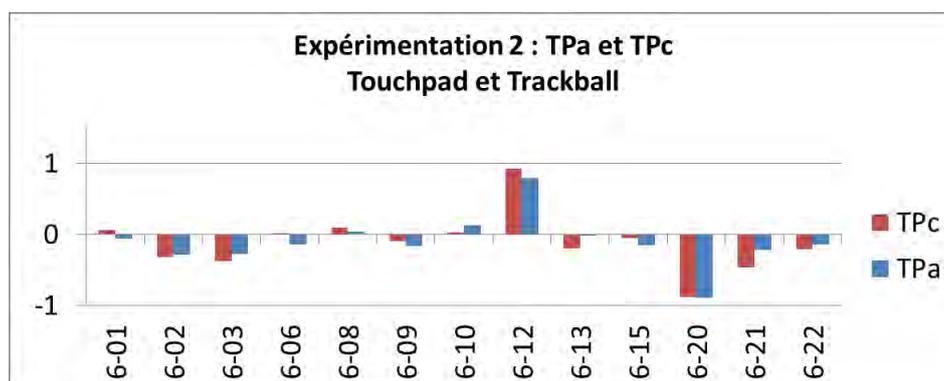


Figure 34 : Les throughput de l'expérimentation 2

De ces observations, nous constatons une variabilité dans la décision pour chaque participant du protocole ce qui nous pousse à dire que les throughput doivent être

accompagnés par d'autres métriques pour confirmer cette décision. Il nous faut pouvoir choisir le throughput le plus pertinent pour la meilleure décision.

En effet une des questions ouvertes est de se questionner sur le résultat à proximité de la valeur 0 ; quel indice de confiance accorder au throughput lorsqu'on se rapproche de 0 ?

De plus l'analyse ANOVA à un facteur montre que les throughputs a et c ne sont pas significatifs, respectivement avec une p-value de 0,5633 et de 0,5527.

### **7.3. Conclusion**

Le throughput n'a pas permis de déterminer le dispositif le mieux adapté pour tous les participants puisqu'il y a pour certains participants un désaccord entre TPa et TPc. Toutefois, il a permis de mettre en avant le dispositif expert de la personne. Nous allons émettre comme hypothèse que le dispositif utilisé couramment par l'utilisateur est celui qui est adapté. Et donc celui-ci sera utilisé dans les expériences suivantes de cette thèse.

Il faudrait aussi appliquer le protocole auprès de personnes en situation de handicap afin de vérifier que le throughput montre que le dispositif en adéquation avec les capacités motrices de la personne est bien le dispositif dont elle est experte. De par les réglementations et la protection des personnes en situation de handicap, il peut être difficile de recruter des personnes en situation de handicap pour participer à des protocoles d'expérimentation.

## **8. Conclusion du chapitre 1**

Dans ce chapitre 1, l'état de l'art, nous a permis de passer en revue un grand ensemble de techniques d'interactions, et d'améliorations qui permettent à un maximum d'utilisateurs de pouvoir accéder à leur environnement informatique.

L'étude du mouvement a permis d'identifier les difficultés de l'interaction. Cela a permis l'apparition d'un ensemble de solutions d'interaction. De cette base, nous avons utilisé comme méthode une conception centrée utilisateur avec ses différentes mises en œuvre. Les solutions créées ont besoin d'être évaluées ; pour cela différents modèles prédictifs peuvent nous aider dans cette étape d'évaluation. L'objectif étant d'avoir un comportement d'interaction des personnes pour évaluer les solutions.

Dans ce souci d'évaluation, nous avons conçu des outils, pour évaluer l'interaction et le comportement des utilisateurs lors de cette interaction. Un premier résultat de ce chapitre est qu'il est souhaitable lors de l'évaluation d'une interface d'utiliser le dispositif de la personne selon ses préférences d'interaction en termes de performance et de confort de celles-ci.

Il faut remarquer qu'une utilisation longue de ces dispositifs, parfois associée à une inadéquation de ceux-ci aux besoins des utilisateurs, a montré des fatigues motrices et attentionnelles chez les utilisateurs [F. Vella, N. Vigouroux 2007], [C. Bérard 2004]. La fatigue diminue les performances de l'utilisateur jusqu'à le rendre incapable d'interagir avec son système.

Afin de répondre correctement au besoin d'un utilisateur en situation de handicap, il semble nécessaire de créer des outils de conception et d'évaluation. Dans la suite de la thèse, seront présentés les différents projets sur lesquels nous avons utilisé la méthode de conception centrée utilisateur avec la phase de recueil des besoins, la phase de conception et la phase d'évaluation. La première porte sur l'utilisation d'un bras robotique de préhension JACO. Le deuxième sur un outil de création d'interface avec une méthode centrée utilisateur.





## **Chapitre 2 : Conception d'interface virtuelle pour commander un bras robotique**



## 1. Introduction

Les nouvelles technologies apportent aujourd'hui de nombreuses solutions aux personnes en situation de handicap moteur avec des troubles de préhension. La robotique et les technologies de l'information et de la communication peuvent les aider dans leur vie quotidienne. Les solutions robotiques pour l'assistance à la préhension comprennent plusieurs dispositifs robotiques pour pouvoir les piloter. Ces derniers sont mis à disposition des personnes en situation de handicap des membres supérieurs, soit pour pallier la perte fonctionnelle, soit dans une optique de rééducation.

D'après un rapport ministériel de 2012 sur « le développement industriel futur de la robotique personnelle et de service en France », la stratégie du développement de la robotique est supportée par une volonté politique affirmée. Différents pays, dont la Corée du Sud, ont pour ambition de devenir les leaders mondiaux en robotique dès 2018. Le Japon et les États-Unis font un investissement massif pour cette dernière. D'un point de vue académique, la France est un acteur important et plusieurs entreprises s'y développent comme Aldébaran, Gostai, Induct, RB3D ou Robosoft.... Ce contexte a permis un essor technologique important et un transfert industriel abouti. L'objectif est d'utiliser la robotique pour fournir en une seule assistance robotique plusieurs aides techniques, ou un équivalent à une aide humaine.

Cette aide robotique peut prendre plusieurs formes : robots humanoïdes, ménagers, industriels, bras robotiques, etc.

Dans notre cas, nous allons nous concentrer sur l'aide à la préhension avec un bras robotique pour attraper divers objets de la vie courante. L'avantage d'une telle aide est de venir en complément à l'auxiliaire de vie, celle-ci n'étant pas toujours présente. L'utilisation d'un bras robotique nécessite une interface pour le piloter. Le choix de l'interface est important.

Le bras robotique que nous allons utiliser est le bras JACO qui a pour origine la société Kinova basée au Canada. Ce bras commercialisé a déjà montré son efficacité pour différentes personnes en situation de handicap [F. Routhier et. al. 2014]. Cependant, celui-ci est vendu

avec un joystick. Ce dernier a posé des problèmes d'accessibilités au bras robotique pour un certain nombre de personnes en situation de handicap moteur. Les ergothérapeutes nous ont fait un retour sur les difficultés d'usage comme l'accès aux boutons, l'utilisation de l'anneau et les boutons sur le manche. Le besoin exprimé est de proposer une solution alternative pour le contrôle du bras robotique JACO.

Pour commencer, nous allons montrer au travers de l'histoire de la robotique, l'évolution des solutions d'interaction, puis nous étudierons les différentes solutions scientifiques proposées dans la création d'interfaces pour contrôler un bras robotique. Et nous allons voir comment ces solutions peuvent répondre aux besoins.

Nous verrons les limites des solutions proposées qui ne répondent pas à tous les besoins des personnes en situation de handicap. Pour y répondre, il sera utilisé la méthode centrée utilisateur (voir Chapitre 1 : La méthode de conception centrée utilisateur) pour des personnes ne pouvant pas utiliser le joystick puisqu'il est nécessaire d'étendre l'accessibilité au bras robotique pour une plus grande accessibilité pour les personnes en situation de handicap varié.

Pour répondre à ce besoin nous avons mis en place une démarche de conception centrée utilisateur. Nous avons développé des interfaces de contrôle que les personnes en situation de handicap pourront utiliser à partir d'un ordinateur et de leurs dispositifs de pointage habituels. Pour évaluer ces interfaces, un protocole d'expérimentation a été mis en place auprès de deux personnes en situation de handicap moteur. Dans ces deux études de cas, une première étape consistera à définir le comportement d'interaction au travers d'exercices de la plateforme MPH (Chapitre 1 : La plateforme MPH). La deuxième étape consistera à utiliser le bras robotique JACO pour réaliser différents exercices de tâches écologiques. Nous discuterons enfin des résultats obtenus par l'utilisation du bras pour les exercices afin de vérifier que ces interfaces apportent une amélioration et une meilleure réponse aux besoins des personnes par rapport à la situation initiale. Dans notre cas la réponse sera favorable si un utilisateur qui ne peut utiliser les commandes du bras, arrive à réaliser les exercices avec nos interfaces et que cette solution semble les satisfaire. De plus le profil du comportement d'interaction des participants permettra d'évaluer l'écart entre l'usage des interfaces et ce dernier. Cela permettra aussi de montrer si les interfaces

répondent bien à l'objectif d'utilisabilité du bras JACO par des personnes ne pouvant pas utiliser le joystick JACO.

## **2. Etude des commandes des bras de préhension**

Les besoins et les attentes en matière de nouvelles technologies par les personnes tétraplégiques sont principalement de pouvoir accéder à des tâches de la vie courante, par exemple se nourrir : il faut pouvoir attraper l'aliment et le porter à la bouche. Dans le cas où l'aliment est trop grand, il faudra le découper et dans le cas où il est dans un bocal, il faudra ouvrir ce dernier. Il est aussi nécessaire de se rendre présentable, avec la toilette et le soin du visage, de s'habiller et se déshabiller. Il faut par conséquent pouvoir attraper et garder un objet, voire le lâcher. La réalisation de ces besoins est évaluée et participe à l'amélioration de la qualité de vie des personnes en situation de handicap [Tsui et al. 2009].

Le développement de solutions robotiques nécessite un ensemble de spécialisations, pour la réalisation de technologies complexes [Bien et al. 2008]. Ces technologies sont proposées à des utilisateurs non spécialisés qui ont des difficultés à les utiliser. De plus, l'environnement des utilisateurs est diversifié, entre l'environnement familial et médico-social. Il est donc important de tenir compte de ces contraintes pour créer une interface de commandes adaptables à la personne. La configuration de cette dernière doit s'accorder aux mouvements des personnes, et principalement aux limitations de ses mouvements afin de faciliter la prise en main. Il est aussi important que la solution ne demande pas une connaissance trop technique pour son utilisation.

Le bras JACO, d'une part, s'impose sur le marché comme un des bras les plus prometteurs en termes de contribution fonctionnelle et d'ergonomie (vitesse de déplacement rapide, apprentissage facilité, poids allégé, encombrement minimum, etc.) et, d'autre part, il se situe dans la continuité des travaux de recherche avec l'I-ARM de la société Exact Dynamics©. En effet, depuis environ 30 ans, des bras robotiques de préhension existent avec pour objectif de répondre à des besoins de préhension et de manipulation. Nous allons dans un premier temps revenir sur l'historique de la robotique de préhension.

## 2.1. Histoire des bras robotiques de préhension

Dans l'historique des bras robotiques de manipulation, « **Handy** » (Figure 35), disponible en Grande-Bretagne, est le premier qui a été réalisé pour des tâches de nutrition et d'hygiène pour des personnes atteintes de paralysie cérébrale. Ce fut l'un des premiers sur une base mobile développé en 1987 ([Topping and Smith 99]).



Figure 35 : Bras robotique « Handy » (<http://handicap4.e-monsite.com/pages/le-futur-des-amenagements-et-des-equipements.html>)

Par la suite, en 1988, le **MANUS** (Figure 36) s'est imposé comme chef de file. Fabriqué et commercialisé dans les années 90 par la société Exact Dynamics aux Pays-Bas. Ce bras robotique a eu le mérite de prouver l'intérêt de la robotique dans l'environnement d'une personne. Le MANUS est une « commande » du Ministère de la Santé aux Pays-Bas ; il a révélé que la volonté politique au service de la personne handicapée pouvait se concrétiser dans l'équipement à domicile.



Figure 36 : Bras robotique Manus (<http://handicap4.e-monsite.com/pages/le-futur-des-amenagements-et-des-equipements.html>)

MANUS possède 6 degrés de liberté et il est doté d'une pince à 2 doigts. Initialement nommé MANUS, aujourd'hui son nom est l'I-Arm. Il peut-être amarré à l'assise ou à l'accoudoir du fauteuil roulant. D'un poids initial de 20 kg, la dernière version est 2 fois plus légère. Son interface est de type commande « pas à pas », peu intuitive à première vue, elle mériterait d'être améliorée [N. Biard, 2008].

*« Ces difficultés se situent à 2 niveaux. Tout d'abord, l'utilisation du clavier 16 touches, plus simple à utiliser d'une manière ergonomique que le joystick, ne peut être utilisé par tous les patients. Cela nécessite des capacités résiduelles distales et est donc réservé en majorité aux personnes souffrant d'une maladie neuromusculaire (Abdulrazak, Grandjean, & Mokhtari, 2001). Les personnes les plus dépendantes telles que les personnes présentant un Locked In Syndrome (LIS), une Sclérose Latérale Amyotrophique (SLA)..., qui sont peut-être les plus susceptibles d'acquérir ce type d'aide technique, ont comme seule possibilité d'accès le système en défilement par contacteur. La lenteur inhérente à ce type d'accès rend inutilisable le système robotique.*

*Le deuxième point rendant difficile l'utilisation de l'IHM du Manus est la capacité d'apprentissage que sa manipulation requière. Cela est surtout vrai pour l'utilisation du joystick qui requiert des capacités cognitives intactes (Hok Kwee, 1998). Cela interdit donc l'accès à cette aide technique aux personnes présentant un traumatisme crânien, un trouble de l'orientation spatiale, des difficultés attentionnelles ou mnésiques... De même il reste difficile pour un enfant d'appréhender son maniement.*

*En conclusion, il apparaît essentiel de développer une interface du Manus à la fois adaptable et ouverte aux capacités de l'utilisateur et suffisamment simple et intuitive pour permettre son accès au plus grand nombre. » [N. Biard, 2008].*

De cette citation, il faut retenir que les interfaces doivent être adaptées aux capacités résiduelles de la personne et aussi proposer des solutions pour accélérer le fonctionnement du bras. De plus l'apprentissage étant difficile, il serait important de proposer des solutions plus simples à la compréhension et à l'usage. De plus, selon I. Laffont et al. (2009), l'usage des dispositifs nécessite d'avoir des capacités cognitives suffisantes à la compréhension des commandes et à leurs mémorisations ce qui a une influence sur l'apprentissage.

Le Manus a fait office de plusieurs recherches. Tout d'abord le projet ARPH [P. Hoppenot et E. Colle, 2000] qui consistait à fixer le bras sur une base mobile afin de permettre à la personne en situation de handicap de pouvoir aller chercher des objets et de les manipuler à distance. Les résultats ont été améliorés avec l'utilisation d'une caméra et de capteurs ultrason pour l'automatisation de la prise d'objet [E. Colle et. al 2006].

Le robot **JACO**, à partir de 2010, (Figure 37) est commercialisé par la société canadienne KINOVA. JACO est conçu à base de fibre de carbone ; cela allège de manière conséquente son poids. L'amplitude du bras est de 90 cm. Il possède différentes fonctionnalités telle que le mode de facilitation pour boire, ou l'enregistrement de position du bras. Il accède aussi bien aux objets posés à terre qu'à des objets situés devant l'utilisateur ou au-dessus de sa tête. Il possède 3 doigts pour la préhension d'objet et utilise 6 degrés de liberté pour atteindre ces objets. Le déplacement cartésien de la main se fait dans un espace 3D (X, Y, Z). Le bras peut aussi pivoter ou s'incliner autour d'un objet, pour orienter la main et les doigts.



**Figure 37 : Bras Jaco de la société Kinova**

La sécurité et la pertinence du bras JACO, pour des personnes en situation de handicap des membres supérieurs, doit permettre à l'utilisateur de renforcer son autonomie. L'étude de [Maheu, 2011] rapporte que le bras JACO est perçu comme un facilitateur pour réaliser des tâches importantes, comme « attraper une bouteille, se servir dans un verre et boire ». Il y a toutefois un temps important nécessaire pour exécuter des tâches spécifiques, ces dernières dépendent de la facilité du contrôle du bras robotique. Toutefois, quel que soit le bras

robotique, l'effort de l'utilisateur dans le repérage et la stratégie de saisie demeure important et exigeant. Il est donc primordial de définir un bon système de contrôle qui permettra de faciliter l'interaction. De plus, la commande doit être diversifiée pour permettre à un plus large panel de personnes en situation de handicap d'accéder à cette technologie.

## 2.2. Les commandes de contrôle de bras robotique

Dans l'utilisation de bras robotiques embarqués, nous avons d'un côté le bras effecteur et réalisateur de tâches et de l'autre, l'interface de commande. Cette interface de commande n'est toutefois pas toujours adaptée aux capacités motrices résiduelles de la personne en situation de handicap.

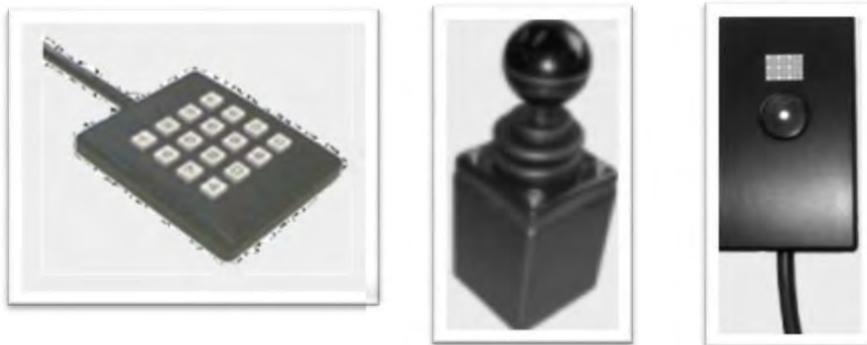
De plus, les bras robotiques peuvent être pilotés avec différentes commandes. Le premier, le mode articulaire, consiste à choisir une des articulations du bras et d'effectuer une action dessus. Le deuxième, le mode cartésien, permet quant à lui de déplacer une partie du bras, la main en général, dans l'espace sans tenir compte des articulations ; un algorithme gère le déplacement. Le dernier mode est une action qui consiste à dire au bras de se déplacer lui-même dans une configuration préenregistrée [J. Heidmann et C. Dumazeau, 1999]. Dans le cas où l'algorithme cartésien bloque en raison d'une position limitée du bras, il existe deux stratégies pour sortir d'un blocage : la première consiste en l'utilisation d'un mode articulaire, la deuxième consiste à revenir à la position précédente du blocage, et l'utilisateur effectue un mouvement supplémentaire de contournement de la position du blocage.

Pour effectuer ces déplacements l'utilisateur va utiliser différentes commandes. Pour illustrer ce point nous allons présenter les commandes physiques **du bras Manus** (Figure 38). En premier, pour des personnes ayant des capacités motrices ne permettant que l'utilisation de contacteur, le display est un dispositif qui permet 2 choses : en premier, il fonctionne comme un **contacteur en balayage**, et en deuxième, il possède un afficheur avec des LED qui permettent à l'utilisateur de savoir dans quel menu il se situe ainsi que l'avancement du balayage. Il faut savoir que ce système est lent, et nécessite une phase de mémorisation des commandes. Ce mode est aussi utilisé pour d'autres bras robotiques comme Neater Eater ;

ce bras permet de manger et son utilisation se fait à l'aide de 2 contacteurs, où à l'aide d'un actionneur mécanique, pour réaliser les allers retours du robot entre la bouche et l'assiette.

Une autre commande du bras Manus est le clavier qui possède 16 touches. Au début l'utilisateur en utilise 4 pour choisir le mode de pilotage (articulaire, cartésien, boire, ranger le bras) et les autres boutons réaliseront une actions du bras en fonction du mode. De plus le display ici est utilisé en tant que feedback visuel.

La dernière commande est un **joystick**. Il peut être utilisé pour effectuer une action du bras robotique, mais aussi pour choisir le mode d'action. La visualisation du mode d'action se fait au travers du display. Ce mode de pilotage requiert de bonnes capacités motrices et d'apprentissage [N. Biard, 2008]. L'avantage du joystick est de permettre de piloter un fauteuil, il n'est donc pas forcément limité au simple usage du bras robotique. Le Joystick du bras MANUS peut être piloté à la main ou au menton et fonctionne avec des menus. On choisit un menu jusqu'à accéder à la commande. L'arborescence de ce menu est de 3 niveaux, il nécessite donc 3 actions de dispositifs pour réaliser une action sur le bras MANUS. Il est fourni avec un Display muni de 4 LED pour se retrouver dans le menu et nécessite de retenir l'ensemble de l'arborescence pour être utilisé.



**Figure 38 : Les 3 outils de commande du bras MANUS, le clavier, le joystick et le display [N. Biard 2008]**

L'étude de [G.W. Romer et al. 2004] effectuées avec le bras MANUS montre que 80% des utilisateurs préfèrent piloter le bras avec le joystick contre seulement 20% le pilote avec le clavier. L'avantage du clavier est qu'il permet le contrôle du bras MANUS à des personnes n'ayant pas les capacités motrices pour utiliser le joystick. Enfin, il est estimé qu'un

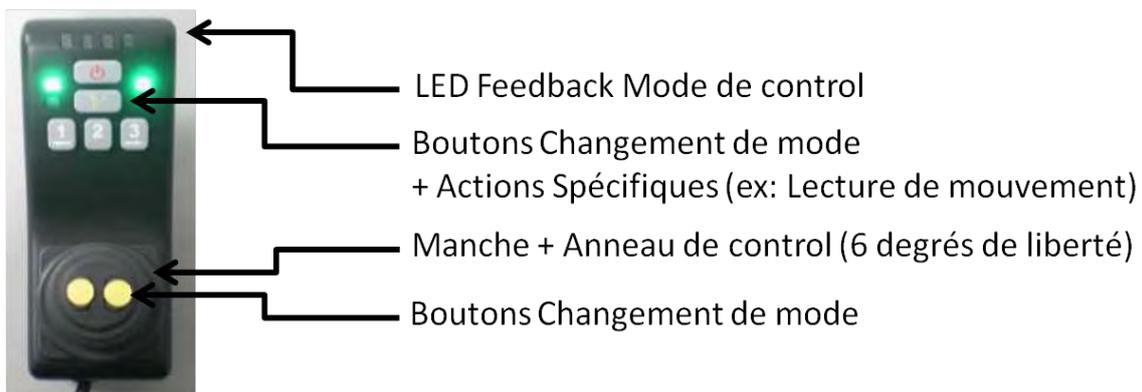
apprentissage de 8 semaines est nécessaire pour une utilisation correcte de ce bras et pour l'apprentissage du mode de fonctionnement des commandes physique [B.J.F Driessen et al. 2001].

Dans le cadre du projet ANSO [P. Coignard et al. 2013], des études ont été conduites sur le bras MANUS embarqué sur un robot mobile muni d'une caméra. L'utilisation du robot se fait au travers d'une interface graphique à partir de laquelle les utilisateurs vont demander au robot de réaliser des tâches de préhension. Le pointage sur l'interface se fait au travers de leur dispositif usuel utilisé pour interagir avec un ordinateur. Ce système a été évalué en réalisant trois types de tâches. La première consiste à saisir un objet dans la même salle que la personne, à hauteur du champ de vision du robot. Dans la deuxième l'utilisateur demande d'aller chercher un objet dans un lieu hors de la vision de la personne mais visible par la caméra du robot. La dernière s'articule autour d'un scénario qui consiste à aller chercher un objet dans une autre pièce, et un objet hors du champ de vision de la caméra. L'étude a été effectuée auprès de 29 personnes tétraplégiques d'un âge moyen de 37,83 ans ainsi que de 34 personnes pour une population valide. Les participants ont utilisé de un à deux dispositifs pour réaliser deux actions. La première action est le déplacement sur l'interface, il a été utilisé la souris pour la population valide ainsi que pour 17% (5 personnes) des personnes tétraplégiques. Les autres dispositifs sont un trackball (12 personnes), un track IR (5 personnes), ainsi que un trackpad, une webcam avec l'application easymouse, un couple trackball et stylet, un joystick, et un pavé numérique. La deuxième action est la validation d'un bouton de l'interface. Il a été utilisé comme dispositifs pour les personnes en situation de handicap, le trackball (12 participants), le contacteur (5 participants), le contacteur à souffle (3 participants), l'AutoClick, l'EasyMouse, la combinaison trackball et stylet et, le trackpad. Cette étude montre l'utilité de l'interface graphique pour la saisie automatisée d'objets. Les caméras facilitent la saisie d'objets en les affichant sur l'interface graphique. Quelques limites dues au champ de la vision des caméras ont été rapportées, par exemple un obstacle peut empêcher de voir l'objet souhaité. D'un point de vue social, le robot est mieux accepté par les personnes en situation de handicap que par les personnes valides. On retient de cette étude l'intérêt pour une bonne interface graphique ainsi que l'avantage qu'apporte le contrôle automatique des déplacements du bras robotique pour la préhension des objets sélectionnés par les personnes en situation de handicap.

**Dans le cas du bras JACO**, celui-ci est fourni de base avec un joystick. Le joystick du JACO a été inspiré de ceux des fauteuils électriques. Les inconvénients du joystick que nous ont rapportés les ergothérapeutes de centres de rééducation sur le terrain sont :

- d'une part les boutons sont trop éloignés (Figure 39), les boutons en haut sont surélevés et nécessitent de lever le poignet de la personne, les boutons sur le manche ne sont pas forcément accessibles et peuvent nécessiter de lâcher le manche.
- d'autre part, le manche dispose d'une bague rotative pour déplacer le bras dans l'espace, cette rotation du poignet peut être une contrainte limitant l'usage du joystick.

Ces deux contraintes empêchent la personne ayant un handicap sévère au niveau des membres supérieurs d'utiliser le dispositif vendu avec le bras robot JACO.



**Figure 39 : Joystick du bras JACO**

Le bras JACO propose aussi la commande via une interface HMC (« Easy Rider ») qui est connectable au travers de son interface universelle Kinova. Le « Easy Rider » (Figure 40) est un système de contrôle intégré qui permet à son utilisateur de se déplacer avec son fauteuil roulant motorisé, tout en lui permettant de gérer un certain nombre d'appareils externes au fauteuil, comme le bras JACO.



Figure 40 : Easy Rider HMC emprunté sur <http://www.hmc-nv.be/>

L'Easy Rider peut être installé sur une grande majorité de fauteuils roulants motorisés. Son installation est très facile par le fait que les modules et câblages du fauteuil sont utilisés. Les possibilités en tant que gestion de l'environnement sont assez étendues et relativement simples à comprendre. Les menus sous forme d'arborescences et les icônes permettent à l'utilisateur de faire un choix de fonctions facilement. L'Easy Rider peut être configuré suivant les besoins de l'utilisateur. A partir du fauteuil de la personne, l'application Easy Mouse USB est un émulateur de souris piloté par des codes infra rouges, générés par un émetteur. Elle est utilisée en combinaison avec l'Easy Rider et de la commande qui y est associée. Si l'on sélectionne l'icône représentant la souris, la commande de contrôle qui équipe alors le fauteuil roulant devient la souris. Ainsi, par exemple, pour quelqu'un conduisant à l'aide d'une « conduite menton » cette dernière deviendra la souris de l'ordinateur ce qui rend l'Easy Rider compatible avec des interfaces graphiques virtuelles.

De plus, 5 études de la littérature proposent de nouveaux modes et dispositifs d'interaction pour permettre un plus grand accès aux bras robotique.

Dans la première étude, H. Jiang et al. (2013) ont proposé avec une méthode centrée utilisateur de créer un joystick 3D qui consiste en un joystick physique avec 3 axes. Celui-ci a amélioré la manipulation du bras JACO pour atteindre différents objets, par rapport au

joystick classique ou à l'usage d'un clavier. Ce joystick a permis un gain en termes de temps et de précision. Ces résultats proviennent d'une évaluation. Il a été demandé à 5 personnes en situation de handicap âgées de 25 à 42 ans de réaliser un exercice de Fitts avec 2 cibles de tailles différentes (2,28 x 2,28 cm, 8.0 x 8.0 cm) et 2 distances 40 cm et 70 cm. Il a été demandé de l'effectuer avec 3 modes de claviers, avec le joystick classique et le joystick 3D. Les modes de claviers correspondent pour le premier mode à un maintien du bouton pour activer le mouvement du bras, celui-ci s'arrêtant lorsqu'on relâche le bouton, un deuxième mode pour l'utilisation d'un bouton qui lance l'action, et l'utilisation d'un deuxième bouton pour stopper le mouvement. Le dernier mode est un mode hybride qui permet de choisir le mode que veut la personne, et elle peut à tout moment changer ce mode. Dans le cas du joystick 3D, il a permis une réalisation en moins de 200 secondes avec un taux de réussite des exercices de 94.5%, suivie du joystick classique avec 250 secondes et un taux de réussite des exercices de 91.9%. Le temps de réalisation est de 350 secondes pour le clavier tout mode compris, avec un taux de réussite des exercices de 88.6%.

Dans la deuxième étude, D. Bassily et al. (2014) ont proposé une solution à base d'une LeapMotion Control, ou à partir d'une Kinect [H. Jiang et al. 2013], permettant de contrôler le bras à partir de la reconnaissance du mouvement des mains. H. Jiang et al. (2013) proposent l'ajout d'une deuxième Kinect pour identifier différents objets de l'environnement. Une gestion du mouvement automatique du bras est mise en place pour attraper les objets désigné au moyen du geste identifié par la première Kinect. L'objectif de H. Jiang et al. (2013) est de comparer un mode gestuel simple versus le mode gestuel couplé avec la reconnaissance d'objet. L'étude démontre que ce dernier mode aide à améliorer le temps de réalisation des tâches. Ces résultats sont issus de l'expérimentation effectuée par 2 personnes tétraplégiques à qui il a été demandé de réaliser 5 tâches : attraper un mouchoir, une boisson, un rasoir, un bol et un téléphone. Pour l'ensemble des tâches le mode couplé a été le plus performant en terme de temps ; dans l'ensemble ce mode a nécessité 176.9 secondes contre 287.4 secondes avec les commandes classiques.

Dans la troisième étude, I. Laffont et al. (2009) porte sur l'interface graphique de visualisation pour désigner des objets de l'environnement pour le contrôle du bras pour des personnes en situation de handicap. Ici le contrôle du bras se fait de façon indirecte. Cette

dernière nécessite l'installation d'une caméra sur le bras et permet sur un écran de choisir les objets à attraper. Un des avantages est l'automatisation de plusieurs étapes pour la réalisation d'une tâche du bras robotique. Nous avons pu le voir dans d'autres études comme pour le projet ANSO [P. Coignard et al. 2013].

L'expérimentation s'est déroulée sur 44 participants :

- Une population de contrôle de 24 personnes valides, avec une moyenne d'âge de 33 ans, allant de 19 à 55 ans.
- Une deuxième population de personnes en situation de handicap avec une moyenne d'âge de 44 ans allant de 26 à 67 ans avec 5 personnes présentant une myopathie, 13 une tétraplégie et 2 un syndrome de Guillain-Barré. L'étude se concentre sur le succès de la réalisation des tâches, avec 88.7% de réussite pour les personnes contrôle et 81.1% pour les personnes en situation de handicap. Les tâches demandées sont d'attraper différents objets de l'environnement : une bouteille à droite, au sol, sur une table, une canette de soda et un poivrier. Le questionnaire de satisfaction révèle que la solution proposée est satisfaisante, facile et pas ou peu fatigante.

La quatrième étude concerne le contrôle du bras robotique avec l'utilisation des BCI (Brain Computer Interface) [L. Bougrain et al. 2012]. Cette méthode est basée sur l'analyse de signaux cérébraux de la personne afin de reconnaître la commande qui sera envoyée au bras robotique. Toutefois, les BCI se heurtent à des difficultés, principalement, de classification de ces signaux puis de traduction de ces signaux en commandes. Une des difficultés se situe aussi dans l'apprentissage de la personne à se concentrer afin de faire varier les bons signaux. Une des autres limites précisées dans le papier, est que l'interface API (Application Program Interface) a une latence entre l'application openVIBE du BCI et l'application de contrôle du bras JACO.

La dernière étude concerne le contrôle d'un bras robotique avec l'utilisation de la modalité vocale avec des mots clés. J. Malkin et al. (2007) montrent dans une simulation que l'utilisation d'un « joystick vocal » est bien adaptée pour commander un bras robotique en 2 dimensions. La contrainte du vocal est de bien définir les commandes pour le pilotage d'un

bras robotique. Toutefois, les performances de l'interaction vocale en situation écologique peuvent se heurter au bruit ambiant. De plus, des troubles d'élocution (production vocale peu intelligible) des personnes en situation de handicap moteur peuvent dégrader le taux de bonnes reconnaissances des commandes vocales.

**Tableau 3 : Synthèse des commandes de bras robotique**

Mode de commande (dispositif ou modalité)	Avantages	Inconvénients
<b>Joystick</b>	Même dispositif que la conduite d'un fauteuil électrique	Mémorisation des commandes. Capacité motrice suffisante au vu de la taille des joysticks
<b>Clavier</b>	Permet d'accéder à un large panel de commandes pour le bras robotique	Nombres de boutons conséquents donc mémorisation difficile
<b>Dispositifs de pointage usuels</b>	Conserver les acquis de l'apprentissage d'utilisation du dispositif	Dépend de l'utilisabilité de l'interface
<b>Interaction gestuelle</b>	Utilisation des mouvements résiduels d'une personne	Nécessite l'apprentissage de différents patterns dans les mouvements Détection de mouvements involontaires
<b>Interaction vocale</b>	Naturel, permet de contrôler un bras robotique sans aucun contrôle moteur des membres supérieurs	Environnement bruyé Trouble de parole Apprentissage du langage
<b>BCI</b>	Permet de contrôler le bras par les signaux neuronaux	Bruitage des signaux neuronaux Etape d'apprentissage Concentration dans la production des signaux

Ces différents travaux montrent les diverses possibilités de modalités de commandes du bras JACO ou du bras MANUS (Tableau 3). Le but reste tout de même de permettre à la personne de pouvoir réaliser l'action elle-même et si elle le souhaite d'utiliser un auxiliaire

de vie pour gagner du temps. L'apprentissage du couple « interface/dispositif de commande » pour l'utilisation d'un bras robotique est complexe (exemple bras MANUS [B.J.F Driessen et al. 2001]). A partir de là, nous formulons l'hypothèse suivante : si on propose une interface virtuelle de contrôle du bras robotique à un utilisateur et que celui-ci utilise son dispositif de contrôle d'ordinateur, qui lui est déjà adapté et dont il a déjà toutes les connaissances pour l'utiliser, l'apprentissage et l'usage du bras JACO pourraient être simplifiés, puisque celui-ci se concentrera sur l'interface de commande virtuelle. Nous allons mettre en œuvre une méthode de conception d'interface centrée utilisateur, pour essayer de répondre, au maximum, aux différents besoins pour le contrôle d'un bras robotique de préhension pour le rendre plus accessible à un panel important de personnes en situation de handicap.

### 2.3. Vers une plus grande accessibilité du bras JACO

L'utilisation du dispositif d'interaction habituelle de la personne directement connectée à l'ordinateur, ou au travers d'un Easy Rider, sur une interface virtuelle, va augmenter le nombre de dispositifs pouvant contrôler le bras JACO (Figure 41).



Figure 41 : La brique qu'ajoute l'interface virtuelle

L'objectif de la section suivante est de décrire les méthodes de conception et d'évaluation des interfaces de commande du bras JACO. Comme rapporté par l'étude d'I. Laffont et al. (2009), nous garderons à l'esprit dans notre processus de conception que la complexité de la

commande et la maîtrise de l'utilisation du bras JACO requièrent un apprentissage gradué et séquentiel exigeant. Il sera nécessaire que le dispositif des personnes et l'utilisation des interfaces virtuelles permettent l'accès à l'ensemble des commandes de contrôle du bras JACO. Les interfaces devront aussi être les plus compréhensibles possibles.

### 3. Méthodologie de conception des interfaces

Dans le cadre du projet JACO, nous avons privilégié la conception d'interfaces qui fonctionnent avec un pointage : l'utilisation de n'importe quels dispositifs, pouvant déplacer un curseur à l'écran. Ces dispositifs de commande peuvent influencer également l'acceptabilité sociale et le degré de fatigue engendrée dans l'utilisation de l'interface de commande.

Pour pallier ces problèmes, nous avons utilisé une conception centrée utilisateur présentée dans le chapitre 1 (La méthode de conception centrée utilisateur). En premier nous avons organisé un brainstorming pour générer des idées et réaliser les maquettes et ensuite ces dernières ont été présentées lors d'un Focus Group afin d'être améliorées selon les besoins des personnes exprimés lors du focus group pour l'accès au bras robotique.

#### 3.1. Brainstorming

Ce brainstorming a pour objectif de proposer des interfaces pouvant utiliser les différentes commandes du bras Jaco. Ces commandes sont les déplacements du bras (Cartésien sur 6 axes de liberté, Angulaire sur 6 axes du bras), le contrôle des doigts (fonctionnement par trois, deux ou un), la fonction accueil (permet le déploiement du bras ou son rangement) et les fonctionnalités d'enregistrement et de lecture d'une position.

Nous avons 5 personnes valides et 3 personnes en situation de handicap moteur des membres supérieurs qui ont participé à ce brainstorming. L'ensemble des participants sont experts en informatique. Nous avons conçu un premier prototype fonctionnel (Figure 42) afin d'expliquer le fonctionnement du bras et de ce qui était attendu du brainstorming. Nous avons choisi deux types d'interfaces : Clavier virtuel et Pie-Menu que nous allons justifier ci-après.

La Figure 43 représente une variante de l'interface « Clavier virtuel » (Figure 42) que nous avons conçue. Seuls les labels associés aux « touches » sont matérialisés par des images. Les

flèches rouges dans les images représentent la direction de déplacement du bras ou de la main. Elles ont été définies pour faciliter la compréhension des commandes. La Figure 44 représente l'ensemble des commandes sur trois onglets (mouvement cartésien, mouvement angulaire et enregistrement/lecture) des Figure 42 et Figure 43. Un jeu de couleurs permet d'identifier les commandes des trois modes et celles des doigts (partie Rouge).



Figure 42 : Premier prototype clavier virtuel avec des labels

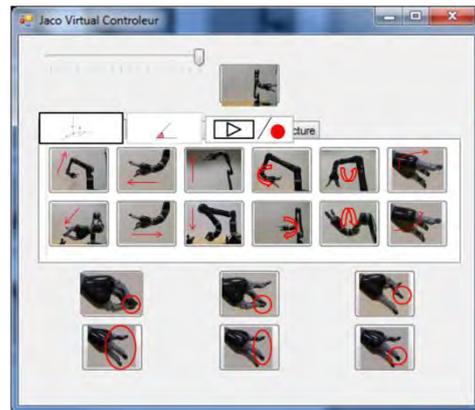


Figure 43 : Maquette clavier virtuel avec des images

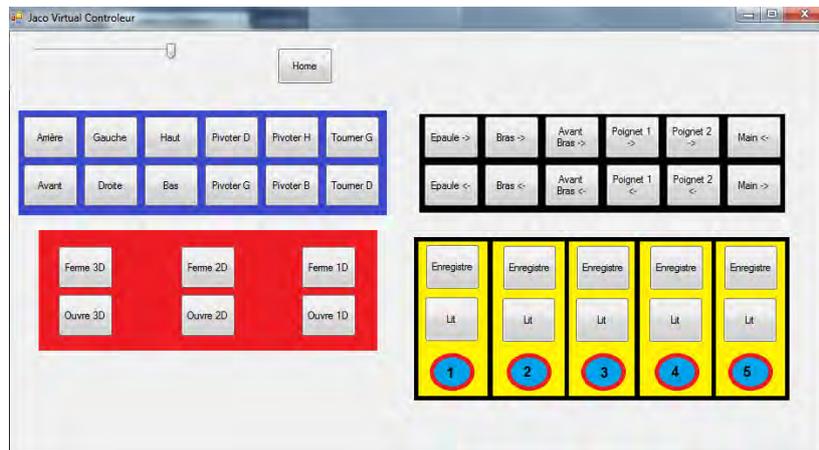


Figure 44 : Maquette clavier virtuel en pavé de couleur selon les modes

Au cours de ce brainstorming, nous avons eu l'idée d'utiliser un Pie-Menu. L'intérêt du Pie Menu est la diminution des déplacements du curseur [G. Fitzmaurice et al. 2008] et du nombre d'informations affichées en même temps. Dans une interface de type Pie Menu,

l'utilisateur a deux façons d'activer une commande : soit par un bouton de la partie centrale du Pie Menu (Figure 45), soit par un bouton de la partie Extension (Figure 46).

La Figure 45 représente un Pie Menu à deux niveaux : le passage du niveau 1 au niveau 2 se fait par un clic du dispositif de pointage sur une des zones du Pie Menu. La sélection d'une commande du niveau 2 se fait sur le même principe.

La Figure 46 représente un Pie-Menu par extension : le passage du Pie-Menu central vers l'affichage de l'extension se fait par un simple déplacement (Goal Crossing [J. Accot et S. Zhai 1997 et 2002]) du dispositif de pointage sur la zone du Pie-Menu qui affiche l'extension correspondante. La sélection d'une commande sur l'extension se fait par un clic du dispositif de pointage. Nous voyons ici que deux techniques d'interaction seront utilisées dans le Pie-Menu par extension (Goal Crossing + pointage).

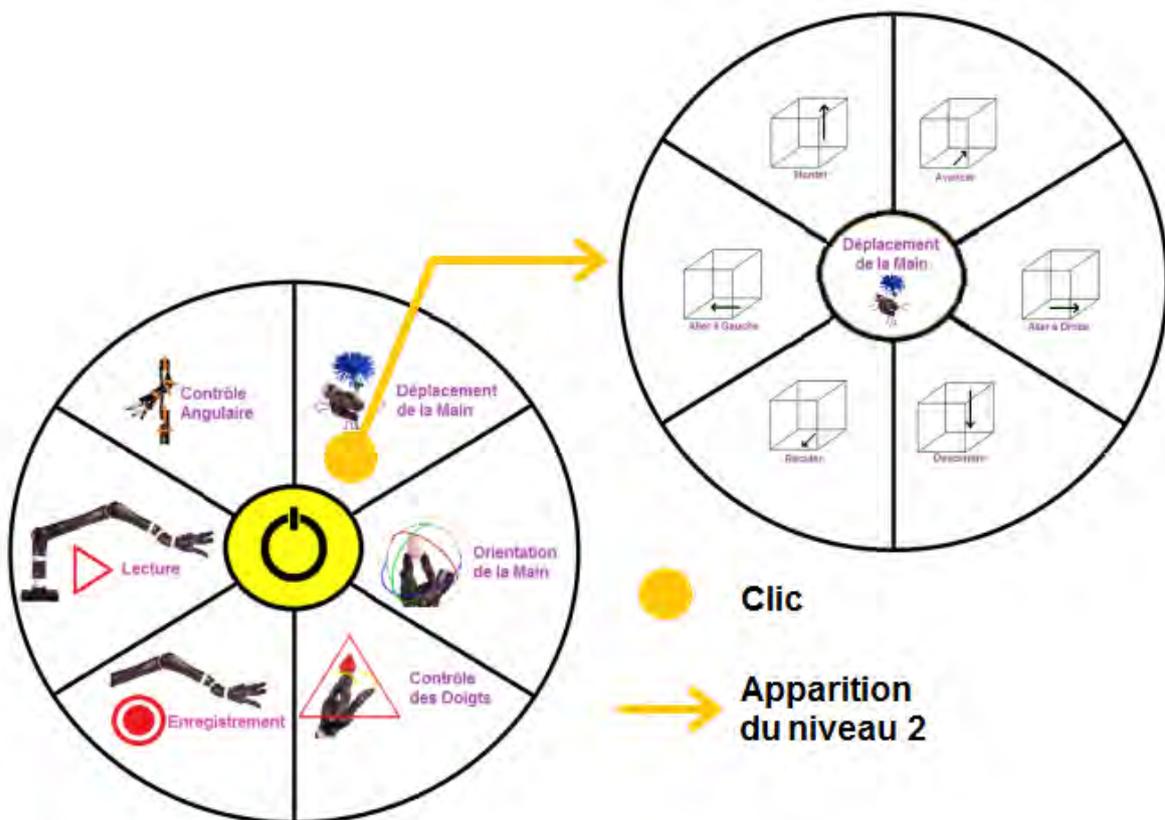


Figure 45 : Pie Menu à 2 niveaux

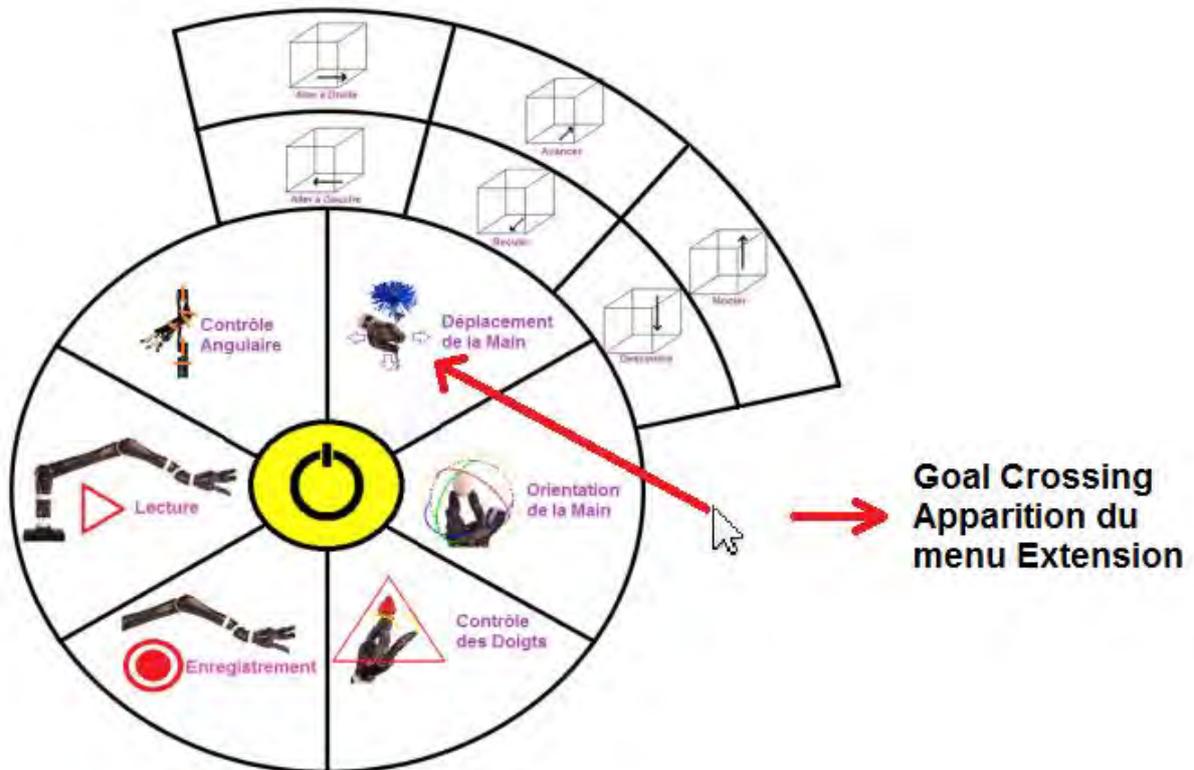


Figure 46 : Pie Menu avec extension

Ces 5 maquettes ont été ensuite présentées aux personnes qui ont participé au Focus Group afin d'affiner les besoins et l'affordance des interfaces.

### 3.2. Focus Group

Notre objectif pour ce Focus Group a été de recueillir des avis des deux groupes (professionnels et aidants, et personnes en situation de handicap) sur les différentes maquettes, les questions que cela soulève, les améliorations ou pistes souhaitées en termes d'interface (intuitivité, ergonomie, représentation, techniques d'interaction, retour visuel, etc.).

Ce Focus Group s'est effectué en deux groupes distincts :

Groupe 1 : 5 professionnels de la réadaptation (4 ergothérapeutes et un médecin de médecine physique et réadaptation) ;

Groupe 2 : 4 personnes en situation de handicap et 3 aidants ;

Avec l'équipe de l'IRIT : 3 participants qui animaient la séance, avec une présentation du fonctionnement du bras robotique JACO, ainsi que des maquettes d'interfaces produites lors du brainstorming. A la suite de ces derniers pour recueillir les informations nous avons discuté avec les participants et enregistré leurs réponses en version manuscrite et par vidéo. De plus, à la fin du Focus Group, un questionnaire a été rempli par chacun des participants [Annexe 1 : Questionnaire JACO].

Les deux populations nous ont donné leurs avis que nous avons synthétisés dans deux tableaux (Tableau 4 et Tableau 5).

**Tableau 4 : Avis des personnes en situation de handicap**

Participants atteints de paraplégie	Avantages	Inconvénients
Interface basée sur les labels		Trop d'informations. Non structurée pour la technique du balayage.
Interface basée sur les icônes	Bonne affordance des icônes pour représenter les modes d'ouverture et fermeture des doigts.	Les autres icônes ne sont pas métaphoriques des autres commandes.
Interface avec labels et blocs de couleurs	Choix facile du mode de commande. Mode de balayage possible.	Labels trop petits; Trop d'informations au premier niveau -> Les commandes du mode angulaire sont à supprimer.
Pie Menu à 2 niveaux	Réduction du déplacement du curseur.	Besoin d'apprentissage des éléments de chaque niveau du Pie Menu. Les représentations des commandes en forme de cube sont trop géométriques. Trop de sélection pour atteindre l'élément souhaité.
Pie Menu par extension	Augmenter l'affinage des niveaux du Pie Menu.	Plus de déplacements que le Pie Menu à 2 niveaux.

**Tableau 5 : Avis des thérapeutes**

Thérapeutes	Avantages	Inconvénients
Interface basée sur les labels	Possibilité d'utilisation avec la technique d'interaction balayage.	Trop d'informations. Représentation visuelle pauvre → suggestion d'utilisation d'une couleur pour différencier les segments du bras.
Interface basée sur les icônes	Haute affordance des icônes pour représenter les modes d'ouverture et de fermeture des doigts.	En dehors des icônes des doigts, les autres ne sont pas métaphoriques. Ils ne représentent pas bien le mouvement du bras.
Interface avec labels et blocs de couleurs	Bon panel de couleurs Représentation des commandes au même niveau.	Commandes du mode angulaire en raison de sa complexité -> à supprimer ; Manque la fonction "Boire » à jouter.
Pie Menu à 2 niveaux	Bonne représentation visuelle.	Compréhension difficile des icônes cubiques.
Pie Menu par extension	Accessibilité facilitée au contenu du deuxième niveau.	

### 3.3. Résultats et discussions du focus group

Nous nous attendions à ce que l'interface avec le texte et les blocs de couleurs (Figure 44) soit préférée à l'interface basée seulement avec du texte (Figure 42) et celle avec les icônes (Figure 43). Cette dernière n'est bien, en termes de compréhension, que pour la commande avec les doigts. Certains membres du Focus Group ont fait observer que ces trois interfaces pouvaient accueillir la technique du balayage. Tous les participants paraplégiques apprécient le concept de Pie-Menu. La plupart d'entre eux ont une forte préférence pour le Pie-Menu par extension parce que celui-ci propose l'affichage des deux niveaux en même temps. Les thérapeutes sont en accord avec les participants paraplégiques. Cet affichage va dans le sens de la recommandation d'I. Laffont et al. (2009) d'avoir une interface plus simple à la mémorisation, puisqu'il n'y a pas besoin de retenir le contenu du menu principal, il sera permanent, et il sera possible d'afficher rapidement les différents sous-menus pour une recherche plus rapide des commandes.

Pour pallier les limitations des représentations iconographiques et pour des raisons de droit d'auteur, nous avons réalisé une itération supplémentaire avec les ergothérapeutes, ce qui nous a permis d'obtenir les interfaces Clavier virtuel (Figure 47) et Pie-Menu (Figure 48), qui sont les productions de cette nouvelle itération.

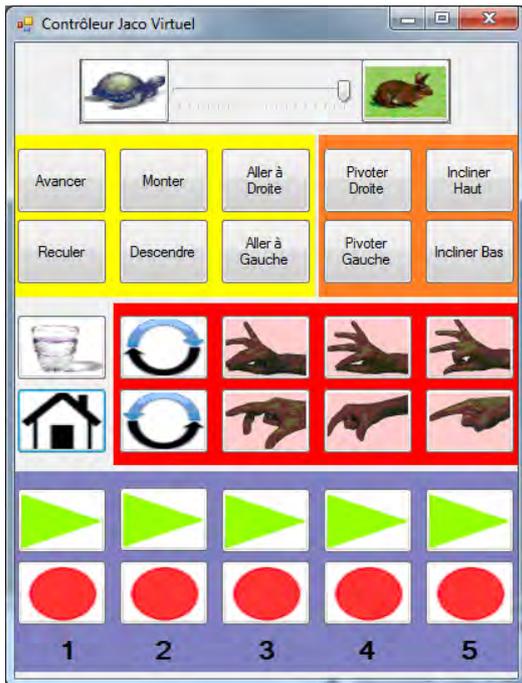


Figure 47 : Représentation visuelle du clavier virtuel après plusieurs cycles itératifs avec l'équipe des ergothérapeutes Version 2.0

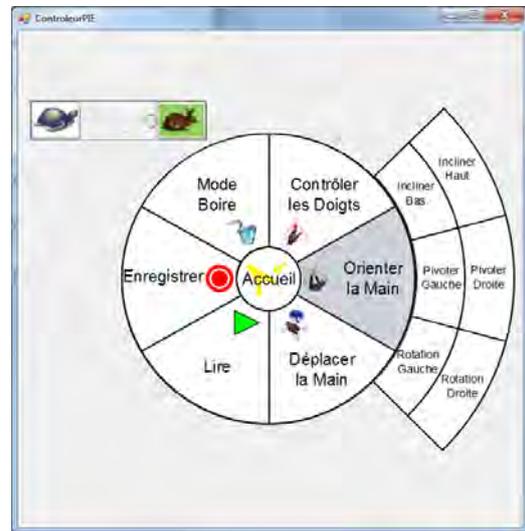


Figure 48 : Représentation visuelle du Pie Menu après plusieurs cycles itératifs avec l'équipe des ergothérapeutes, Version 2.0

Le constat que nous pouvons pu faire de ces interfaces est que l'organisation spatiale d'une interface graphique et les tailles des boutons d'interaction influencent les temps de recherche [Hick-Hyman (7)] et les temps de sélection d'une action [I.S. Mackenzie 1992, Loi de Fitts (11)]. Pour diminuer le nombre de paramètre à analyser, nous avons homogénéisé (voir Annexe 2 : Normalisation de la taille des touches) la taille des différentes formes de boutons d'interactions (Figure 49).

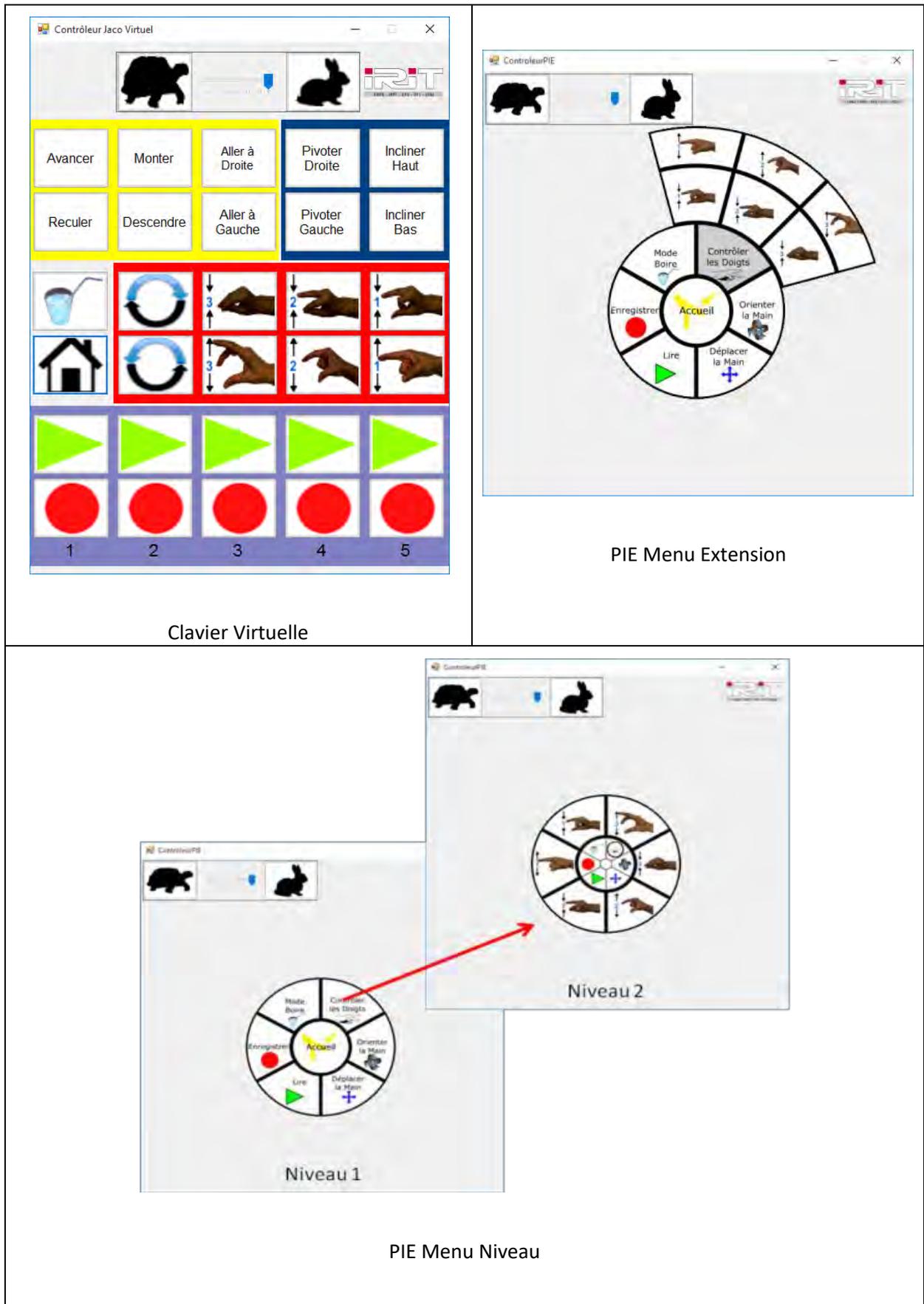


Figure 49 : Les interfaces Virtuelles pour le bras JACO

Ces interfaces vont être mises en situation afin de vérifier si ces solutions répondent aux besoins des personnes en situation de handicap, de même que pour analyser le comportement des utilisateurs en fonctions de leurs profils.

#### **4. Protocole d'évaluation d'interface**

L'utilisation des dispositifs d'entrée peut avoir une grande influence sur l'utilité et l'utilisabilité (efficacité, maniabilité, degré de satisfaction de l'utilisateur, prévention des erreurs d'interactions) du système de commande. Ces critères définissent l'acceptabilité sociale au sens de [Nielsen, 1993]. Ces différences de performance dépendent également des phases d'apprentissage de maniabilité du dispositif en liaison avec les capacités motrices et les facultés d'apprentissage de la personne.

Dans le domaine de l'interaction homme-machine, des études d'évaluation de performance d'utilisation des dispositifs sont courantes. Elles reposent essentiellement sur l'utilisation d'un système expert [A. Jurine 1989], de questionnaires de fatigue ou de mesures de performances élaborés à partir de la norme ISO [Norme ISO 9241-9 08/2000], et de mesures basées sur l'utilisation de la loi de Fitts [P.M. Fitts 1954] dans le cadre de tâches d'atteintes de cibles.

Notre objectif pour le protocole est de vérifier si le temps de réalisation d'une tâche, et le nombre d'actions pour la réaliser, vont permettre de différencier les interfaces, pour permettre d'identifier la plus performante. De plus pour déduire la complexité d'une interface, nous utiliserons des profils de comportement d'interaction des utilisateurs pour réaliser des tâches simples et essayer de les confronter aux valeurs obtenues sur l'utilisation des interfaces JACO.

Pour répondre à notre objectif, nous avons effectué deux études de cas. Nous présenterons deux participants avec des pathologies et des dispositifs d'interaction différents. Ils seront traités indépendamment sans croiser leurs données. Dans une première partie nous définirons le profil utilisateur de nos participants à partir des exercices de la plateforme MPH vu dans le chapitre 1. Nous poursuivrons avec une première étude des interfaces, par un protocole expérimental avec des exercices écologiques pour évaluer nos interfaces JACO.

Nous vérifierons, ensuite, l'interface qui répond le mieux aux besoins des participants en fonction des résultats obtenus. Une seconde étude va nous permettre de compléter les données pour approfondir les résultats de la première étude. Pour finir, les données récoltées seront croisées avec les profils d'interaction des participants obtenus avec MPH.

#### 4.1. Les participants à l'étude

Deux personnes en situation de handicap ont participé à notre protocole expérimental.

La première est une personne myopathe (amyotrophie spinale, participant 4-01), qui utilise quotidiennement l'ordinateur avec un trackball (Figure 51). Cette personne est en fauteuil, ce dernier est piloté avec un joystick. Le trackball est utilisé par la main gauche pour des tâches informatiques alors que le fauteuil est piloté par la main droite.

La deuxième est une personne souffrant d'une paralysie cérébrale (participant 4-02) qui utilise un clavier physique avec un guide doigt (Figure 50). Il s'agit d'un expert informatique qui développe des solutions d'accès à l'écriture sur des ordinateurs.

Nous ne pouvons pas donner d'informations sur les capacités fonctionnelles en l'absence d'un médecin investigateur. La valeur de sensibilité des dispositifs pour les deux personnes est à une valeur de 12/20 sous le système d'exploitation de Windows 7.



**Figure 50 : Dispositifs Clavier avec guide doigts du participant 2**



**Figure 51 : Dispositifs Trackball du participant 1**

## 4.2. Design d'expérimentation pour la technique de pointage et de Goal Crossing

### 4.2.a. Apparatus

L'objectif est de définir le profil d'interaction de la personne en situation de handicap en analysant avec la plateforme MPH les atteintes de cibles 2D qu'elle aura effectuées avec son dispositif usuel. La valeur de la calibration du dispositif définie dans cette première partie du protocole sera reportée pour la comparaison des interfaces virtuelles. A des fins de comparaison de notre étude, nous avons repris les mêmes conditions d'atteinte de cibles que celles de [Wobbrock 2008], à savoir : (page 90, Tableau 2)

- Une phase d'apprentissage : soit 3 séries  $(A, W) = (128, 128)$ ;  $(A, W) = (256, 96)$ ;  $(A, W) = (384, 32)$  de 8 cibles réalisées deux fois consécutivement. Les couples  $(A, W)$  seront tirés aléatoirement.
- Une phase de test : soit 15 séries (5 tailles de cibles  $(W)$  : 16, 32, 64, 96 et 128 ; 3 distances  $(A)$  : 128, 256 et 384) de 8 cibles réalisées cinq fois consécutivement. Les couples  $(A, W)$  sont également tirés aléatoirement.

Le participant a à cliquer ou atteindre, en fonction de la technique d'interaction, successivement la cible périphérique correspondant au tirage aléatoire. Après chaque validation de la cible, le curseur du dispositif est repositionné systématiquement au centre de l'écran.



Figure 52 : MPH Version 2.1 – Pointage

Figure 53 : MPH Version 2.1 Goal Crossing

Cette séquence de test sera réalisée deux fois avec chacune des techniques d'interaction nécessaires à l'utilisation des interfaces JACO : la sélection par pointage (Figure

52) et la sélection par « Goal Crossing » (Figure 53) également selon un tirage aléatoire. Durant l'exercice des retours visuels préviennent le participant sur l'action réalisée sur les cibles. Ces dernières changent de couleur selon leur état par rapport à la technique d'interaction (Pointage : Tableau 6 ; Goal Crossing : Tableau 7).

Tableau 6 : Les quatre états des cibles pour la technique du pointage, MPH Version 2.0

			
Etat inactif	Etat actif	Etat lors du pointage	Etat lors de la sélection

Tableau 7 : Les deux états des cibles pour la technique du Goal Crossing, MPH Version 2.0

	
Etat inactif	Etat actif

Le Tableau 2 recense les Indices de Difficulté de la phase de sensibilisation (variation de 1 à 3,7) et de la phase de test (même variation de 1 à 4,6). Le comportement d'interaction de la personne dépend de la technique d'interaction et du dispositif utilisé. Ce comportement sera caractérisé par les critères suivant :

- Le Temps de la réalisation de la tâche (MT) en critère principal qui se calcule en fonction de l'Indice de difficulté effectif (18).

$$MT = a + b * IDe \quad (18)$$

IDe, l'Indice de difficultés effectif (12) : IDe calculé à partir de la loi de Fitts [I.S. Mackenzie, 1992] préconisée dans la norme ISO 9241-9 ;

- Le TRE (Target Re Entry) en critère secondaire qui correspond aux nombres de fois que le curseur du dispositif est passé sur la cible (bouton de commande) sans l'avoir sélectionnée et ceux uniquement pour le pointage, puisque le TRE ne peut être calculé pour le Goal Crossing ;

Le matériel d'expérimentation utilisé est un écran HP vs19b avec la résolution 1280\*1024 et un ordinateur HP EliteBook 8470p, le matériel est disposé comme sur la Figure 54. Le dispositif est celui couramment utilisé par la personne.

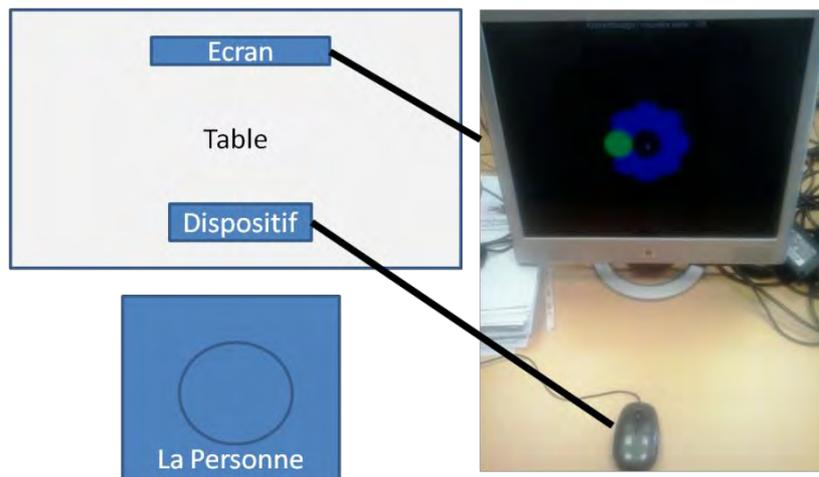


Figure 54 : Installation pour l'expérimentation MPH

#### 4.2.b. Analyse des résultats

La plateforme MPH version 2.0 a été utilisée par les deux participants en situation de handicap (Myopathie, Paralysie Cérébrale). L'expérimentation s'est déroulée en deux sessions. La première requière d'effectuer l'exercice de Goal Crossing, et la seconde le pointage pour les deux participants.

Pour le premier participant qui a une myopathie, la loi de Fitts ainsi que ses valeurs empiriques ont été calculées pour les deux exercices (respectivement Annexe 3 : Tableau de données MPH Tableau 20 et Tableau 21). Les lois de Fitts (régression linéaire) sont représentées par les Figure 55 et Figure 56. Le temps MT pour réaliser une tâche de pointage est compris dans l'intervalle allant de 0,66 à 1,64 secondes pour des indices de difficultés effectifs allant de 1,93 à 6,02. Dans le cas du Goal Crossing ces temps sont de 0,18 à 0,83 seconde pour un intervalle d'indices de difficultés effectifs de 1,88 à 6,2. Ces valeurs sont, pour le pointage, équivalentes aux valeurs des personnes valides de l'expérimentation de J.O. Wobbrock (2008) et nos valeurs sont meilleures pour le Goal Crossing. Ce résultat montre que le dispositif de trackball est bien adapté et bien calibré pour le participant 1.

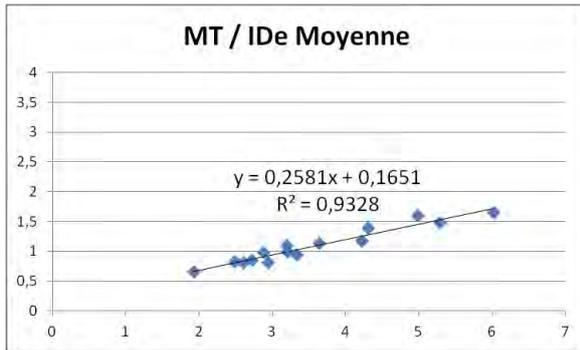


Figure 55 : Participant 1 MPH Pointage

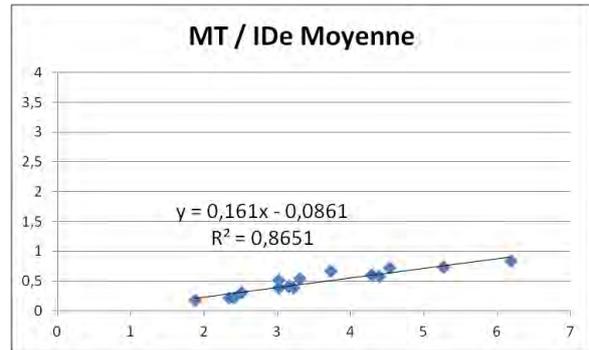
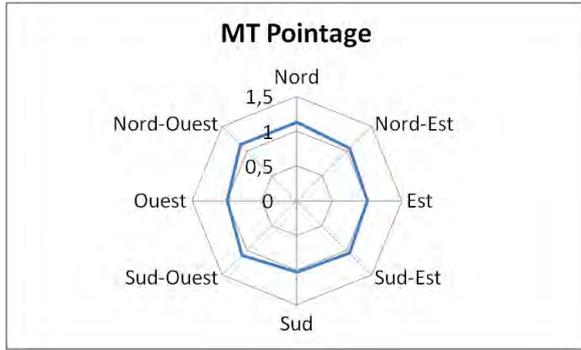
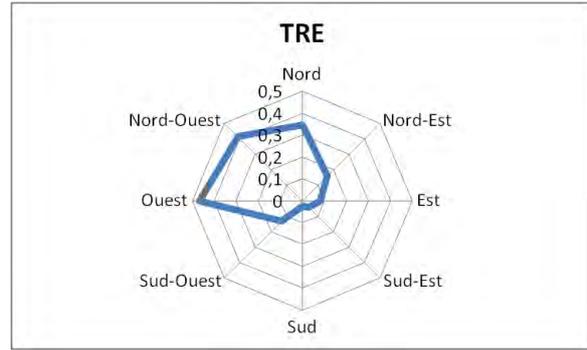


Figure 56 : Participant 1 MPH Goal Crossing

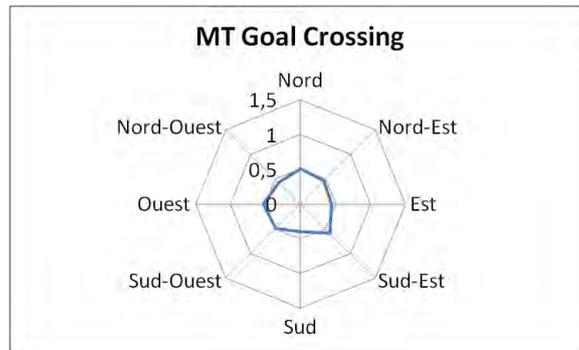
Afin d'approfondir le comportement d'interaction, nous avons analysé si le participant 1 avait une direction préférentielle. Sur les graphiques en Figure 57 et Figure 59, les valeurs pour le Pointage et le Goal Crossing sont respectivement de 1,5 secondes et de 0,5 seconde, quelques soient les directions. La variable MT ne permet pas de les discriminer. Le test statistique de Kruskal-Wallis pour le pointage (chi-squared = 4.5062, df = 7, p-value = 0.72) et pour le Goal Crossing Kruskal-Wallis (chi-squared = 12.3958, df = 7, p-value = 0.08827) avec des P-value > 0,05 exclut toutes différences significatives pour le participant 1. Toutefois sur la Figure 58, la variable TRE, du TRE moyen par direction pour chacune des actions, montre avec le test statistique Kruskal-Wallis (chi-squared = 84.3186, df = 7, p-value = 1.807e-15), une différence significative sur certaines directions. Les couples de direction suivants ont une différence significative : « Est-Ouest », « NordEst-Ouest », « NordOuest-Sud », « NordOuest-SudEst », « Ouest-Sud », « Ouest-SudEst » et « Ouest-SudOuest ». Il est donc possible de dire que sur les directions Sud, Est et Sud-Est sont celles dans lesquelles le participant 1 fait le moins de TRE au contraire des directions Nord, Ouest et Nord-Ouest où le nombre de TRE est le plus important. De plus, d'après une observation, le participant a tendance à effectuer un déplacement du curseur avec une amplitude importante qui le fait dépasser la cible ; c'est donc un déplacement plus important que nécessaire pour l'atteinte de cible. On pourrait supposer une préférence du participant pour les directions Sud-Est.



**Figure 57 : Temps moyen en fonction des directions pour le Pointage par le Participant 1**



**Figure 58 : Target Re-Entry (TRE) du participant 1 en fonction des directions pour le pointage**



**Figure 59 : Temps moyen en fonction des directions pour le Goal Crossing Participant 1**

Une dernière observation peut être faite sur l'écart-type du MT en fonction de l'IDE. Le but de cette variable est d'estimer la variabilité du participant lors de l'expérimentation en fonction de la difficulté de la tâche. Ces courbes (Figure 60 et Figure 61) même si le  $R^2$  semble faible donc non significatif statistiquement, laisse supposer une tendance d'une évolution croissante des valeurs en fonction de l'indice de difficultés effectif. Il est donc intéressant de supposer que plus la difficulté augmentera, pour l'atteinte de cible, plus l'écart-type du MT de l'atteinte de cette cible sera grande.

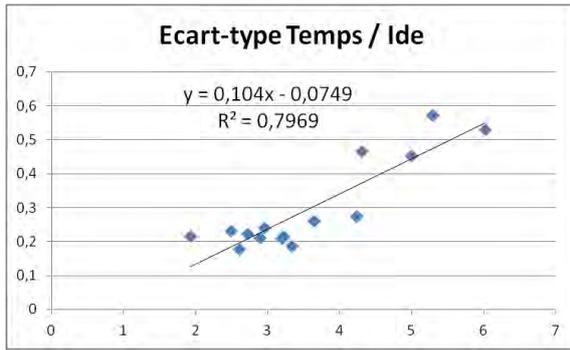


Figure 60 : Ecart-type du temps en fonction de l'IDE pour le pointage

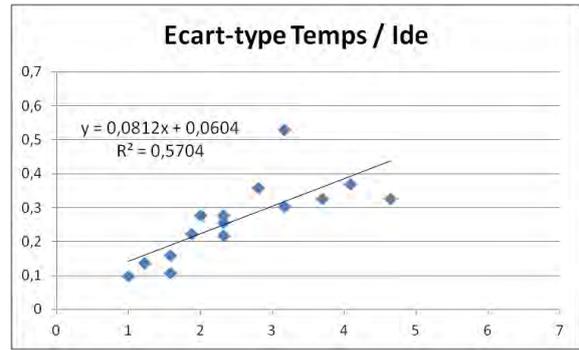


Figure 61 : Ecart-type du temps en fonction de l'IDE pour le Goal Crossing

Pour le deuxième participant qui a une paralysie cérébrale, les mêmes données ont été calculées (Annexe 2, voir le Tableau 22 et le Tableau 23).

Le temps prédit MT (18) (Figure 62 et Figure 63) pour réaliser l'atteinte de cibles est compris dans un intervalle de 4,36 à 7,17 secondes pour des indices de difficultés effectifs allant de 1,86 à 5,10. Dans le cas du Goal Crossing ces temps sont de 1,95 à 3,33 secondes pour un intervalle d'indice de difficulté effective de 2,87 à 7,89. De même que pour le participant 1, l'utilisation de ce profil permettra d'estimer la déviation entre les mouvements de tâches contrôlées versus les mouvements en situation réelle, dans notre cas l'utilisation des interfaces JACO.

Toutefois les indices  $R^2$  des régressions linéaires sont plus faibles que dans la littérature [J.O. Wobbrock, K.Z. Gajos, 2008], au vu d'observations dans le cas du Goal Crossing et du dispositif clavier : la précision ne semble plus être un critère discriminant dans le cas de ce dispositif. L'appui sur une des touches de directions permet d'atteindre, au plus précis, la cible du Goal Crossing. La courbe de régression linéaire (Figure 64) permet de voir que la courbe de tendance logarithme de la distance effective ( $De$ ) par rapport au temps de réalisation de la tâche obtient un  $R^2$  de 0,9742. La Figure 62 donne une régression linéaire de la loi de Fitts pour le participant 2 avec un  $R^2$  de 0,8018. Les  $R^2$  nous disent que la formulation  $MT = 1,0872 * \ln(De) - 3,2959$  semble être le modèle le plus significatif. Pour le Goal Crossing, la variable précision n'a plus d'impact sur cette technique d'interaction.

Pour le pointage, au contraire le dispositif ne permet pas d'atteindre une précision parfaite. Il est nécessaire de relâcher la touche du clavier quand on est sur la cible pour que le curseur s'arrête dans cette dernière.

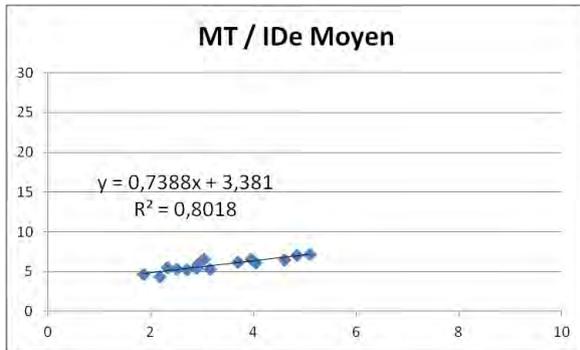


Figure 62 : Participant 2 MPH Pointage

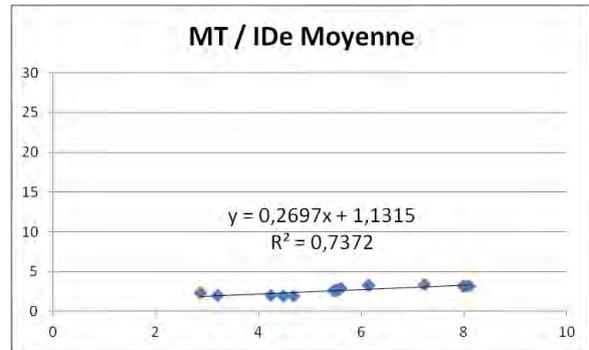


Figure 63 : Participant 2 MPH Goal Crossing

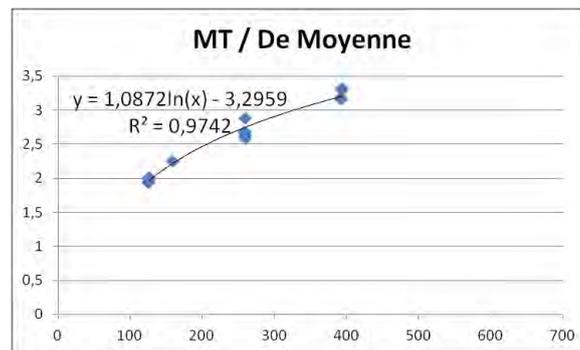


Figure 64 : Participant 2 Distance Effective par rapport au temps pour le Goal Crossing

Afin d'approfondir le profil, nous avons analysé si le participant 2 avait une direction préférentielle. Sur les graphiques, Figure 65 et Figure 67, les valeurs pour le Pointage semblent équivalentes. Le test Kruskal-Wallis (chi-squared = 15.6071, df = 7, p-value = 0.02896) est significatif, mais aucun couple de direction n'a de différence significative. Dans le cas du Goal Crossing le test Kruskal-Wallis (chi-squared = 53.8397, df = 7, p-value = 2.53e-09) est significatif. Il existe des différences significatives entre certains couples de directions : Est-NordEst, Est-NordOuest, Est-SudEst, Est-SudOuest, Nord-NordEst, Nord-SudEst, NordEst-Ouest, NordEst-Sud, NordOuest-Ouest, Ouest-SudEst, Ouest-SudOuest, Sud-SudEst. Ces différences pourraient venir des difficultés à atteindre les touches du clavier : il semble que les cibles Nord-Est et Sud-Est sont les plus faciles à atteindre, alors que les directions Est et Ouest obtiennent les moins bons résultats. Pour les directions Nord et Sud les résultats sont

moins performants que pour le Nord-Est et le Sud-Est. Ensuite pour compléter le pointage sur la Figure 66, le test de la variable TRE, Kruskal-Wallis, ( $\chi^2 = 297.2295$ ,  $df = 7$ ,  $p\text{-value} < 2.2e-16$ ) montre une différence significative sur les couples de directions : Est-Nord, Est-Nord-Ouest, Est-Ouest, Nord-NordEst, Nord-Sud, Nord-SudEst, Nord-SudOuest, NordEst-NordOuest, NordEst-Ouest, NordOuest-Sud, NordOuest-SudEst, NordOuest-SudOuest, Ouest-Sud, Ouest-SudEst, Ouest-SudOuest. Il est possible de dire que pour les directions Nord, Ouest et Nord-Ouest, le nombre de TRE est plus important que pour les autres directions. Ce participant semble aussi avoir tendance à effectuer un mouvement plus important qui le fait dépasser la cible sur ces trois directions. La distance parcourue est donc plus importante pour l'atteinte de cible. Le TRE semble donner une information sur des différences du comportement de l'utilisateur en fonction des directions, alors que le temps de réalisation du pointage n'en donne pas. Le calcul du TRE sur une interface est difficile à effectuer car nous ne connaissons pas l'intention de l'utilisateur.

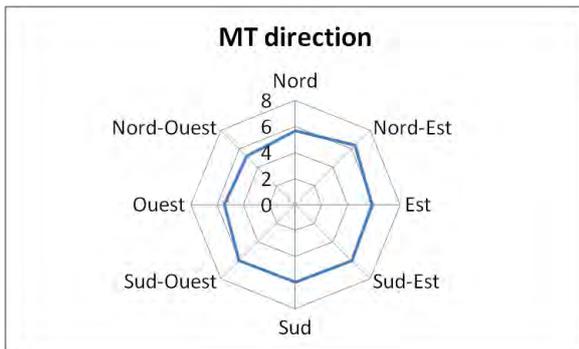


Figure 65 : Temps moyen en fonction des directions pour le Pointage par le Participant 2

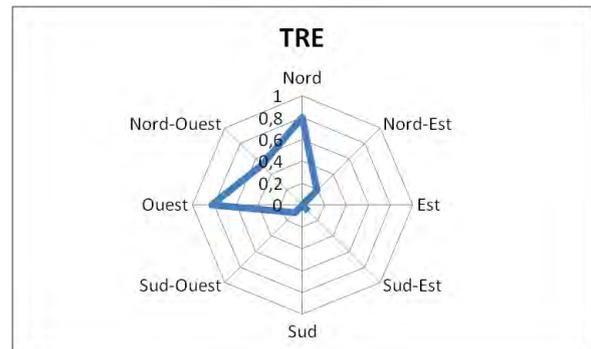


Figure 66 : Target Re-Entry (TRE) du participant 2 en fonction des directions pour le pointage

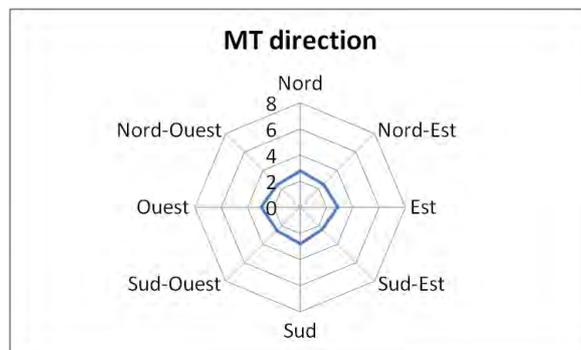


Figure 67 : Temps moyen en fonction des directions pour le Goal Crossing Participant 2

L'analyse de l'écart-type du temps en fonction de l'IDe (12) (Figure 68 et Figure 69), montre une très grande variabilité autour des courbes de tendance. Ces dernières ont des indices de corrélation très faible. Il peut être intéressant de supposer, soit que ce résultat est dû au mouvement involontaire du participant, soit à la fatigue qui modifie le temps de réponse moteur du participant 2 au cours de l'expérimentation.

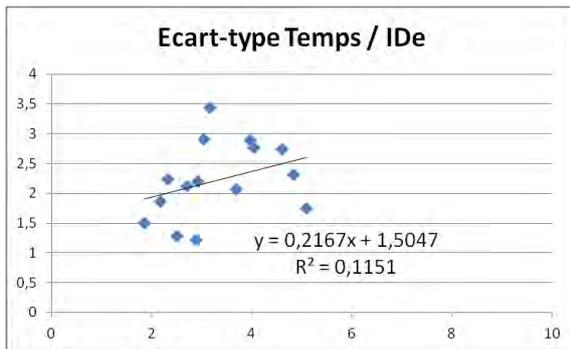


Figure 68 : Ecart-type du temps en fonction de l'IDe pour le pointage

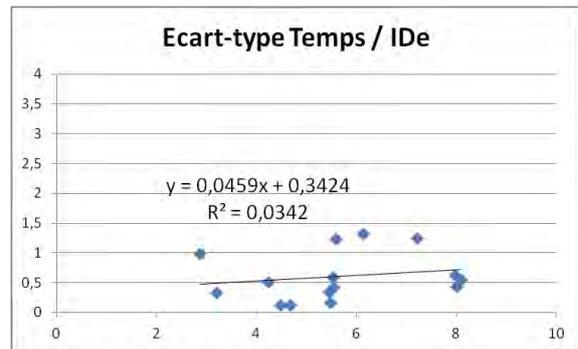


Figure 69 : Ecart-type du temps en fonction de l'IDe pour le goal crossing

Les différences les plus significatives sont trouvées pour la loi de Fitts de nos 2 participants pour le pointage. Dans le cas du Goal Crossing ces valeurs le sont moins : l'influence de la précision semble moindre puisque la distance d'arrêt sur une cible n'a plus d'effet. Toutefois ces résultats prédictifs permettront de calculer la différence avec des tâches plus complexes, pour déterminer l'effet de cette complexité sur l'atteinte de différentes cibles.

Maintenant que nous avons défini le profil d'interaction des deux participants, il est maintenant requis de les mettre en situation avec l'usage et l'analyse des résultats avec les interfaces du bras JACO.

### 4.3. Design d'expérimentation pour les interfaces JACO

#### 4.3.a. Apparatus

Il a été présenté au deux participants le joystick comme dispositif de commande du bras JACO. Leurs troubles moteurs n'en permettaient pas l'utilisation. Nous avons été confrontés à un manque de force pour la manipulation du manche et à une incapacité à effectuer une rotation de son anneau. Les boutons du manche et du joystick sont trop éloignés et

demandent un effort trop considérable pour les atteindre. En conséquence les participants ont appris la manipulation du couple (interfaces virtuelles Figure 49 et bras JACO) selon les sessions décrites dans le Tableau 8 (en bleu les sessions non faites). Le Tableau 10 décrit les tâches à réaliser dans les sessions d'apprentissage ou de tests. L'ordre des interfaces utilisées pour commander le robot lors de la phase de test est décrit dans la Tableau 9 (en bleu les exercices non faits). Ce nombre important de sessions vient du fait que les 10 exercices d'apprentissage, qui permettent d'apprendre les différentes fonctionnalités du bras, sont longs à exécuter, et il est parfois nécessaire d'arrêter pour reprendre un autre jour afin de ne pas entrainer une fatigue trop importante pour les participants. De plus ces exercices sont suffisants pour découvrir l'ensemble des fonctionnalités du bras robotique.

**Tableau 8 : Les sessions de l'expérimentation**

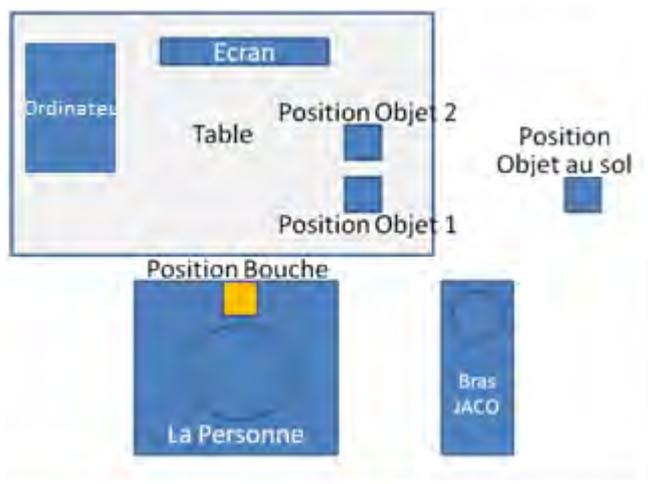
Session 1	Joystick JACO	Apprentissage 1 à 5
Session 2	Interface Clavier	Apprentissage 1 à 5
Session 3	Pie Menu Extension	Apprentissage 1 à 5
Session 4	Pie Menu Niveau	Apprentissage 1 à 5
Session 5	Joystick JACO	Apprentissage 6 à 10
Session 6	Interface Clavier	Apprentissage 6 à 10
Session 7	Pie Menu Extension	Apprentissage 6 à 10
Session 8	Pie Menu Niveau	Apprentissage 6 à 10
Session 9	Toutes interfaces	Exo 1 et 2

**Tableau 9 : L'ordre de passation des exercices lors de la session 9**

1	Joystick JACO	Exo 1
2	Pie Menu Niveau	Exo 2
3	Pie Menu Extension	Exo 1
4	Interface Clavier	Exo 2
5	Joystick JACO	Exo 2
6	Pie Menu Niveau	Exo 1
7	Pie Menu Extension	Exo 2
8	Interface Clavier	Exo 1

**Tableau 10 : Description des exercices**

Apprentissage 1	Attraper une bouteille
Apprentissage 2	Soulever et reposer un verre
Apprentissage 3	Amener une balle vers soi et la reposer
Apprentissage 4	Attraper une carte et la jouer sur la table
Apprentissage 5	Attraper une paille et la mettre dans une bouteille
Apprentissage 6	Attraper un mouchoir, se moucher avec et le jeter
Apprentissage 7	Ramasser un cube au sol et le poser sur la table
Apprentissage 8	Verser des lentilles contenues dans une bouteille dans un verre
Apprentissage 9	Attraper une cuillère et manger 2 cuillères de lentilles
Apprentissage 10	Attraper un cube sur la table, le porter vers soi et le reposer
Exercice 1	Attraper un verre qui contient une paille et porter la paille à la bouche
Exercice 2	Ramasser une bouteille au sol et la mettre sur la table



**Figure 70 : Positionnement des objets des exercices de l'expérience**



**Figure 71 : Situation d'expérience**

La Figure 70 et la Figure 71 montrent l'installation du participant et le positionnement des objets. Par exemple, pour l'exercice 5 de l'apprentissage, un verre avec une paille est

positionné sur la position Objet 1, et une bouteille ouverte et vide se situe sur la position Objet 2. L'utilisateur va en premier attraper la paille pour ensuite la faire glisser au fond de la bouteille.

En plus de cette installation, afin de suivre le protocole, une interface de gestion du protocole (Figure 72) a été créée. Elle permet de visualiser l'avancement des exercices et de connaître la session courante pour un participant. Cette interface permet aussi de démarrer chacune des interfaces avec les configurations adéquates à l'exercice, par exemple, démarrer le Pie Menu avec la configuration du mode extension.

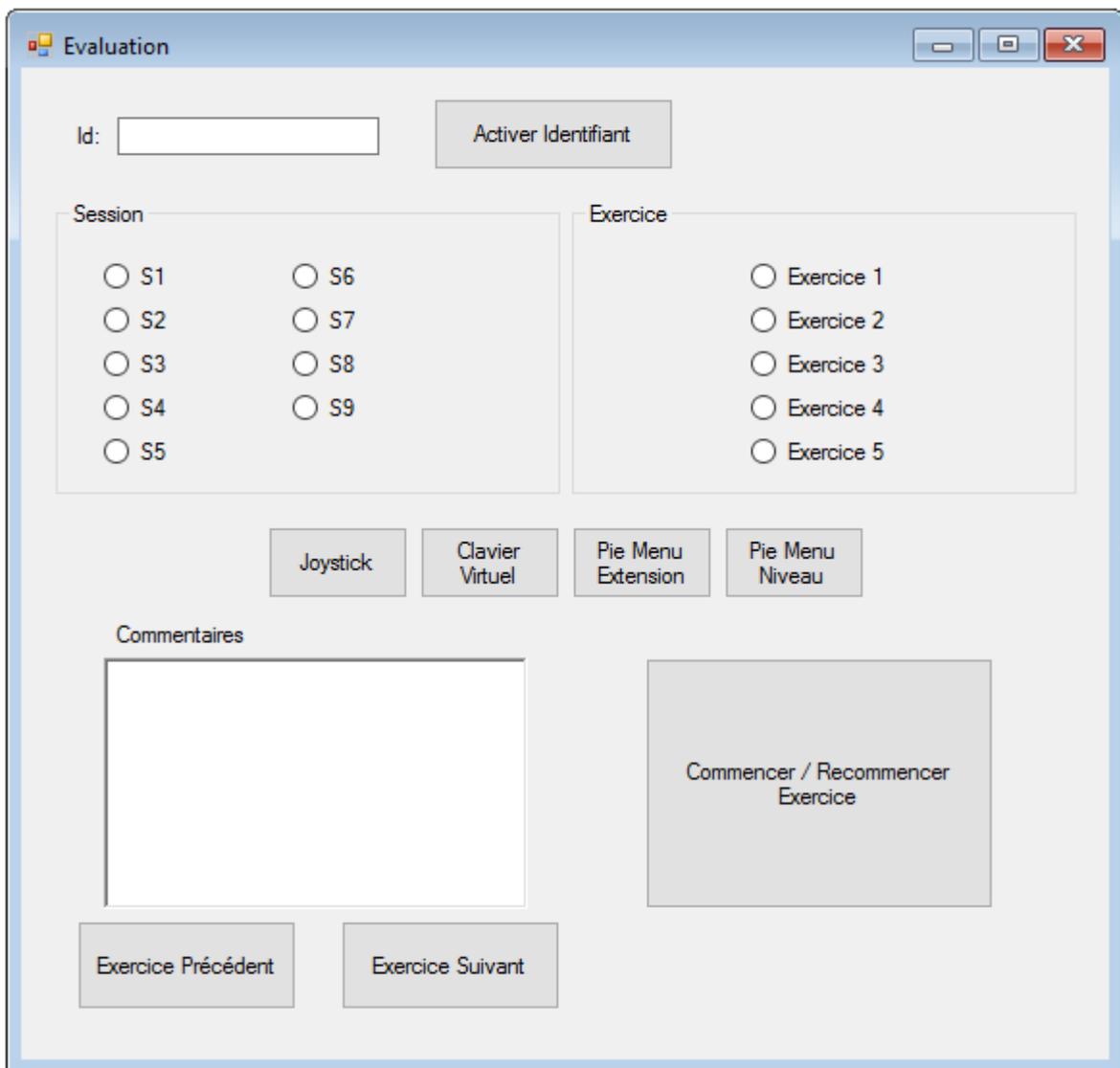


Figure 72 : Interface de gestion du protocole JACO

Ces différents exercices vont être comparés et analysés suivant différents critères afin de permettre la comparaison des différentes interfaces pour l'utilisation du bras JACO.

#### 4.3.b. Critères de jugement

L'objectif principal est de quantifier l'amélioration de la facilité d'utilisation (nombre d'actions produites pour réaliser la tâche). N'ayant pas de référence d'utilisation avec le dispositif joystick de référence pour ces deux participants, nous avons estimé le nombre minimum d'actions pour réaliser l'exo 1 (8) et l'exo 2 (9) de tests. Ils détermineront ainsi le nombre d'actions supplémentaires pour réaliser la tâche. La Figure 73 et la Figure 74 montrent que la facilité d'utilisation est très différente pour ces deux personnes. Le participant 2 est plus proche de l'utilisation optimale et ce, quelle que soit le type d'interface. Il obtient cependant les meilleures performances avec l'interface Pie-Menu Extension. Ce nombre élevé d'actions supplémentaires pour le participant 1 s'explique par la stratégie déployée par celui-ci, à savoir, une série d'appuis (stratégie de *tapping*) sur le trackball pour le déplacement du curseur en opposition à celle de la personne 2 qui a favorisé le maintien.

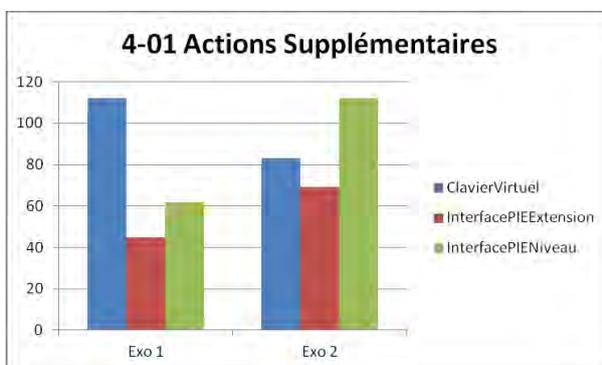


Figure 73 : Actions supplémentaires pour le Participant 1

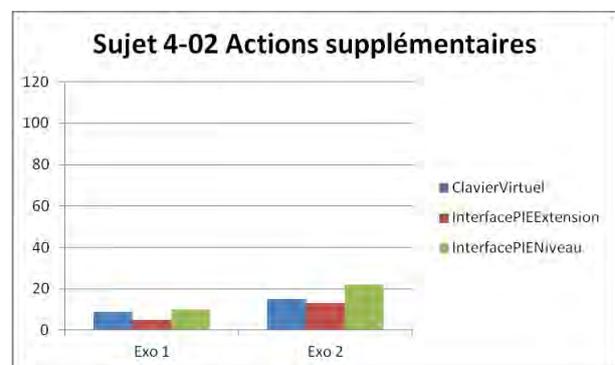


Figure 74 : Actions supplémentaires pour le Participant 2

Parmi les critères de jugement principaux, nous avons décidé de présenter le **temps total de la tâche**. La Figure 75 et la Figure 76 montrent que le temps total de réalisation donné en minutes est minimal pour l'interface Pie Menu Extension, et ce pour les deux personnes en situation de handicap.

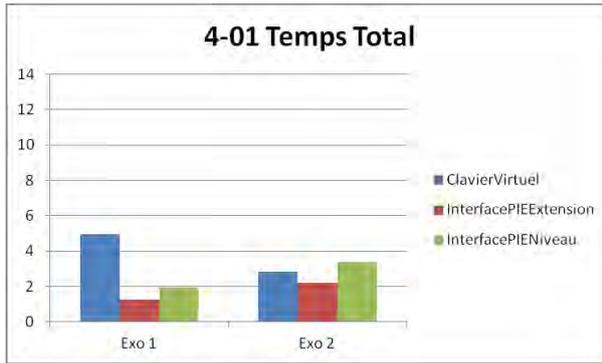


Figure 75 : Temps total pour le Participant 1

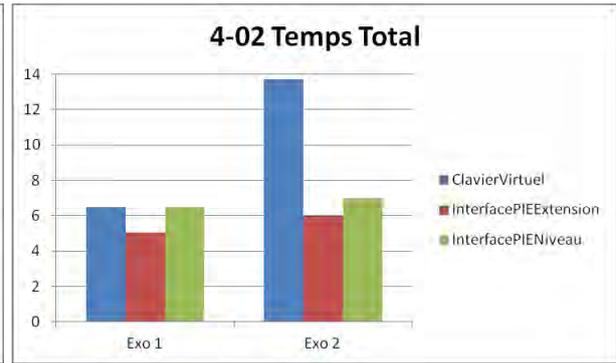


Figure 76 : Temps total pour le Participant 2

Les Tableau 11 et le Tableau 12 sont les tableaux de contingence du nombre d'actions supplémentaires et du temps respectivement par les participants 1 et 2 pour les deux exercices de tests. Ils comptent le nombre de fois où une interface obtient un meilleur résultat qu'une autre pour les critères d'action et de temps. Le calcul du Khi-2 est très fortement significatif (\*\*) donc les deux variables sont indépendantes pour définir un indice de performance.

Tableau 11 : Tableau de contingence Participant 1 pour les actions supplémentaires et le temps

Participant 1	Actions supplémentaires	Temps (en minute)
Clavier	10	2
Niveau	8	13
Extension	18	21

X-squared = 6.7546, df = 2, p-value = 0.03414 ... significative\*\*

Tableau 12 : Tableau de contingence Participant 2 pour les actions supplémentaires et le temps

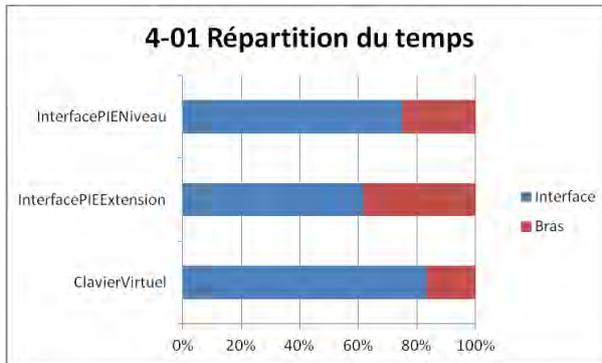
Participant 2	Actions supplémentaires	Temps (en minute)
Clavier	16	7
Pie Menu Niveau	4	11
Pie Menu Extension	16	18

X-squared = 6.9061, df = 2, p-value = 0.03165 ... significative\*\*

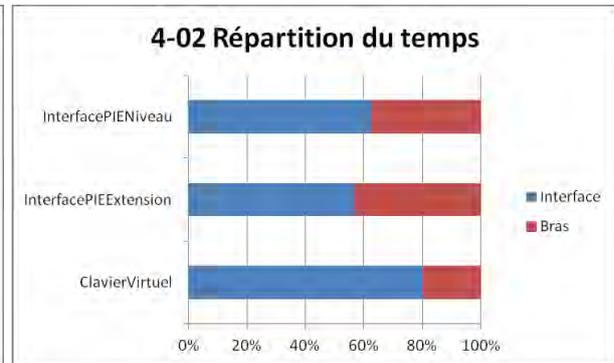
Le dernier critère principal est le taux de réussite des exercices. Sur les 6 exercices, le participant 1 a échoué sur un seul exercice (Tableau 13), alors que le participant 2 a réussi tous ses exercices directement. Le nombre d'exercices étant encore faible, nous ne pouvons conclure réellement, mais ces résultats semblent prometteurs.

**Tableau 13 : Taux de réussite des participants pour l'expérimentation 1 JACO**

Participant 1	85,7% (1 échec)
Participant 2	100% (0 échec)



**Figure 77 : Répartition du temps entre interface et bras (Participant 1)**



**Figure 78 : Répartition du temps entre interface et bras (Participant 2)**

La Figure 77 et la Figure 78 illustrent la répartition entre le taux d'utilisation de l'interface et le temps du déplacement du bras. Il est calculé par le pourcentage de temps que représente l'utilisation de l'interface et le déplacement du bras par rapport au temps total de la réalisation de la tâche. Ces deux figures montrent qu'en moyenne le temps de manipulation minimal est de l'ordre de 60 %. Ce temps minimal est obtenu pour les deux personnes pour l'interface Pie-Menu Extension. La répartition est sensiblement équivalente pour les deux personnes en situation de handicap. Ces deux figures montrent que l'interface Clavier virtuelle est celle qui est la plus longue en temps de manipulation.

Un questionnaire de satisfaction (Annexe 1 : Questionnaire JACO) a été soumis aux deux participants. Il est basé sur une échelle de Likert [R. Likert, 1932] à quatre éléments (1

Fortement contre, 2 Plutôt contre, 3 Plutôt pour, 4 Fortement pour). Pour le participant 1 cela concorde avec les résultats sur les performances sur le temps et le nombre d'actions pour les 2 exercices évalués. De ces trois interfaces le participant 1 a choisi en premier le Pie-Menu extension suivie du clavier et en dernier le Pie-Menu Niveau pour les critères : préférence, facilité et stabilité. La moyenne de score est de 3 pour le Pie-Menu extension, 2,83 pour le clavier et de 2,58 pour le Pie-Menu niveau. Toutefois le test du Khi2 (X-squared = 1.297, df = 22, p-value = 1) est non significatif.

Toutefois, dans le cas du participant 2, la préférence est donnée au Clavier avec 3,33, suivie du Pie-Menu Niveau avec 3,25 et pour finir avec le Pie-Menu Extension avec 2,92. Attention le test du Khi2 (X-squared = 0.8652, df = 22, p-value = 1) est non significatif. Ces résultats sont différents du classement donné par les performances des exercices 1 et 2. L'hypothèse est que le clavier permet d'effectuer des mouvements linéaires, ce qui est efficace avec le Clavier sur lequel les boutons sont positionnés en ligne colonne. Par contre, sur le Pie-Menu extension les coins des boutons peuvent être des obstacles au mouvement vers les menus extérieurs, puisque en déplacement linéaire, depuis un bouton du menu intérieur, il est possible de passer par un autre bouton du menu intérieur avant d'attendre les menus en extension. Ceci rend l'interaction par déplacement en ligne droite du clavier plus complexe car elle peut nécessiter des contournements dans la trajectoire du curseur.

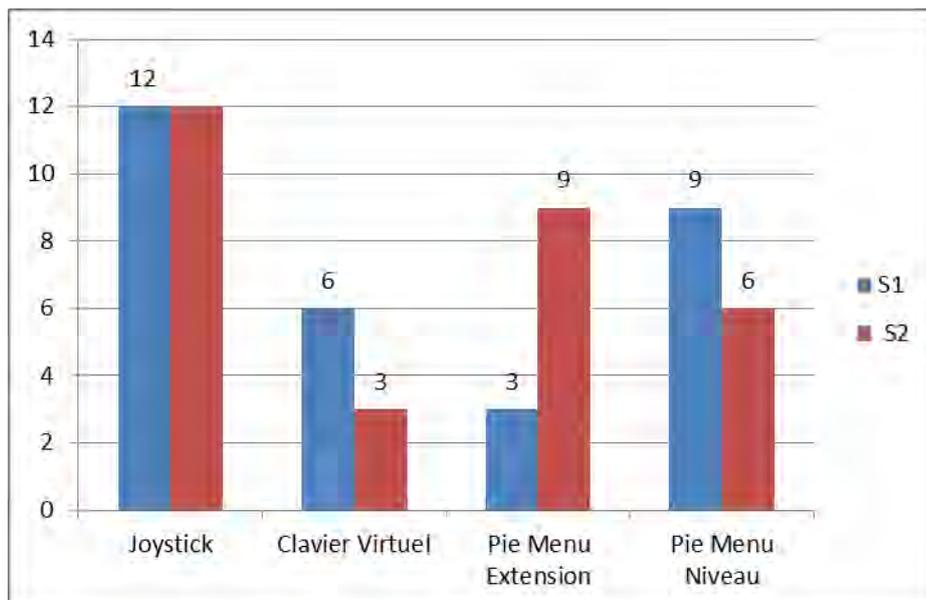
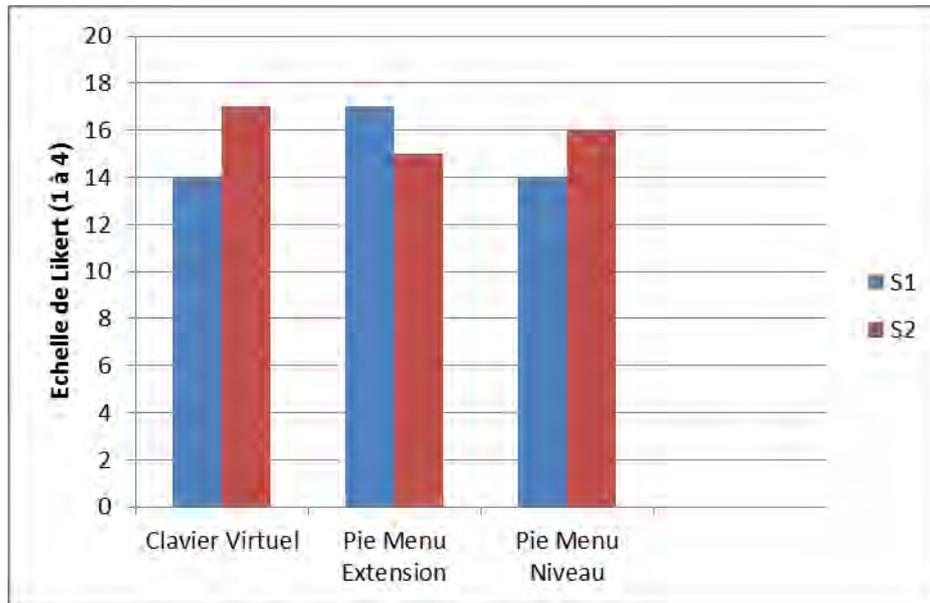


Figure 79 : Préférences parmi les interfaces



**Figure 80 : Evaluation du ressenti des participants pour les interfaces**

La Figure 79 correspond à trois questions : Q1: Interface préférée; Q2: Interface plus facile à utiliser; Q3: Interface dans laquelle vous avez le plus confiance pour utiliser le bras JACO. La Figure 79 montre que S1 a préféré le PIE Menu Extension les trois questions alors que S2 a choisi le Clavier Virtuel. La Figure 80 rapporte l'évaluation perçue calculée à partir d'une échelle de Likert). Le score est la somme des valeurs obtenues à partir des questions suivantes: Q1: Le temps d'achèvement est acceptable; Q2: C'est un plaisir d'utiliser l'interface; Q3: L'interface doit mobiliser l'attention; Q4: Je voudrais utiliser l'interface fréquemment; Q5: J'ai besoin d'aide pour utiliser l'interface. Le participant 2 a préféré le clavier virtuel et Participant 1 le menu Extended Pie. Cependant, il n'y a pas de différence significative entre les interfaces.

Parmi les remarques du questionnaire sont signalées des difficultés pour se repérer sur les différentes commandes (droite, gauche ou incliner haut, bas, ou pivoter gauche, droite). Cela serait dû à une difficulté des 2 participants à assimiler le bras robotique à leurs propres espaces moteurs, et aussi à la difficulté de comprendre la signification des mots. Malgré tout, la manipulation du bras est plutôt satisfaisante en termes de manipulations et de fonctionnalités. Le temps de la réalisation de la tâche a été jugé satisfaisant par les deux

participants. L'utilisation leur a procuré du plaisir et ils souhaiteraient utiliser plus fréquemment le bras JACO.

Voici quelques verbatim des questionnaires :

Pour la difficulté d'utilisation du bras « *Des fois, quand il se bloque, on ne sait pas trop où il va aller pour se débloquer* » « *Pas évident de repérer la droite et la gauche, de même pour avancer et reculer, on se perd en fonction de l'orientation de la main. Il faudrait un repère* ».

Pour l'utilisation du joystick : « *Mal conçu, le manche est trop gros et dur à manier. Les boutons sont trop éloignés* », « *JACO et son joystick sont pour moi inutilisables* ».

Pour les interfaces : « *Je préfère l'interface clavier parce que, comme rien ne bouge, on peut facilement planifier ses déplacements* », « *L'interface Pie Menu avec extension est assez déroutante pour moi, à cause des extensions qui apparaissent et disparaissent* », « *Le Pie Menu par extension semble plus rapide, il permet de sortir rapidement vers les boutons après avoir choisi le bon menu* » « *Pour le Pie Menu Niveau, le retour au milieu est pénible et demande de l'attention* ».

Remarque générale : « *Ce bras JACO est intéressant, mais les choses qu'on peut faire avec lui se font encore trop lentement, on a encore plus vite fait de demander à une tierce personne de nous le faire* ».

## 5. Evaluation Complémentaire

Suite à la précédente étude, nous avons souhaité vérifier les observations, les conclusions et les hypothèses que nous avons faites. Dans cette optique, nous avons demandé à nos 2 participants de réaliser 6 fois la session 9 (Tableau 9). Nos hypothèses sont :

- que la variable temps pourrait faire ressortir l'une des interfaces comme étant la plus performante ;
- que le taux de réussite est un indicateur relatant la progression et la maîtrise de l'interface de commande du bras JACO.

Il a aussi été demandé aux utilisateurs de réussir les exercices. En cas d'échec, l'expérimentateur relance l'exercice jusqu'à sa réussite. Pour chacun des participants, les résultats de réussite par interface étant non significatifs avec une p-value du Chi2 = 0.8334, nous avons décidé de représenter sur le Tableau 14 le taux de réussite des différentes tâches quels que soient l'interface et l'exercice, soit le nombre de tentatives / le nombre d'exercices 36 (2 exercices \* 3 interfaces \* 6 sessions + Nombre de tentatives). Les taux de réussite des exercices sont supérieurs avec nos interfaces pour le participant 1 en comparaison à ceux du joystick 3D [Jiang et al. 2013]. Le participant 2 a un taux de réussite proche de l'utilisation d'un clavier physique. Ce participant utilise un clavier physique comme dispositif de souris. Même si les difficultés des deux exercices sont différentes, il est intéressant de noter la proximité des résultats avec cette étude.

**Tableau 14 : Réussite des exercices en %**

Participant 1	94,7% (2 échecs)
Participant 2	87,8% (5 échecs)

Le participant 1 avait eu comme résultat une meilleure performance sur les critères de temps et d'actions supplémentaires pour le Pie-Menu par extension. Les résultats (Figure 81) montrent une variabilité des résultats pour l'exercice. Dans le cas de l'exercice 1, les critères de temps et d'action sont équivalents et ne permettent pas de faire ressortir une interface comme étant la meilleure (voir Figure 82 et Figure 83). Les tests significatifs pour l'exercice 1 sont pour **le Temps** (Kruskal-Wallis chi-squared = 0.0819, df = 2, p-value = 0.9599) et pour **le nombre d'actions** (Kruskal-Wallis chi-squared = 0.2677, df = 2, p-value = 0.8747). Dans les 2 cas il n'y a pas de différence significative. Pour l'exercice 2, les tests sont pour **le temps**, Kruskal-Wallis (chi-squared = 3.1345, df = 2, p-value = 0.2086) et pour **le nombre d'actions** (Kruskal-Wallis chi-squared = 1.4854, df = 2, p-value = 0.4758). Ils ne sont pas significatifs. Par contre, on peut faire 2 observations, la première observation est que le temps de réalisation total de l'exercice avec le PIE menu extension est meilleur de 33% par rapport aux autres interfaces. Sur la Figure 81, pour le temps de réalisation de l'exercice 2, le Pie-Menu Extension est plus performant, 5 fois sur les 6 tentatives. La deuxième observation est pour le Pie-Menu extension que le nombre d'actions supplémentaires diminue au cours des exercices. En hypothèse, nous pouvons dire que l'exercice perçu comme le plus difficile par

les participants permet de faire ressortir l'une des trois interfaces. De plus, au fur et à mesure des tentatives, le participant 1 continue d'apprendre et d'améliorer ses résultats dans le cas du Pie-Menu extension.

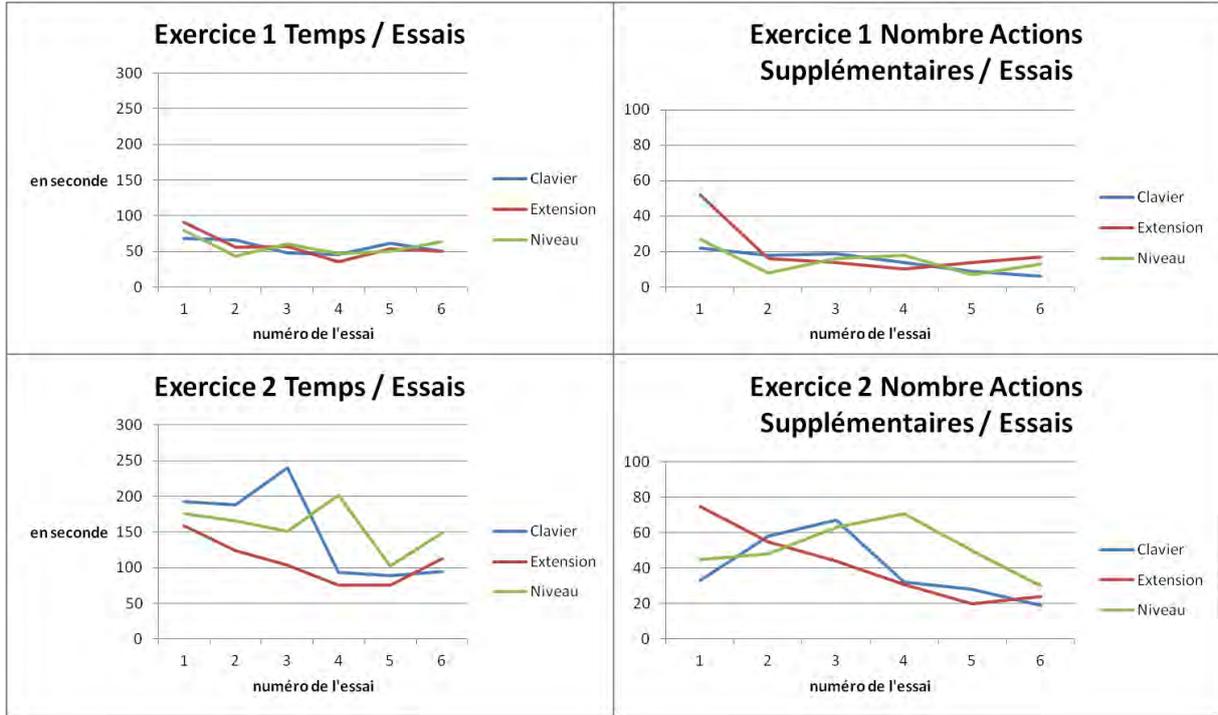


Figure 81 : Résultats du Participant 1 pour l'étude complémentaire

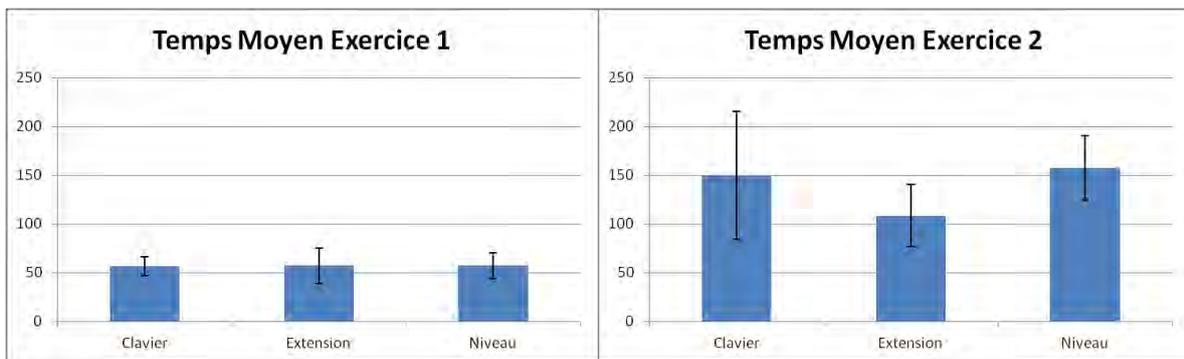
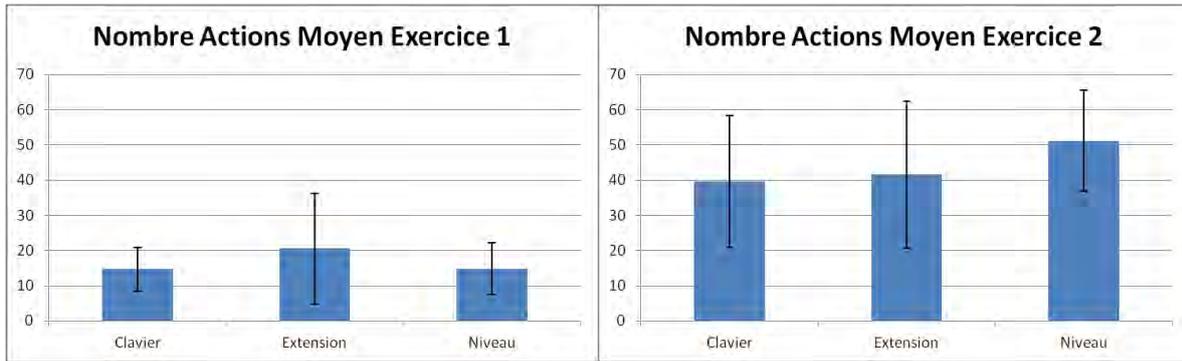


Figure 82 : Moyenne des temps pour les exercices du participant 1



**Figure 83 : Moyenne du nombre d'actions moyen pour les exercices du participant 1**

L'analyse des traces des différents essais nous a permis de calculer une autre valeur supplémentaire, **les erreurs d'interaction**. Nous définissons ces dernières comme étant le nombre d'actions qui ne correspond pas à l'action que l'utilisateur voulait effectuer. Ainsi l'utilisateur qui devait « aller à droite » a utilisé la fonctionnalité « aller à gauche ». Pour chacune de ces erreurs nous ajoutons 1 au nombre d'erreurs. Nous avons observé qu'une partie de ces erreurs vient de la recherche par l'utilisateur de la bonne fonction de déplacement du bras. Il effectue des tests pour vérifier que la commande correspondra à ses attentes. Lors des expérimentations, une erreur régulière entre le déplacement du bras à droite au lieu d'aller à gauche est apparue. L'hypothèse est que le bras étant installé à droite de la personne, et la cible étant à gauche du bras, mais aussi à droite de l'utilisateur, cette situation semble avoir **troublé spatialement** les participants. Cette valeur dans le cas du participant 1, Tableau 15, montre qu'au fur et à mesure des exercices ce nombre d'erreurs diminue. Il est possible de dire que l'utilisateur retient de mieux en mieux les différentes fonctionnalités du bras. Parmi les 3 interfaces, c'est le Clavier qui ressort comme ayant induit le moins d'erreurs pour le participant 1, toutefois le test statistique (Kruskal-Wallis,  $\chi^2 = 1.0776$ ,  $df = 2$ ,  $p\text{-value} = 0.5835$ ) pour l'exercice 1 et (Kruskal-Wallis,  $\chi^2 = 0.9681$ ,  $df = 2$ ,  $p\text{-value} = 0.6163$ ) pour l'exercice 2 montre qu'il n'y a pas de différence significative.

**Tableau 15 : Nombre d'erreurs d'interaction avec l'interface pour le participant 1**

Exercice 1	Clavier	Extension	Niveau	Exercice 2	Clavier	Extension	Niveau
Essai 1	0	7	5	Essai 1	10	20	9
Essai 2	2	2	0	Essai 2	11	13	7
Essai 3	0	0	1	Essai 3	13	9	14
Essai 4	0	0	1	Essai 4	3	4	14
Essai 5	0	0	0	Essai 5	4	3	10
Essai 6	0	0	0	Essai 6	2	9	4
Total	2	9	7	Total	43	58	58
Moyenne	0,33	1,5	1,17	Moyenne	7,17	9,67	9,67
Ecart-type	0,56	2	1,28	Ecart-type	4,17	4,56	3

En conclusion, pour le participant 1, il est possible d'émettre comme hypothèse que l'interface Pie-Menu Extension est plus efficace pour les exercices les plus difficiles. L'interface clavier quant à elle, a comme avantage d'induire moins d'erreurs d'interactions.

Pour le participant 2, nous avons effectué les mêmes tests statistiques que pour le participant 1 : **le temps** pour l'exercice 1 (Kruskal-Wallis, chi-squared = 0.6667, df = 2, p-value = 0.7165) et pour l'exercice 2 (Kruskal-Wallis, chi-squared = 0.6153, df = 2, p-value = 0.7352), **le nombre d'actions** pour l'exercice 1 (Kruskal-Wallis, chi-squared = 0.6325, df = 2, p-value = 0.7289) et l'exercice 2 (Kruskal-Wallis, chi-squared = 2.4392, df = 2, p-value = 0.2954), et pour **les erreurs** de l'exercice 1 (Kruskal-Wallis chi-squared = 0.6153, df = 2, p-value = 0.7352) et l'exercice 2 (Kruskal-Wallis, chi-squared = 0.0123, df = 2, p-value = 0.9939). Aucune différence n'est significative pour les trois interfaces. Nous pouvons supposer que la meilleure interface est aussi le Pie-Menu Extension par rapport aux observations du participant 1 pour le temps et le nombre d'actions. Les résultats (Figure 84) montrent aussi une variabilité des résultats. De même que pour le participant 1, l'exercice 1 ne permet pas de conclure sur une tendance de meilleure interface selon les variables actions et temps. Dans le cas de l'exercice 2, l'interface Pie-Menu Extension a obtenu un meilleur temps pour réaliser la tâche. Ceci renforce l'hypothèse selon laquelle l'utilisation du Pie-Menu Extension est la plus efficace pour les tâches les plus difficiles (Figure 85). Par contre, aucune tendance n'est à noter sur le nombre d'actions supplémentaires si ce n'est

une stabilité de la courbe du Clavier. Pour le participant 2, il n'y a aucune tendance d'amélioration au fur et à mesure des essais (Tableau 16) : le nombre d'erreurs est moins important pour le Clavier et le Pie-Menu Extension dans le cas des 2 exercices et le Pie-Menu Niveau a 25% d'erreurs supplémentaires.

En conclusion, pour le participant 2, comme pour le participant 1, l'interface Pie-Menu Extension semble avoir un avantage pour la réalisation des tâches les plus complexes telles que celles réalisées dans l'exercice 2, car cet exercice est plus long à réaliser. Ces différents résultats montrent la variabilité sur les différents critères lors de la réalisation de tâches avec le bras robotique JACO. Il est possible de supposer que l'apprentissage d'une telle technologie est très long pour atteindre un niveau d'utilisation plus stable. Une deuxième hypothèse, qui ne s'annule pas avec la précédente, est que les participants, de par leur situation de handicap, ont des difficultés qui varient beaucoup d'un essai à l'autre.

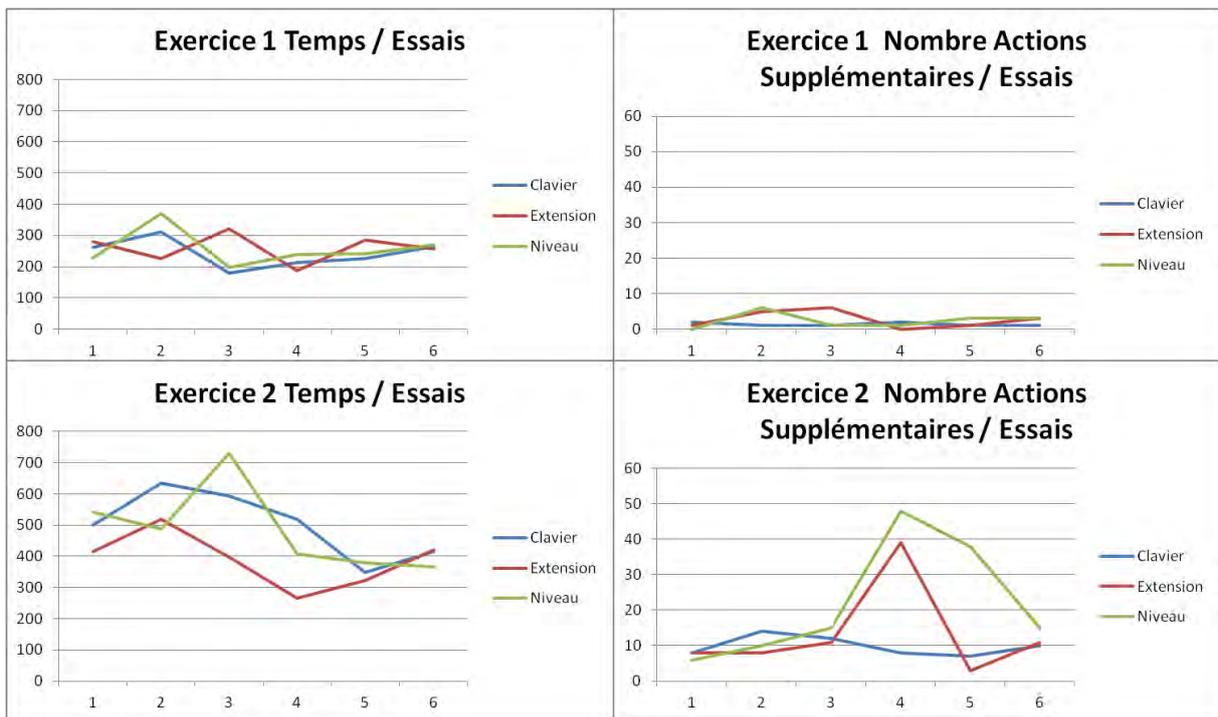


Figure 84 : Résultats du Participant 2 pour l'étude complémentaire

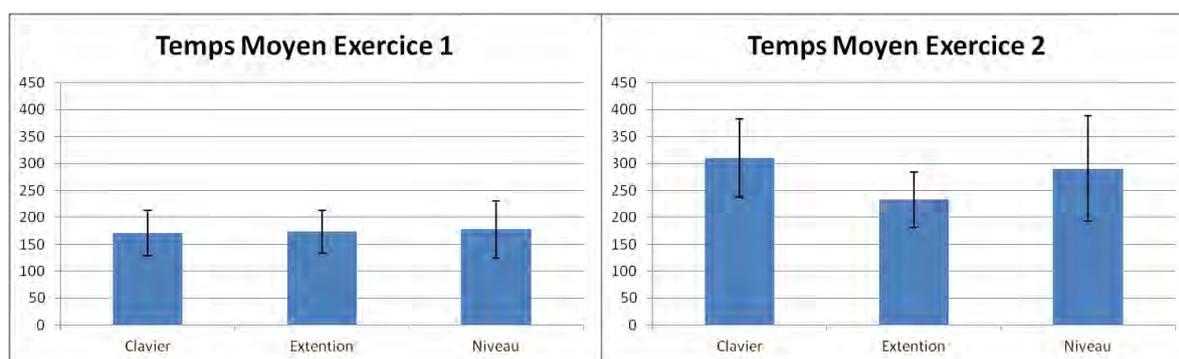


Figure 85 : Moyenne des temps pour les exercices du participant 2

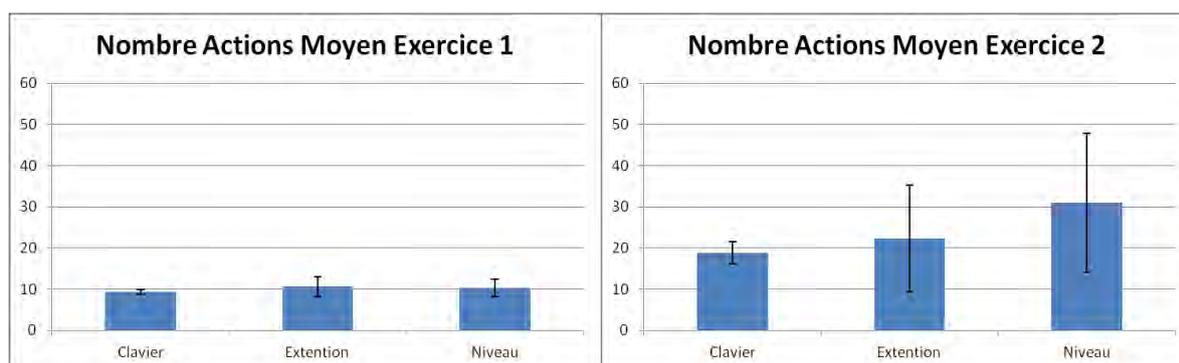


Figure 86 : Moyenne du nombre d'actions par exercice du participant 2

Tableau 16 : Nombre d'erreurs d'interaction avec l'interface pour le participant 2

Exercice 1	Clavier	Extension	Niveau	Exercice 2	Clavier	Extension	Niveau
Essai 1	1	0	1	Essai 1	2	2	0
Essai 2	1	1	3	Essai 2	3	4	2
Essai 3	0	3	0	Essai 3	3	2	8
Essai 4	2	0	1	Essai 4	0	0	4
Essai 5	1	1	1	Essai 5	1	0	2
Essai 6	1	1	2	Essai 6	3	4	0
Total	6	6	8	Total	12	12	16
Moyenne	1	1	1,33	Moyenne	2	2	2,67
Ecart-type	0,33	0,67	0,78	Ecart-type	1	1,33	2,22

Les 2 cas d'étude et l'analyse des traces ont mis en avant le Pie Menu Extension, en particulier pour l'exercice le plus difficile. En effet, dans l'exercice 2, nous constatons que les

limitations motrices des personnes les ont empêchées d'avoir une bonne visualisation de l'objet au sol. L'avantage du Pie-Menu Extension est, d'un point de vue acquisition mentale des interfaces, d'être plus simple pour la mémorisation ou la recherche de la commande souhaitée par l'utilisateur.

## 6. Résultats croisés MPH JACO et discussion

Afin d'extraire l'écart de l'usage des interactions en situation pratique et les exercices contrôlés de MPH, il a été calculé la déviation moyenne des tâches de pointage et de Goal Crossing. La déviation correspond à la différence pour un pointage entre le temps mis sur les interfaces JACO et le temps théorique obtenu à partir de la plateforme MPH. Pour chaque pointage on a les valeurs du temps d'atteinte du bouton de l'interface ainsi que la distance et la précision. Nous allons appliquer ces valeurs à la formule de l'IDe (Equation (12)). L'IDe ainsi obtenu va être appliqué à la formule de la loi de Fitts (Equation 8) avec l'IDe à la place de l>ID et avec comme valeur empirique « a » et « b » qui sont obtenues avec le dispositif lors de l'expérimentation MPH (page 126) en fonction du participant. La valeur MT obtenue sera la valeur théorique retenue pour une atteinte d'un bouton. La déviation que nous souhaitons calculer est le temps MT obtenu dans le fichier trace auquel on soustrait la valeur théorique correspondante. Notre hypothèse est que cette déviation correspond au temps supplémentaire de réflexion ou de recherche du bouton sur l'interface pour réaliser une tâche. L'utilisation des interactions sur l'interface peut être décrite par un modèle GOMS. Les utilisateurs planifient les actions qu'ils souhaitent réaliser, ils recherchent la commande et l'activent, ainsi de suite, jusqu'à réaliser l'ensemble des actions qu'ils ont planifiées. S'ils se trompent de commande, ils s'adaptent en changeant leur planification, ou ils corrigent pour revenir à l'état précédent. Ici, seule la partie action de pointage est évaluée statistiquement pour le Clavier et le Pie-Menu Niveau, l'écart est donc supposé être l'ensemble des sous tâches « planification et recherche » des boutons correspondants sur ces interfaces.

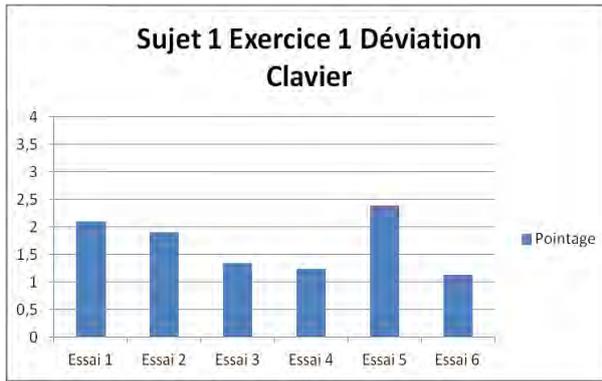


Figure 87 : Participant 1 Exercice 1 Déviation Clavier

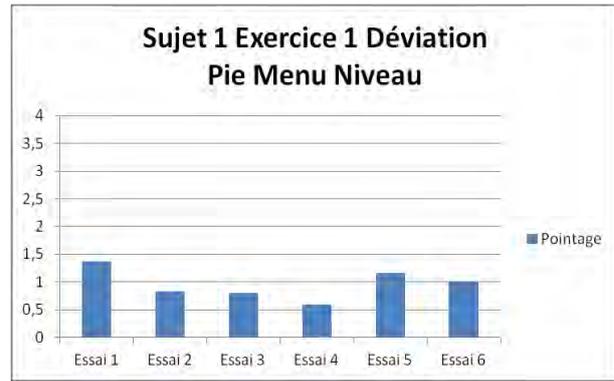


Figure 88 : Participant 1 Exercice 1 Déviation Pie Menu Niveau

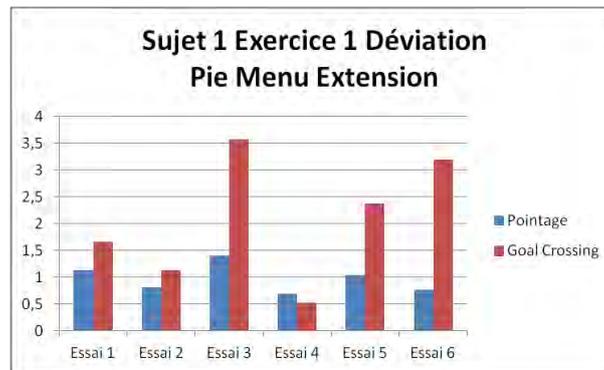


Figure 89 : Participant 1 Exercice 1 Déviation Pie Menu Extension

Les figures (Figure 87, Figure 88, Figure 89) sont les calculs de déviation du MT pour l'exercice 1 et pour le participant 1. Ces données nous montrent que la déviation du pointage est moindre pour le Pie-Menu Niveau et pour le Pie-Menu Extension. Dans le cas du Pie-Menu Niveau, l'hypothèse est que le participant a plus d'étapes pour accéder à l'action qu'il souhaite utiliser, ce qui lui donne plus de temps pour réfléchir à sa planification. Dans le cas du Pie-Menu Extension, le Goal Crossing est normalement une action plus rapide (voir 4.2 Design d'expérimentation pour la technique de pointage et de Goal Crossing), mais obtient un moins bon temps dans le cas de l'interface Pie-Menu Extension par rapport au pointage. Ceci nous laisse penser que le participant planifie son action lors du Goal Crossing. Ceci explique pourquoi le Clavier aurait le plus de déviations puisque il n'y a pas d'étape intermédiaire mais une réflexion pour chacune des actions élémentaires effectuées sur cette interface. D'un point de vue statistique, nous comparons le Clavier et le Pie-Menu Niveau ;

ici selon Kruskal-Wallis, les valeurs chi-squared = 5.0256, df = 1, p-value = 0.02497, montrent une différence significative entre les interfaces.

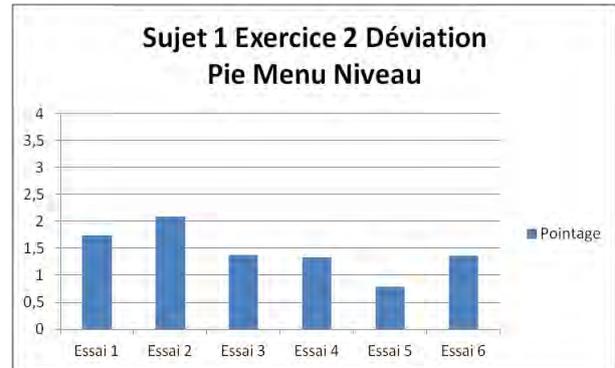
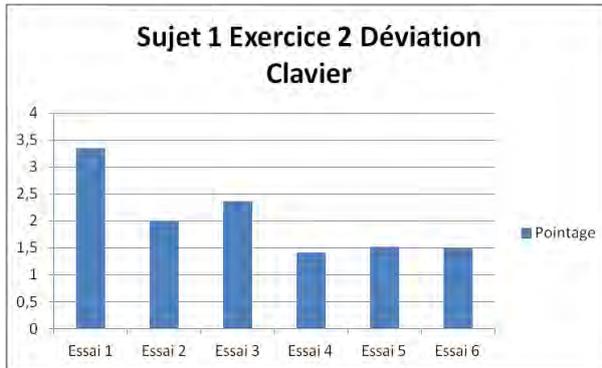


Figure 90 : Participant 1 Exercice 2 Déviation Clavier

Figure 91 : Participant 1 Exercice 2 Déviation Pie Menu Niveau

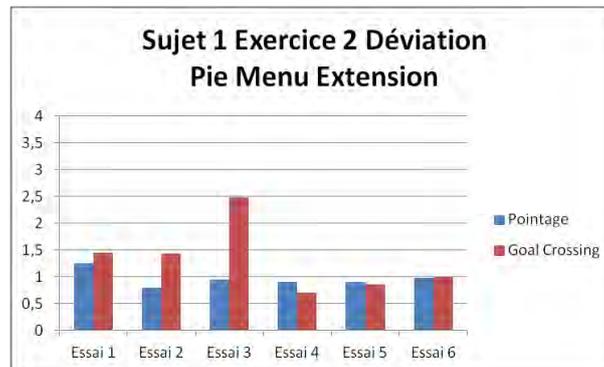


Figure 92 : Participant 1 Exercice 2 Déviation Pie Menu Extension

Les figures (Figure 90, Figure 91, Figure 92) semblent donner, pour l'exercice 2 du participant 1, des valeurs de déviation supérieures à l'exercice 1 qui est moins complexe, sauf pour le pointage et le Goal Crossing du Pie-Menu Extension qui conservent une valeur proche pour le pointage. La valeur du Goal Crossing est quand même meilleure. Les variables (temps, nombre d'actions et erreurs) qui donnaient un avantage au Pie-Menu Extension, pourraient s'expliquer par une meilleure capacité du participant à planifier ses tâches avec le Pie-Menu Extension. Celui-ci serait hypothétiquement plus affordante. D'un point de vue statistique pour les interfaces Clavier et Pie Menu Niveau, ici selon Kruskal-Wallis, les valeurs chi-squared = 3.1026, df = 1, p-value = 0.07817, montrent en particulier avec une p-value supérieur à 0,05 qu'il n'y a donc pas de différence significative.

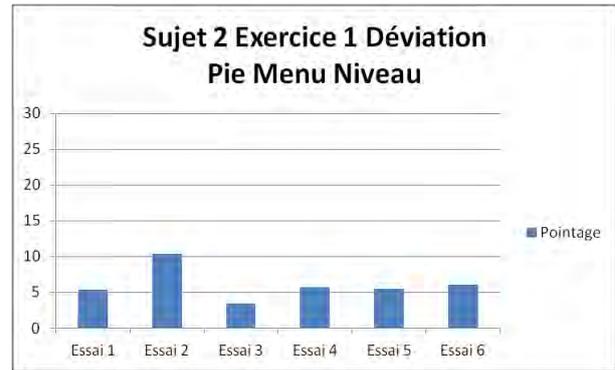
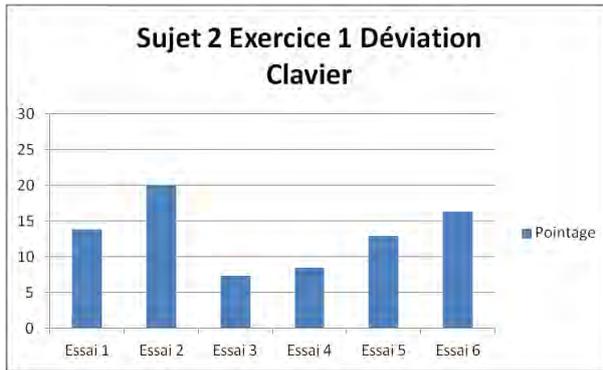


Figure 93 : Participant 2 Exercice 1 Déviation Clavier

Figure 94 : Participant 2 Exercice 1 Déviation Pie Menu Niveau

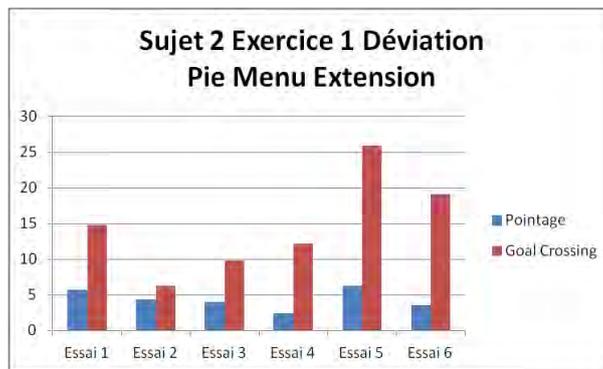


Figure 95 : Participant 2 Exercice 1 Déviation Pie Menu Extension

Les figures (Figure 93, Figure 94, Figure 95) sont les calculs de déviation pour l'exercice 1 réalisé par le Participant 2. Ces données ont une similitude avec les hypothèses émises pour le participant 1, même si ces valeurs ont une plus grande divergence. La déviation du pointage est moindre pour le Pie-Menu Niveau et pour le Pie-Menu Extension. Le Participant 2 semble aussi planifier ses mouvements lors des différents changements de niveau dans le Pie-Menu Niveau. Dans le cas du Pie-Menu Extension, le Goal Crossing obtient un moins bon temps. La planification d'interaction sur l'interface semble se dérouler lors du Goal Crossing pour choisir le bon menu. D'un point de vue statistique, les interfaces Clavier et Pie Menu Niveau sur l'exercice 1 du participant 2 avec Kruskal-Wallis, les valeurs chi-squared = 6.5641, df = 1, p-value = 0.01041, montrent une différence significative entre les deux interfaces.

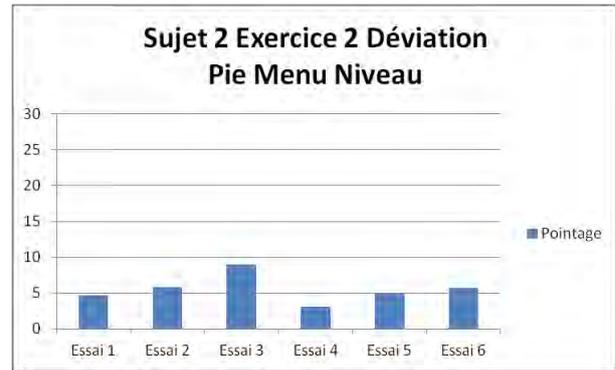
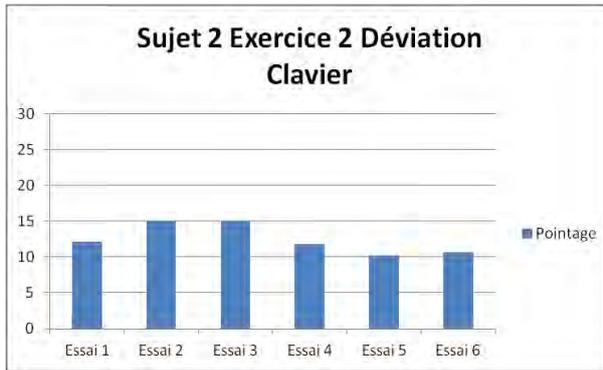


Figure 96 : Participant 2 Exercice 2 Déviation Clavier

Figure 97 : Participant 2 Exercice 2 Déviation Pie Menu Niveau

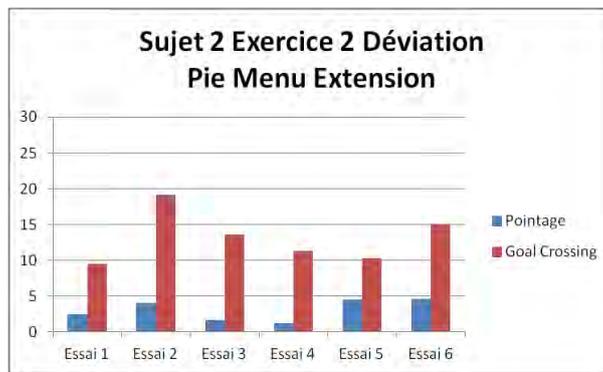


Figure 98 : Participant 2 Exercice 2 Déviation Pie Menu Extension

Les figures (Figure 96, Figure 97, Figure 98) pour l'exercice 2 du participant 2 vont dans le même sens que les observations précédentes. De plus les statistiques de l'exercice 2 du participant 2 pour les interfaces Clavier et Pie-Menu Niveau avec Kruskal-Wallis, les valeurs Chi-squared = 8.3077, df = 1, p-value = 0.003948, montrent une différence très significative entre les deux interfaces.

Ces résultats semblent donc nous montrer, pour réaliser une tâche avec le bras JACO, que la planification s'effectue tout au long de l'interaction. Principalement, dans la première étape de l'interaction au vu des valeurs trouvées pour le Goal Crossing. Ces résultats montrent donc pour les participants un avantage dans le pointage pour le Pie-Menu Extension. Il serait intéressant d'explorer plus cette interface pour simplifier d'avantage la planification des actions pour réaliser une tâche. En complément à cette étude, il serait intéressant d'étudier divers exercices aux difficultés multiples. Ceci nous permettrait de bien identifier l'influence de la difficulté sur les interfaces, ou d'étudier en détail l'apprentissage de chacune d'entre

elles. Il pourrait être possible d'identifier les éléments qui ralentissent ou accélèrent l'apprentissage de ce type d'interface.

## 7. Conclusion du chapitre 2

L'intérêt pour la robotique de préhension, pour des personnes en situation de handicap des membres supérieurs, est pertinent. Le but est de proposer un outil qui permet d'améliorer leur autonomie. Des différentes solutions de robotiques qui existent, le bras JACO semble l'une des solutions les plus prometteuses. Par contre, il manque d'une accessibilité auprès des personnes ne pouvant pas utiliser le joystick fourni.

Dans cette optique, en partant de l'hypothèse que l'utilisation des dispositifs utilisés par les personnes en situation de handicap leur est adaptée et déjà ajustée en termes de sensibilité, nous avons développé des interfaces graphiques.

Pour atteindre notre objectif, répondre aux besoins des personnes en situation de handicap, nous avons utilisé une méthode de conception centrée utilisateur, basée sur un brainstorming et des focus groups. De nos observations du déroulement de ces derniers, nous proposons des recommandations :

- Choisir un lieu de réunion accessible par les transports, en tenant compte de la présence d'un accompagnant.
- La salle de réunion doit être suffisamment spacieuse pour accueillir une personne en fauteuil et son accompagnant.
- Il peut être nécessaire de prévoir l'invitation d'un accompagnant pour permettre à la personne de s'exprimer lorsque celle-ci a des troubles de la parole ou est mutique.
- Il est nécessaire de limiter la taille des groupes à 4 personnes en situation de handicap moteur afin de leur permettre d'exprimer leurs idées lors de la discussion.
- Un tour de table en début de réunion permet à chacun des participants de se présenter.
- Il faut identifier les mouvements résiduels de chacune des personnes, afin de choisir des solutions adaptées à leurs besoins.

- Il faut donner la préférence à l'interaction de la personne sur un ordinateur avec son dispositif usuel habituel. L'ordinateur devra être compatible.
- Pour le questionnaire, il est possible de faire une interview, ou de le proposer en version internet afin de laisser la personne le remplir chez elle et de lui laisser le temps de répondre aux questions.
- Son environnement familial ou médico-social pourra l'aider ou le remplacer pour les différentes tâches demandées au cours de la méthode de conception centrée utilisateur.

Des solutions proposées au cours de la phase de génération d'idées, nous avons retenu comme interface, une interface Clavier sur laquelle l'ensemble des fonctionnalités sont affichées simultanément, et 2 interfaces Pie Menu. La première, par Niveau, permet de se déplacer dans un menu pour accéder aux différentes fonctionnalités du bras robotique et la dernière, par Extension, affiche sur le côté du menu, sélectionné par Goal Crossing, l'ensemble des fonctionnalités associées au menu.

Nous avons évalué au travers d'un protocole les différentes interfaces. En partant de tâches écologiques et d'exercices de Fitts, nous avons créé un profil utilisateur, à partir des performances pour le pointage et le Goal Crossing. L'ensemble des données a été collecté et analysé à partir de nos outils MPH et ECSD (Chapitre 1 6 Outils utilisés : MPH et ECSD).

Ces études avec deux personnes aux pathologies différentes ont montré, d'une part que la chaîne des composants logiciels (plateforme MPH, interfaces virtuelles) est robuste, et d'autre part qu'une étude clinique sur une population importante avec des pathologies différentes (tétraplégie, paralysie cérébrale, sclérose en plaque, myopathie, paralysie cérébrale, sclérose latérale amyotrophique....) est nécessaire pour mesurer l'efficacité des interfaces virtuelles en fonction des situations de handicap.

A partir de nos observations, nous allons faire des recommandations. Celles-ci démontrent qu'il est nécessaire aux personnes d'avoir un temps important d'adaptation et de prise en main des interfaces. Parmi les interfaces, il semble intéressant d'avoir le Pie-Menu Extension pour la planification de résolution de différentes tâches et en particulier relativement aux tâches les plus complexes. En effet, durant le Goal Crossing, les participants ont défini la planification de leurs tâches. De plus, le Goal Crossing, d'après les profils, est une action plus

simple que le pointage (voir Résultats croisés MPH JACO et discussion ). Cela pourrait sous-entendre qu'avec l'apprentissage et l'habitude d'utilisation, toutes les interfaces pourraient avoir des temps de réalisation de tâches et de nombre d'actions équivalents. Mais il est aussi intéressant d'envisager l'utilisation du Pie-Menu Extension pour l'apprentissage du bras robotique JACO.

De plus, l'ensemble des résultats, nous montre que la conception centrée utilisateur a permis la conception d'interfaces qui rendent le bras JACO accessible et acceptable pour des personnes qui ne pouvaient pas l'utiliser avec le joystick. Par cette étude nous confirmons pour nos interfaces les trois facteurs d'acceptabilité [A. Dillon et M. Morris 1999]. Nos hypothèses pour ces critères sont confirmées, d'une part pour l'utilité car les interfaces répondent aux besoins des utilisateurs pour accéder au bras robotique et pour l'utiliser. D'autre part le facteur utilisabilité a été montré aux travers de nos métriques d'évaluation, ces dernières montrent que le Pie Menu par extension a obtenu des résultats favorables pour les tâches les plus difficiles. Enfin pour le dernier facteur expérience utilisateur les questionnaires de satisfaction montrent l'intérêt de chacun des participants pour des interfaces différentes. Il est possible de se poser la question, d'avoir des interfaces associées à des profils utilisateurs.

Pour cela, la perspective de ce projet est d'appliquer le protocole in-situ dans des centres de rééducation auprès de personnes en situation de handicap des membres supérieurs avec différentes pathologies. De plus, les interfaces pourront être améliorées avec une reconnaissance d'objet, comme vu dans la littérature [I. Laffont et al. 2009], afin de tirer avantage de l'automatisation ou de la semi-automatisation d'actions du bras robotique. Au niveau de l'interaction il serait intéressant aussi d'ajouter de nouvelles techniques d'interaction sur nos interfaces, comme la poussière magnétique [Hurst et al. 2007], cette poussière se dépose sur les touches les plus fréquemment utilisées, elle attire le curseur vers ces touches. Il serait intéressant de le coupler avec un système de prédiction qui pourrait déplacer les poussières en fonction de la tâche prédite.

Pour comparer l'utilisation d'un bras robotique de préhension, avec différents outils d'interaction (joystick, interface, dispositifs ...), il serait intéressant de proposer un exercice de Fitts réel, non plus simulé sur ordinateur avec des tâches de pointage sur un écran, mais

avec des objets à attraper avec le bras robotique. La position et la taille des objets seraient variables. Ce type d'exercice permettrait de définir un modèle de Fitts non plus pour un humain mais pour un bras robotique. L'objectif sera de classifier les différents outils d'interaction utilisés pour piloter le bras robotique.

**Chapitre 3 : SoKeyTo pour la  
conception de systèmes de  
communication et de contrôle  
d'environnement**



## 1. Introduction

De nombreux besoins sont exprimés par les personnes en situation de handicap dans un but d'autonomie. Il est donc important, lorsque l'on propose une solution, qu'elle réponde correctement aux besoins de la personne [D.M.C. Cruz, et al. 2016]. Dans cette thèse, les aides techniques sont conçues à partir d'une méthode centrée utilisateur orientée pour la conception des solutions d'interfaces graphiques. L'avantage d'une interface graphique est que l'utilisateur peut utiliser son dispositif usuel pour interagir, ce qui diminue l'apprentissage d'utilisation des aides techniques. Pour concevoir ces interfaces, nous allons utiliser la plateforme SoKeyTo [Thèse F. Vella 2008] de conception d'interface graphique. L'utilisation de cette plateforme va nous permettre de répondre à deux questions scientifiques, à savoir : 1) est-ce que l'on peut traduire les besoins de la personne en situation de handicap en fonctionnalités disponibles sur l'interface générée ? 2) Est-ce que l'on peut utiliser le profil de la personne pour configurer automatiquement les techniques d'interaction ? Cette dernière question restera une perspective.

L'objectif de ce chapitre est de décrire la démarche pour concevoir des interfaces virtuelles qui répondent au mieux aux demandes des personnes en situation de handicap. Ce chapitre abordera l'aspect ingénierie de la plateforme SoKeyTo, les méthodes de conception et les premiers retours des essais des interfaces graphiques conçues avec la plateforme SoKeyTo.

Dans un premier temps, nous allons décrire la plateforme initiale de SoKeyTo. Pour pouvoir améliorer cette plateforme, nous nous sommes inspirés de notre état de l'art des différentes plateformes existantes et des observations faites auprès des personnes handicapées. Ceci a donné naissance à la nouvelle version de SoKeyTo. Puis, nous allons mettre en pratique notre plateforme au travers de deux projets : le projet CECI et le projet HandiMathKey. Dans chacun de ces deux projets, nous détaillerons le cahier des charges, la méthode de conception, le développement des interfaces, leurs évaluations et les résultats obtenus.

## 2. La plateforme SoKeyTo (Soft Keyboard Toolkit)

L'objectif initial de la plateforme SoKeyTo était de générer des claviers de saisie de textes afin d'étudier l'effet de l'agencement spatial des touches d'un clavier virtuel – rapidité et

réduction de la fatigue motrice- [F. Vella, N. Vigouroux, 2007]. La plateforme SoKeyTo est un environnement de conception de ces claviers et d'évaluation théorique des claviers produits.

La conception de plateforme SoKeyTo [F. Vella et al 2004] est le résultat d'un « brainstorming » avec des ergothérapeutes et des personnes en situation de handicap moteur des membres supérieurs. Elle a permis de disposer d'une « collection » de claviers virtuels et de les évaluer théoriquement pour connaître l'impact de la représentation spatiale et de leurs caractéristiques morphologiques (taille, forme, couleur ...) [F. Vella et. al 2004]. La génération des claviers produit un fichier XML (Extensible Markup Language). Ce fichier contient la description complète du clavier et permet aussi d'assurer la compatibilité entre les versions de la plateforme SoKeyTo. L'avantage du langage XML est de permettre la description des interfaces, et l'ajout facile de nouvelles descriptions. La version initiale de la plateforme SoKeyTo est composée de trois modules :

- 1) un module qui permet la génération du fichier XML au travers d'une interface graphique qui permet de dessiner le clavier ;
- 2) un module qui permet de choisir les caractéristiques morphologiques des touches ;
- 3) un module d'évaluation théorique, intégré, qui pourra permettre de comparer les différents claviers créés avec la plateforme SoKeyTo.

## 2.1. Etat des lieux des plateformes

Cette synthèse a été faite sur des plateformes conception de clavier virtuel, soit par l'analyse des fiches techniques sur des sites trouvés à partir de Google, soit en testant directement la solution si cette dernière était téléchargeable et testable gratuitement. Certains environnements ont été identifiés à travers la bibliographie [S.J. Castellucci, et I.S. MacKenzie, 2009], [B. Merlin et al. 2012].

Dans « l'Annexe 5 Avantages et Inconvénients des concurrents de SoKeyTo » sont détaillés les différents environnements proches de la plateforme SoKeyTo. Le Tableau 17 fait une synthèse des avantages et des éléments importants à ne pas oublier dans la plateforme SoKeyTo.

**Tableau 17 : Synthèse des plateformes concurrentes à SoKeyTo**

Plateforme de conception de clavier virtuel	Fonctionnalités présentes	Fonctionnalités manquantes à SoKeyTo par rapport aux plateformes de conception de claviers virtuels
Civikey <sup>7</sup>	Base de données de clavier Fenêtre de modification Souris Virtuelle	Liste de prédiction Dialogue entre application
KeyVit <sup>8</sup>	Fenêtre de modification	Souris Virtuelle Liste de prédiction
Discover Enjoy <sup>9</sup>	Boitier Multi-Contacteur	Dialogue entre application Multi-OS
Clavicom NG <sup>10</sup>	Fenêtre de modification	Liste de prédiction Configuration Dynamique
Qualikeys <sup>11</sup>	Pointage, DwellClicking Balayage	Possède une suite logicielle compatible
Hot Virtual Keyboard <sup>12</sup>	Configuration fine des techniques d'interaction Fenêtre de modification	Liste de prédiction
Tnt toolkit <sup>13</sup>	Evaluation des claviers ambigus Aide de saisie pour l'ambiguïté	
E-Assist II <sup>14</sup>	Support XML de la représentation des interfaces Evaluation des interfaces	Ajout de module d'interaction

Le Tableau 17 montre l'importance d'intégrer diverses techniques d'interactions et de les configurer de façon fine et ajustable pour une personne en situation de handicap. Les techniques qui ressortent sont principalement le pointage pour les personnes pouvant

<sup>7</sup> <http://www.civikey.fr/>

<sup>8</sup> <http://www.jabbla.com/products.asp?itemID=22>

<sup>9</sup> <http://techmatrix.org/resource/discover-envoy>

<sup>10</sup> <http://www.icomprovence.net/ressources/ressources-developpement-logiciels-clavicom-ng-marseille.html>

<sup>11</sup> <http://qualikey.software.informer.com/>

<sup>12</sup> <http://hot-virtual-keyboard.com/>

<sup>13</sup> S.J. Castellucci, et I.S. MacKenzie, 2009

<sup>14</sup> B. Merlin et al. 2012

utiliser un dispositif de pointage, le clic temporisé et le balayage, ces deux derniers lorsque la personne a des difficultés dans l'interaction de pointage classique. Il est nécessaire de pouvoir exécuter d'autres applications afin de simplifier le développement (outils de communication, téléphonie, messagerie et lecture vocale). Le tout doit permettre la communication et le contrôle d'environnement, pour réussir à améliorer l'autonomie des personnes atteintes de déficiences motrices et de troubles de la parole conformément à l'expression des besoins. La plateforme SoKeyTo servira d'outil de prototypage pour les interfaces des projets (HandiMathKey et CECI). Nous allons maintenant approfondir les fonctionnalités de la plateforme SoKeyTo selon les besoins que nous avons recueillis pour les adapter aux personnes en situation de handicap.

## **2.2. SoKeyTo version 2**

Afin de répondre aux besoins des utilisateurs et au regard de l'état des lieux des plateformes, la plateforme SoKeyTo a été augmentée. Elle ne génère pas seulement des claviers d'écriture mais aussi des interfaces de communication et de contrôle de l'environnement. Elle comporte trois grandes parties : 1) la conception d'une interface qui permet de générer un fichier XML qui représente cette dernière, 2) une configuration qui permet de générer un profil utilisateur, 3) le module d'usage qui, à partir de la représentation XML de l'interface et du profil utilisateur, génère l'exécutable de l'interface. La Figure 99 illustre cette architecture.

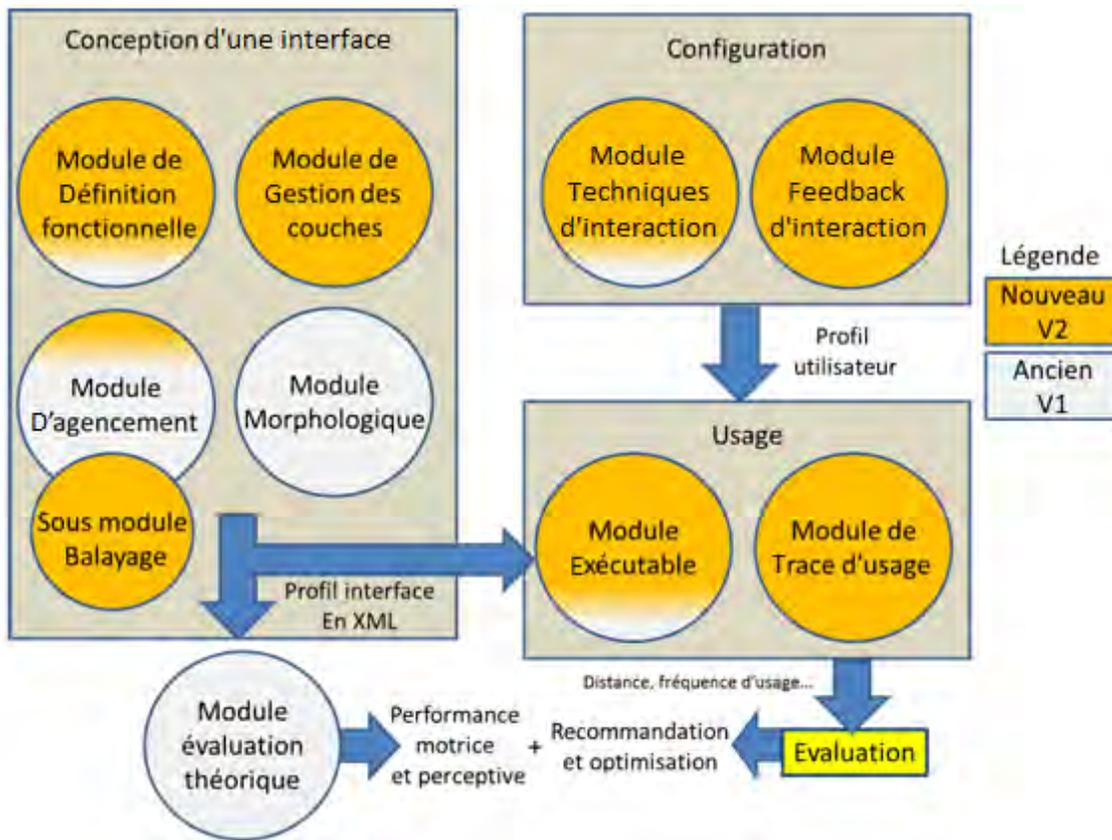


Figure 99 : Architecture de SoKeyTo v2

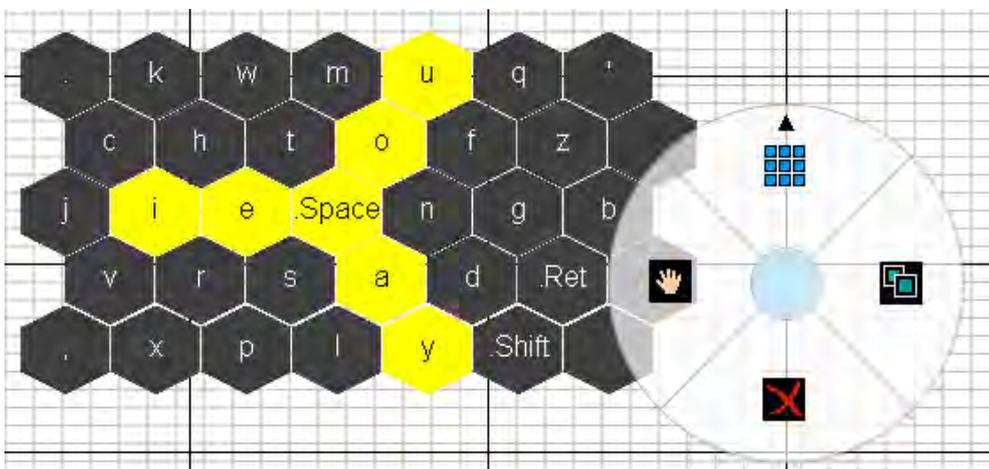
### 2.3. La conception d'une interface avec SoKeyTo

Grace à cette nouvelle architecture, la plateforme SoKeyTo va nous permettre de concevoir des interfaces, autres que celles de saisie de texte, répondant aux besoins des personnes en situation de handicap. Pour concevoir une interface, les quatre modules de conception permettent de décrire une représentation XML de l'interface (Figure 99). Ce fichier décrit la morphologie et l'agencement spatial des touches de l'interface. Nous allons maintenant décrire le but et le fonctionnement de chacun de ces modules.

#### 2.3.a. Le module d'agencement

Nous formulons cette hypothèse que l'agencement spatial des touches est une caractéristique à offrir aux concepteurs d'interfaces. Le module d'agencement (Figure 100), basé sur une grille de dessins, permet de créer le squelette de l'interface à partir de 4 fonctionnalités, l'ajout d'une nouvelle touche, la duplication de touche, le déplacement d'une touche et la suppression de touche. Ce module est important dans le sens où l'organisation des touches va, d'une part, servir à la personne pour mémoriser les différentes

actions qu'il va réaliser, mais aussi pour optimiser l'usage de l'interface. Il faudra donc tenir compte de la fréquence d'usage de chacune des fonctions, et de préférence mettre à proximité les touches qui se suivent dans leurs usages le plus fréquemment, ce qui permet un accès plus rapide aux différentes touches puisqu'elles seront proches. Pour définir cette proximité, les outils de traces seront utilisés. Cela permet de diminuer la distance parcourue sur l'interface et ainsi diminuer l'indice de difficulté d'atteinte d'une touche selon la loi de Fitts (Chapitre 1: La loi de Fitts). Une distance moindre permet aussi de diminuer l'effort moteur de la personne, ce qui impactera sa fatigabilité.



**Figure 100 : SoKeyTo : Module d'agencement, exemple interface du clavier Metropolis [S. Zhai et al. 2000]**

Le module d'agencement est complété par un sous module qui permet de définir la stratégie de la technique d'interaction balayage d'une interface. L'utilité du balayage est de permettre aux personnes ne pouvant effectuer des déplacements du curseur, d'accéder aux interfaces avec un simple contacteur. Le module permet de créer un balayage sous la forme d'un arbre de profondeur 3, comme illustré en Figure 101. La profondeur 3 se justifie à partir des travaux de C.E. Steriadis et de P. Constantinou (2003) sur les stratégies de balayage. Cette profondeur permet d'utiliser chacune de ces stratégies proposées. Nous avons, soit une feuille qui représente une touche unique qui sera la touche sélectionnée, soit une branche qui contient une liste de branches et/ou de feuilles. Le balayage commence à la racine. Si la racine est une feuille alors la sélection sera la touche représentée par l'unique feuille de l'arbre, sinon il proposera tous les éléments de la branche 1 par 1. A la profondeur 3 de l'arbre, il n'est plus possible d'instancier de nouvelles branches, à ce niveau il est seulement

possible d'ajouter des feuilles à l'arbre. Ce choix se traduit par le temps nécessaire pour atteindre une touche de l'interface. A une profondeur de 3 il est nécessaire d'effectuer 3 sélections. Sur la Figure 101, la sélection de la touche V nécessite l'attente que la technique de balayage propose la 3<sup>ième</sup> branche verticale, puis ensuite la 4<sup>ième</sup> feuille, soit 7 temps d'attente, et 2 sélections (4<sup>ième</sup> ligne et 3<sup>ième</sup> colonne). Dans cette représentation il est aussi possible de faire apparaître plusieurs fois une même touche, plusieurs feuilles pouvant représenter une même touche.

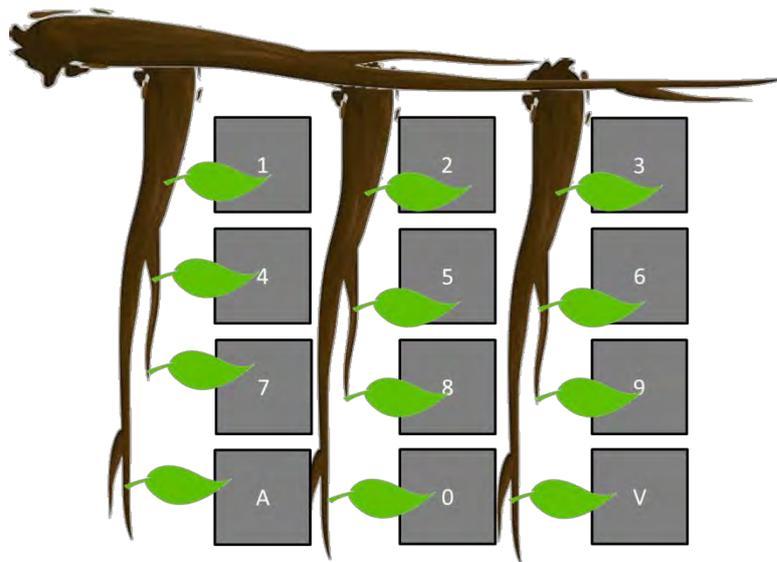


Figure 101 : Arborescence Balayage

### 2.3.b. Le module morphologique

Le module morphologique (Figure 99), vient en complément au module d'agencement. Il permet de choisir la forme, la couleur et la taille des touches. Celles-ci peuvent avoir une influence sur les performances d'atteinte des touches [L. Magnien et al. 2004]. La forme de la touche permet d'avoir un sens esthétique pour l'interface, mais elle permet aussi d'avoir un sens pratique. Dans l'exemple de la Figure 102, l'hexagone permet d'avoir 6 autres touches voisines à même distance, alors qu'une touche carrée n'en aurait que 4. Le choix de la couleur d'une touche est aussi important, il permet de discriminer le fond de l'écran avec la bordure d'une touche. Il faut donc faire attention à ce choix afin que les utilisateurs puissent bien percevoir les touches. Le choix des couleurs peut-être basé sur les

combinaisons de couleur pour l'écriture et le fond d'écran recommandé [M. Bruce et J.J. Foster 1982].



Figure 102 : Description Physique d'une touche

### 2.3.c. Le module de définition fonctionnelle

Avec les modules précédents, nous avons créé la morphologie des touches de l'interface. Maintenant il faut associer une fonction à chacune des touches qui correspond à un besoin tel qu'allumer la télévision, écrire ou accéder à une application (Figure 103).

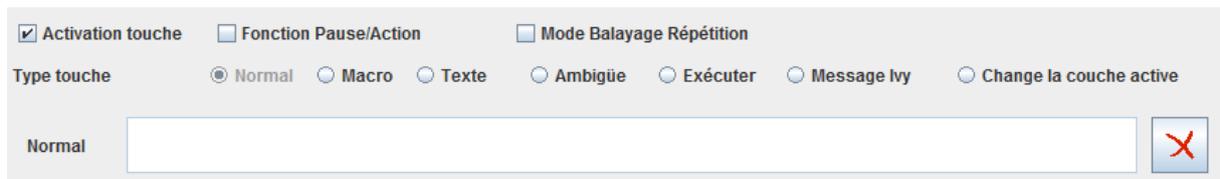


Figure 103 : Choisir la fonction d'une touche

Les fonctionnalités sont décrites en Annexe 5 « Les fonctions des touches ». Le retour de sélection de la fonction peut être multimodal (visuel et vocal). Par exemple pour une personne qui a des troubles de l'attention, en plus du retour visuel, il y a un retour vocal descriptif de la touche pour l'aider à identifier la fonctionnalité qu'elle active.

### 2.3.d. Le module de gestion des couches

Ce module intervient si le nombre de fonctionnalités est important. Une couche peut être vue comme un menu, ou un sous menu. Cette organisation peut faciliter la recherche de la fonctionnalité souhaitée, tout en limitant le nombre d'items sur l'interface, ce qui permet d'après la loi de Hick-Hyman 1952 une recherche plus rapide. Le fonctionnement de ce module est décrit en Annexe 5 « La gestion des couches ».

Nous avons vu comment créer une interface avec la plateforme SoKeyTo, maintenant nous précisons comment l'interface est décrite dans le système.

### *2.3.e. Description des interfaces en XML*

Afin de faciliter la lecture des fichiers le format XML a été choisi. Il permet de décrire l'interface générée par les quatre modules de conception. Une DTD a été définie et commence par l'élément clavier, qui va contenir la description des touches, et de façon optionnelle le balayage associé à ce clavier. Le choix du format XML permet un suivi et un maintien des interfaces au travers des versions de la plateforme SoKeyTo. Un nouveau besoin nécessite uniquement l'ajout d'un nouveau mot dans le vocabulaire de la DTD. Ce dernier est décrit en Annexe 5 « Description DTD du fichier XML des interfaces SoKeyTo ».

## **2.4. La configuration pour la création d'un profil utilisateur**

Conjointement à la description XML de l'interface, il est nécessaire d'avoir un profil utilisateur pour utiliser les interfaces de la façon la plus adaptée aux capacités motrices, visuelles et cognitives de la personne. Il faut définir la technique d'interaction pour rendre l'interface au maximum accessible, ainsi que les « feedbacks », afin que l'utilisateur puisse avoir un retour d'information qui lui permette de garder une attention suffisante sur l'interface pour éviter des erreurs.

### *2.4.a. Le module de configuration des techniques d'interaction*

La première technique d'interaction est le **pointage**, il est utilisé pour les personnes qui ont la capacité motrice suffisante pour effectuer le déplacement du curseur et l'appui de validation (Figure 104). Il peut être configuré à la pression ou au relâchement du bouton en fonction de la coordination entre mouvement et appui de la personne.

Il est aussi possible de configurer une fonction de répétition d'une touche. Sur Windows, avec un clavier physique, il est possible de répéter une touche en maintenant cette dernière enfoncée. Il existe 2 chronomètres : le premier qui va déterminer le temps de la première répétition soit 500ms pour Windows, et le deuxième qui sépare 2 répétitions, soit 40ms pour Windows. Le maintien d'une touche pour la répétition peut être intéressant si la personne n'a pas de souci pour le faire. Par contre, l'une des conséquences possibles du handicap

moteur des membres supérieurs, peut être une vitesse lente d'exécution des mouvements et les chronomètres de Windows peuvent être trop rapides. Nous proposons que cette interface offre la possibilité de pouvoir contrôler ces deux valeurs afin de les adapter à la personne.

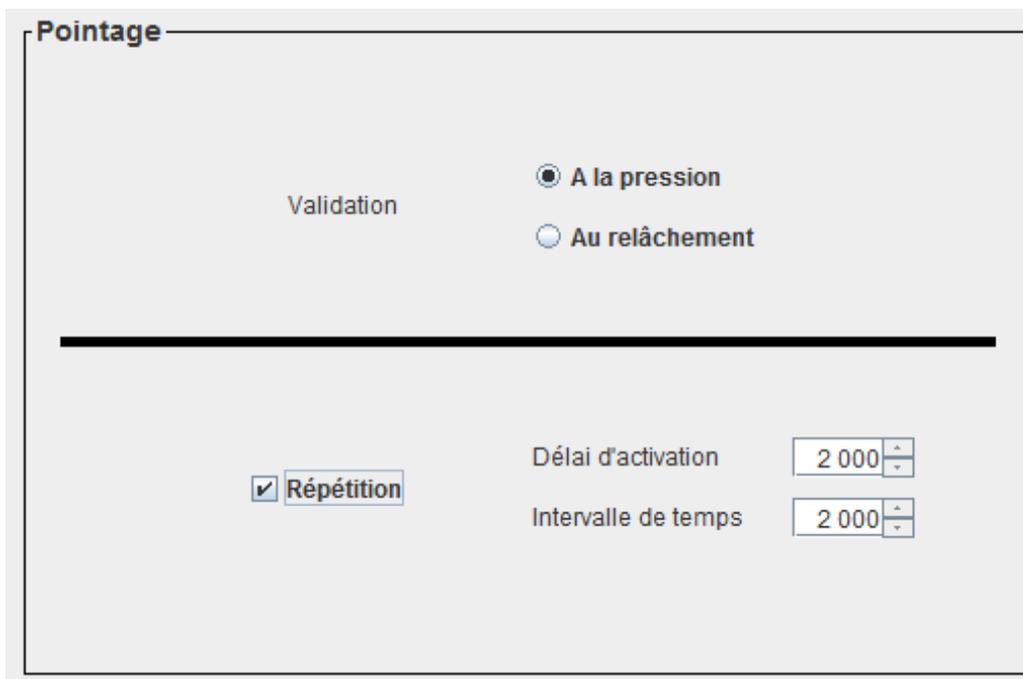


Figure 104 : Configuration du pointage

Dans le cas où la personne a des difficultés pour effectuer la validation, ou qu'elle ne peut appuyer sur un contacteur, mais qu'elle a la possibilité de déplacer le curseur, la mise en place d'une **technique de temporisation** qui automatise la validation peut être une option. Sur l'exemple de la Figure 105, la validation s'effectue au bout de deux secondes sur une touche.

Il est possible aussi d'ajouter une fonction de répétition comme précédemment, et de configurer l'intervalle entre deux répétitions. Par contre le temps de démarrage de la première répétition est égal au temps de validation qui est considéré comme temps pour déclencher une action.

Au cours de nos réflexions et de notre état de l'art, nous avons fait émerger un problème sur la répétition de touches. En effet, le fait de rendre les touches répétables, peut provoquer

des répétitions involontaires lorsque l'utilisateur prend un temps de pause pour se reposer en restant sur la touche courante. Pour pouvoir se reposer l'utilisateur devrait, soit sortir du focus de l'interface, ce qui peut représenter une distance à parcourir, soit aller dans une zone neutre de l'interface telle que l'intervalle de séparation entre deux touches. Cette deuxième situation a des conséquences sur la conception morphologique et sur le profil de configuration de l'interface. En effet, le temps de temporisation avec répétition ne devra pas forcément être trop petit.



Figure 105 : Configuration de la Temporisation

La dernière technique d'interaction actuellement définissable par la plateforme SoKeyTo est le **balayage** (Figure 106). Il est préconisé lorsque l'utilisateur est dans l'impossibilité de déplacer un curseur (voir chapitre 1 : Interaction sans mouvement, ou avec mouvement automatique.). L'interface est balayée et l'utilisateur utilise un contacteur afin d'effectuer la validation lorsque la touche qu'il souhaite valider sera proposée.

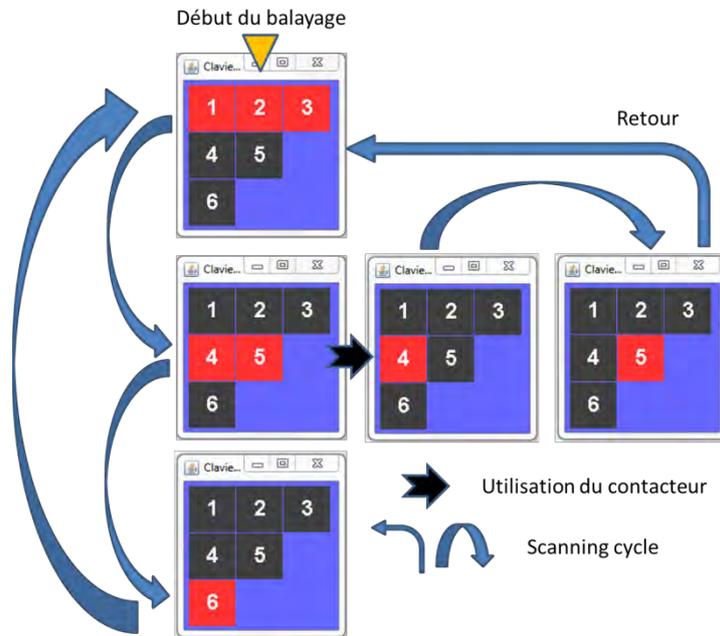
**Figure 106 : Configuration du Balayage**

Le premier paramètre du balayage est l'intervalle entre deux items proposés par ce dernier. Cet intervalle de temps est aussi la durée accordée à l'utilisateur pour valider une touche. Ce paramètre est soumis à plusieurs contraintes :

- La vitesse de mouvement de l'utilisateur (espace moteur) pour effectuer la sélection ;
- Le temps de lecture et d'identification de la bonne touche au moyen des retours visuels et/ou audio ;
- Les erreurs d'anticipation : l'utilisateur peut anticiper et valider l'item précédant celui souhaité. Cette erreur d'interaction engendre un temps non négligeable pour revenir sur l'item à sélectionner. Il existe des solutions qui ne sont pas encore implémentées dans la plateforme SoKeyTo, tel que l'algorithme des « anticipations/erreurs » du système EDiTH [S. Ghedira, 2009] qui peut aider à adapter dynamiquement l'intervalle de balayage pour diminuer ces taux d'erreur. Il sera donc utile dans des versions ultérieures de la plateforme SoKeyTo de proposer des fonctions d'adaptation de l'intervalle.

Actuellement la plateforme SoKeyTo, en cas d'erreur d'interaction avec le balayage, propose deux stratégies dans le cas où l'utilisateur s'est trompé de bouton. La première solution est

de ne proposer qu'une unique fois chacune des touches de l'ensemble sélectionné, et l'utilisateur attend que la sélection revienne automatiquement à la sélection des ensembles de touche (Figure 107). L'avantage ici est que l'utilisateur n'a pas à agir pour corriger son erreur, il doit juste attendre.



**Figure 107 : Balayage avec retour automatique**

La deuxième solution consiste à proposer à la fin de chacun des ensembles de touches une sélection globale des touches, ce qui permet de revenir à la racine du balayage (Figure 108). L'utilisateur a ici le contrôle, mais il faut attendre la fin d'une branche pour revenir à la racine.

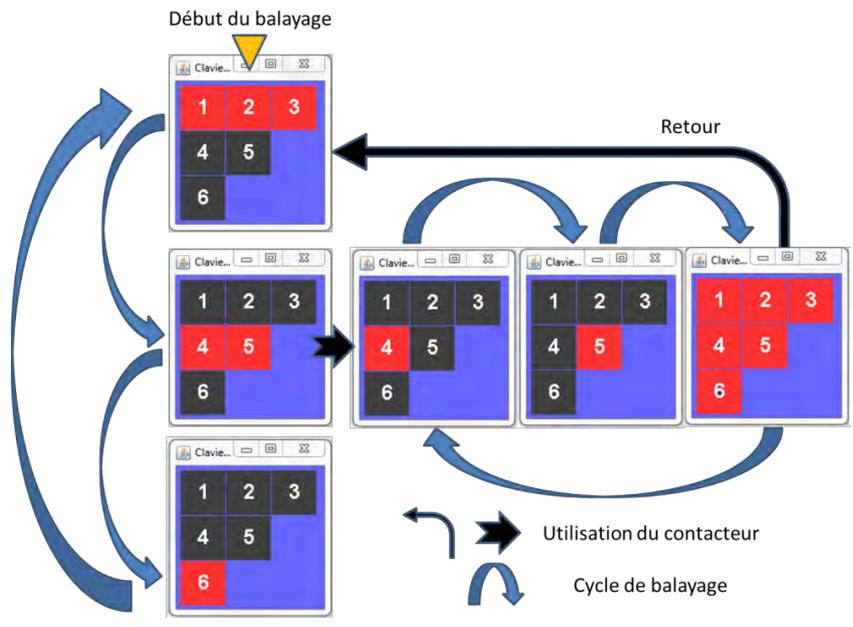


Figure 108 : Balayage avec ajout d'une sélection Retour

Une 3<sup>ème</sup> solution est possible : elle n'est actuellement pas implémentée dans la plateforme SoKeyTo car celle-ci nécessite que la personne en situation de handicap utilise deux contacteurs. Le premier contacteur permettrait d'avancer dans le balayage et d'effectuer les sélections, quant au second il permettrait de revenir à la racine pour annuler une sélection (Figure 109).

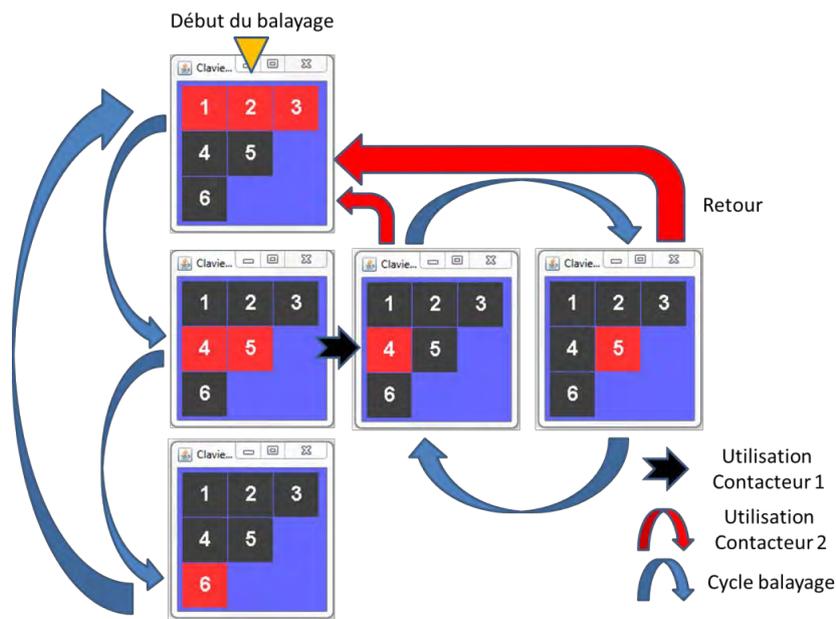


Figure 109 : Balayage à 2 contacteurs

Il est aussi possible d'effectuer des répétitions de touche avec le balayage. Cela peut être relativement avantageux lors de la navigation sur une interface avec les flèches du clavier. Il existe deux possibilités de répétition, les deux sont réalisées par un chronomètre. Le premier est le maintien du contacteur : lorsque le contacteur est maintenu, un chronomètre est lancé et à chaque fois qu'une valeur de temps sera atteinte une répétition de l'action de la touche sera effectuée. L'autre technique de répétition est de définir une période de temps durant laquelle le balayage reste sur l'action qui vient d'être validée, afin que l'utilisateur puisse à nouveau appuyer sur le contacteur pour répéter l'action et revalider la touche. A la fin de cette période, le balayage se réinitialise au premier item proposé.

Contrairement aux autres techniques d'interactions, le balayage est intrusif de par son animation visuelle, mais aussi de par son « feedback » audio, s'il est utilisé. Pour cela il a été ajouté des options de pause qui suite à la validation de l'action, stoppe totalement le balayage, qui sera repris au prochain appui sur le contacteur. Une autre fonctionnalité a été ajoutée au balayage du fait que la personne ne peut pas enlever l'interface, c'est de faire disparaître l'interface de l'écran le temps de la pause ; ce qui par exemple permet de regarder des vidéos qui auront été lancées à partir de l'interface.

Dans le cas où l'option pause et l'option de répétition ne sont pas actives, une pause automatique et réglable est présente suite à la validation d'une touche. Cette pause est utile dans le cas où la personne est participante à des mouvements involontaires qui la font appuyer plusieurs fois sur le contacteur. Cela permet de diminuer les erreurs dues à des appuis involontaires.

#### ***2.4.b. Le module de configuration des « Feedbacks »***

Nous avons procédé également à la configuration du « feedback » afin d'informer l'utilisateur de l'état de l'interface pour lui faciliter son utilisation.

##### ***2.4.b.i. Feedback visuel***

Le premier est le Feedback visuel (Figure 110). Il permet de choisir la couleur de fond de l'interface (qui doit pouvoir se différencier des couleurs des touches) et la couleur de la

touche (ou d'un ensemble de touches si la technique d'interaction est le balayage) sélectionnée.

Afin de dégager l'espace visuel de l'utilisateur, l'interface devient transparente lorsque l'utilisateur sort le curseur de celle-ci ; ainsi l'interface est apparente uniquement que lorsqu'elle est utilisée.

Si la personne a des troubles visuels, il est possible d'ajouter un zoom sur la touche sur laquelle se trouve le curseur, ainsi l'utilisateur pourra lire le texte ou identifier plus facilement l'icône qui représente l'action de la touche.

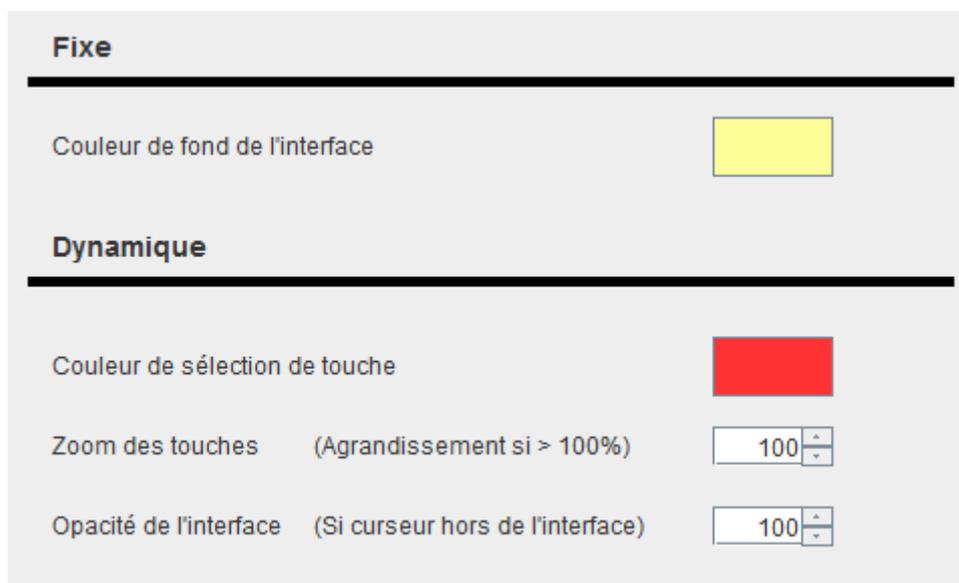


Figure 110 : Configuration Feedback visuel

#### 2.4.b.ii. Feedback audio

En cas de troubles visuel ou attentionnel, il est possible d'ajouter un retour vocal (Figure 111). Il est ainsi possible de lire vocalement le message textuel de description lié à la touche lorsque le curseur est sur la touche. Pour le mode balayage, il est possible de lire le message, soit de la touche, soit de l'ensemble des touches.

Une dernière fonction vocale est aussi la lecture du texte écrit avec un éditeur de textes si ce texte est associé à une des fonctions de la touche : la lecture s'effectue à la fin de l'écriture d'un mot, ou d'une phrase selon les options de configuration.



Figure 111 : Configuration Feedback audio

Les options proposées dans la plateforme SoKeyTo sont le résultat de la compilation des options dans les systèmes existants, les résultats d'expression de besoins avec des personnes en situation de handicap, les échanges avec des ergothérapeutes de l'ASEI dans le cadre de travaux antérieurs et les observations empiriques de sessions d'utilisation de systèmes de saisie à l'ASEI. Cet ensemble de besoins exprimés et de travaux, nous ont permis de personnaliser les techniques d'interaction avec les options présentées. Nous avons aussi travaillé le design pour une meilleure prise en main de l'interface de configuration.

## 2.5. L'utilisation des interfaces

### 2.5.a. Le module d'exécution du clavier

L'utilisation de la plateforme SoKeyTo pour la conception d'interfaces génère l'ensemble des fichiers suivants (Figure 112) qui permettent l'utilisation des interfaces générées par SoKeyTo. Le fichier ClavierExe.jar codé en java lit le fichier Interface.xml afin d'afficher l'interface et associe les fonctions aux touches. Le fichier config.ini contient les options de configuration décrites ci-dessus.



**Figure 112 : Fichier pour l'utilisation**

### **2.5.b. Le module des traces d'utilisation**

L'utilisation des interfaces de la plateforme SoKeyTo produit des traces d'utilisation dans un fichier.xml. Ce dernier suit une DTD décrite dans l'Annexe 5 « Description du fichier DTD des traces ». L'utilité de ces traces est d'identifier les fonctionnalités les plus utilisées par la personne et à terme d'inférer des agents d'adaptation des valeurs de configuration du profil utilisateur.

### **2.6. Module d'évaluation théorique**

Il n'y a pas eu de développement de nouvelles métriques par rapport à la version 2 de la thèse de F. Vella (Modèle de Souckoreff et Mackenzie, 1995), loi de Hick-Hyman (Hick, 1952, Hyman 1953), loi de Fitts [Fitts, 1954] et modèle de KLM [Card, 1980], [Kieras, 1993] et de Vella [Vella et Vigouroux, 2017].

L'utilisation de ces métriques devrait nous permettre de classer les solutions d'interaction en fonction du type de handicap et ainsi permettre de fournir des recommandations pour le développement de nouvelles interfaces, ou d'améliorer les interfaces actuelles.

L'intégration de nouvelles fonctionnalités ou de nouveaux besoins de configuration dans la plateforme SoKeyTo pourra être complétée des besoins exprimés par les personnes.

Nous allons l'appliquer dans deux projets avec des méthodes de conception centrée utilisateur.

## **3. HandyMathKey**

Nous avons utilisé la plateforme SoKeyTo pour la conception du clavier HandiMathKey. Il s'agit d'un clavier pour l'écriture de formules mathématiques pour des collégiens et lycéens. En premier le contexte et le cahier des charges seront présentés. Puis nous rapporterons les

résultats d'une introspection cognitive dont l'objectif est de présenter les avantages et les inconvénients de solutions existantes. Nous présenterons ensuite la démarche de conception itérative mise en œuvre qui a débouché sur différentes maquettes. La maquette HandiMathKey collégien a fait l'objet d'une évaluation auprès de 12 personnes valides et 1 personne en situation de handicap moteur des membres supérieurs.

### 3.1. L'expression de la demande

Dans le cadre de la convention appelée Handinnov' (<https://www.irit.fr/handinov>) entre l'IRIT et l'ASEI (<http://asei.asso.fr>) qui a pour but la conception, l'adaptation et l'évaluation des systèmes d'aide à la communication pour des personnes en situation de handicap cognitif, gestuel et langagier, une demande a été formulée par l'ASEI pour concevoir un clavier virtuel, permettant de faciliter l'écriture de formules mathématiques pour les élèves de niveau collège et lycée en situation de handicap moteur des membres supérieurs, dyslexiques avec ou sans troubles visuels. Ces élèves sont âgés de 10 ans à 20 ans. Ils sont encadrés par des professeurs, des ergothérapeutes et des orthophonistes. Ce personnel est présent pour aider les élèves à la prise en main et l'utilisation d'aides techniques qui améliorent leur autonomie.

Les éducateurs et les personnels médico-sociaux ont rapporté que les élèves ont des difficultés pour la saisie de formules mathématiques avec les outils de saisie des traitements de texte. Il est, notamment, observé de nombreux déplacements et sélections de touches pour arriver à saisir la formule mathématique, ce qui rend cette saisie très lente, fastidieuse voire fatigante pour les élèves. Cette difficulté a pour conséquence une perte d'intérêt dans l'apprentissage des mathématiques par les élèves puisque lorsqu'ils copient leurs cours ou qu'ils font des exercices de mathématiques, la saisie leur prend la majorité de leur temps, ce qui amène à une frustration et à une perte d'autonomie.

Face à ces problèmes, le Centre Jean Lagarde de l'ASEI a formulé la demande de la conception d'un outil, tout en un, adapté aux exigences d'enseignement du niveau collège et lycée. Celui-ci doit être accessible et paramétrable pour saisir directement dans l'application Word Office ou Open Office Writer. Il doit être doté d'une interface visuelle, avec des

couleurs d'identification des touches de sous-thématiques des mathématiques, et de différentes options d'accessibilité.

Cette interface pourra être aussi utilisée par les professeurs de mathématiques de l'ASEI pour la rédaction des exercices ou la rédaction des cours sur leurs ordinateurs.

### 3.2. Démarche méthodologique

Pour le développement des deux versions de HandiMathKey (version collège versus version lycée) nous avons utilisé la plateforme SoKeyTo et la méthode centrée utilisateur pour répondre aux différents besoins. Au préalable, nous avons effectué une introspection cognitive.

#### 3.2.a. Introspection cognitive des solutions existantes

L'objectif de cette introspection cognitive est de définir les avantages et les inconvénients des principales applications permettant de saisir une formule mathématique. Pour cela nous avons testé nous-mêmes les 10 applications.

Nous les avons classifiées en trois classes d'outils de saisie de formules mathématiques :

- Ceux de la première classe sont inclus dans Word Office et OpenOffice Writer comme Dmaths<sup>15</sup>, MathType<sup>16</sup>, MathMagic<sup>17</sup>, Rapid Pi<sup>18</sup>;
- Ceux de la seconde sont des applications Web comme Wiris Editor<sup>19</sup>, ShareMath<sup>20</sup>, Daum Equation Editor<sup>21</sup>;
- Ceux de la troisième sont des applications indépendantes de l'éditeur de texte telles que GeoGebra<sup>22</sup>, MathCast<sup>23</sup>, Math-o-mir<sup>24</sup>.

---

<sup>15</sup> <https://www.dmaths.org/>

<sup>16</sup> <http://www.dessci.com/en/products/mathtype/>

<sup>17</sup> <http://www.mathmagic.com/>

<sup>18</sup> <http://trident-software-pty-ltd.software.informer.com/>

<sup>19</sup> <http://www.wiris.com/editor>

<sup>20</sup> <http://sharemath.com/>

<sup>21</sup> [http://s1.daumcdn.net/editor/fp/service\\_nc/pencil/Pencil\\_chromestore.html](http://s1.daumcdn.net/editor/fp/service_nc/pencil/Pencil_chromestore.html)

<sup>22</sup> <https://www.geogebra.org/?lang=fr>

Le principal avantage de ces interfaces est la présence d'onglets qui permet d'afficher plusieurs symboles au même endroit à l'écran.

Les inconvénients identifiés sont :

- 1) De trop petites touches ;
- 2) Une interface virtuelle trop grande ;
- 3) Aucune de ces solutions ne permet d'écrire directement dans Word Office et OpenOffice Writer.

Ce dernier inconvénient est identifié comme une source importante de fatigue et de surcharge cognitive. De plus, certains symboles demandés par les enseignants ne sont pas disponibles dans les solutions étudiées.

### ***3.2.b. Conception des claviers mathématiques***

C'est au travers de réunions avec des membres de l'ASEI (ergothérapeutes, professeurs de mathématique et de physique-chimie) et des chercheurs en Interaction Homme-Machine de l'IRIT qu'un cahier des charges a pu être écrit. La méthode de conception de cette interface est définie dans la Figure 113. Ce sont les professionnels qui sont au centre du processus de conception puisqu'ils connaissent bien les élèves et seront eux-mêmes de potentiels utilisateurs. Le clavier HandiMathKey comporte la liste des symboles et fonctions mathématiques de niveau collège ou lycée à saisir.

Une première maquette a été élaborée avec la plateforme SoKeyTo (Figure 114). Cette maquette est partie de l'idée d'une augmentation du pavé numérique d'un clavier. Dans le cahier des charges des claviers mathématiques, en plus des chiffres, des lettres latines et de certaines lettres grecques, une soixantaine de symboles ou fonctions étaient demandés pour le niveau collège et une quinzaine de plus pour le niveau lycée.

---

<sup>23</sup> <http://mathcast.sourceforge.net/home.html>

<sup>24</sup> <http://gorupec.awardspace.com/mathomir.html>

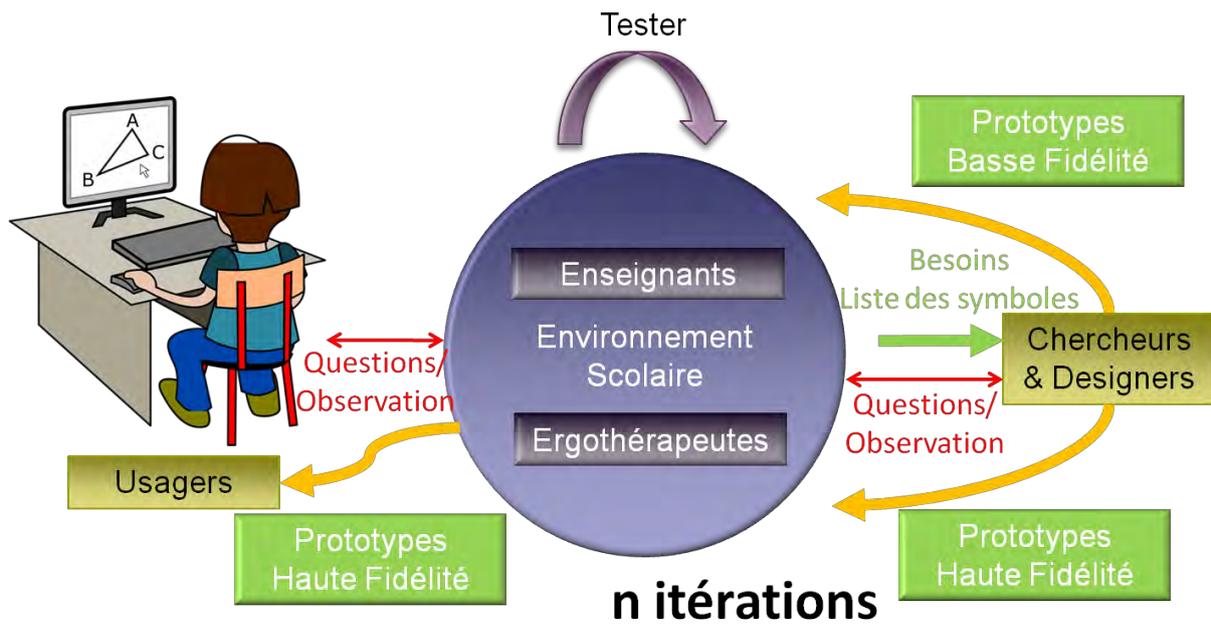


Figure 113 : Méthode de conception centrée utilisateur HandiMathKey

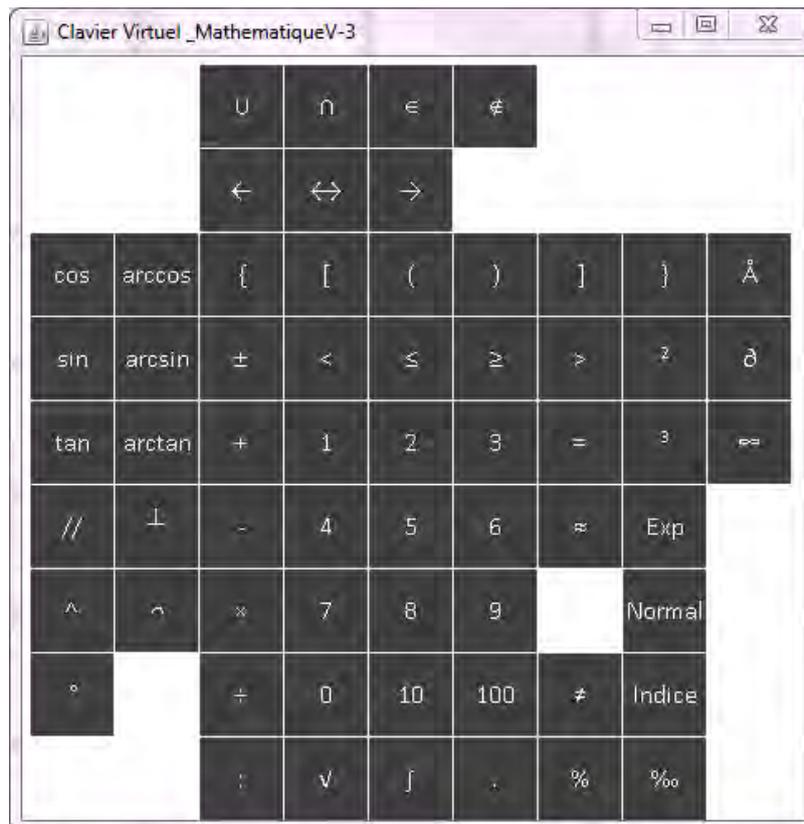


Figure 114 : Première version d'un clavier mathématique

A partir de cette maquette (Figure 114), différents prototypages basse fidélité ont été réalisés en tenant compte des remarques et des recommandations apportées par les membres de l'ASEI.

Etant donné le nombre élevé de symboles et de fonctionnalités demandés, nous avons proposé de créer un clavier multicouche. Nous gardons une zone fixe et une structure en onglets qui permettent d'afficher les symboles par thème mathématique. L'élève pourra choisir son thème (donc son onglet) en fonction du cours. Ce choix de conception est soutenu par un souhait de réduire la taille et la complexité du clavier. Ceci est conforté par la loi de Hick-Hyman [1952,1953], qui dit, que plus le nombre d'éléments affichés est important plus le temps de recherche visuel est important. Le fait de diminuer le nombre d'éléments affichés, devrait permettre de diminuer le temps de recherche de la fonction voulue. En collaboration avec les enseignants, nous avons fait une classification en cinq thèmes : calcul, géométrie, trigonométrie, probabilité et statistique, fonction mathématique.

Cette étape de prototypage a abouti à l'utilisation d'une grille de dix cases sur dix, où une case représente une touche et a deux prototypes différents, pour l'interface de niveau collègue. La Figure 115 représente la partie statique de l'interface. Celle-ci permet d'être constamment affichée et utilisée quel que soit le thème mathématique. La Figure 116 illustre une partie dynamique de l'interface ; ici c'est la partie géométrie/ trigonométrie qui s'affiche en sélectionnant son onglet.

Partie commune du clavier

Géo	Trigo	Proba	Fonct	$\alpha$			←	Suiv	Fin
			$\frac{\square}{\square}$	$\sqrt{\square}$	$\square^2$	$\square^3$	$\infty$	Exp	
			(-)	7	8	9	+	±	<
			[ ]	4	5	6	-	=	≤
			{ } ⌊ ⌋	1	2	3	x	≈	≥
			;	,	0	10 <sup>□</sup>	÷	≠	>
			%	$\pi$			:	Indic	

Figure 115 : Prototype papier n°1

	Trigo	cos	cos <sup>-1</sup>	$\square^{\square}$					
	Proba	sin	sin <sup>-1</sup>	$\square^{\square}$					
		tan	tan <sup>-1</sup>						
Géo	Fonct						←	Suiv	Fin
∪	$\square^{\square}$	$\square^{\square}$	$\frac{\square}{\square}$	$\sqrt{\square}$	$\square^2$	$\square^3$	$\infty$	Exp	
∩	$\square^{\square}$	$\square^{\square}$	(□)	7	8	9	+	±	<
∈	$\square^{\square}$	$\square^{\square}$	[ ]	4	5	6	-	=	≤
∉	←	$\square^{\square}$	{ } ⌊ ⌋	1	2	3	x	≈	≥
//	→	$\square^{\square}$	;	,	0	10 <sup>□</sup>	÷	≠	>
⊥	↔	cm		%	$\pi$		:	Indic	

Géométrie + Trigonometrie

Figure 116 : Prototype papier n°2

### 3.2.c. Prototypes haute-fidélité

A partir de la plateforme SoKeyTo, un prototype haute-fidélité a été créé pour le collègue (Figure 117).



Figure 117 : Version finale de l'interface Collège

Cette version est inspirée du prototype papier n°1, étant donné que les membres de l'ASEI l'ont préféré au prototype papier n°2. Les évolutions majeures, que nous allons décrire ci-dessous, nous ont permis d'arriver à l'interface visible sur la Figure 117.

### 3.2.c.i. La coloration des touches

Pour rendre cette interface attrayante pour les élèves de l'ASEI, il a été demandé qu'elle soit colorée. Il a été retenu du bleu et de l'orange pour les fonds des touches et le blanc pour les symboles afin de maximiser le contraste. Par contre, un fond noir a été choisi pour les touches d'actions avec une inscription en orange du symbole pour bien les différencier des touches de saisie.

### 3.2.c.ii. La coloration du label des onglets

Pour bien matérialiser l'onglet qui est sélectionné, le label se colore en turquoise (un bleu différent de celui des touches de saisie) pour permettre une visualisation rapide de l'onglet affiché.

### 3.2.c.iii. La séparation physique des différentes parties

Lors d'une réunion à l'ASEI, il a été demandé d'espacer les différentes zones de l'interface pour bien matérialiser leur identification.

### 3.2.c.iv. L'ajout des touches "Espace", "Entrée" et "Effacer"

Même si elles n'avaient pas été initialement demandées dans le cahier des charges, des essais de la première version (Figure 114) de l'interface ont permis de montrer leur grande utilité lors de la saisie d'une formule mathématique dans un document de texte.

### 3.2.c.v. L'ajout d'un clavier AZERTY

Il était prévu que l'on puisse saisir les lettres alphabétiques et des lettres grecques, en minuscules et majuscules. Il a fallu ajouter un clavier virtuel de saisie, de type AZERTY, pour éviter à la personne d'avoir à utiliser une interface supplémentaire pour écrire des lettres. Cela surcharge l'écran. Ce clavier a été ajouté au-dessus de la partie mathématique. Cela réduit l'affichage de l'interface et l'espace de rédaction de la feuille de texte de Word (Figure 118 à gauche). En effet, si un clavier AZERTY avait été sur la gauche comme prévu initialement, HandiMathKey aurait caché une grande partie de l'espace de rédaction (Figure 118 à droite). Sur la figure 120 le cadre noir représente l'espace occupé par le clavier HandiMathKey.

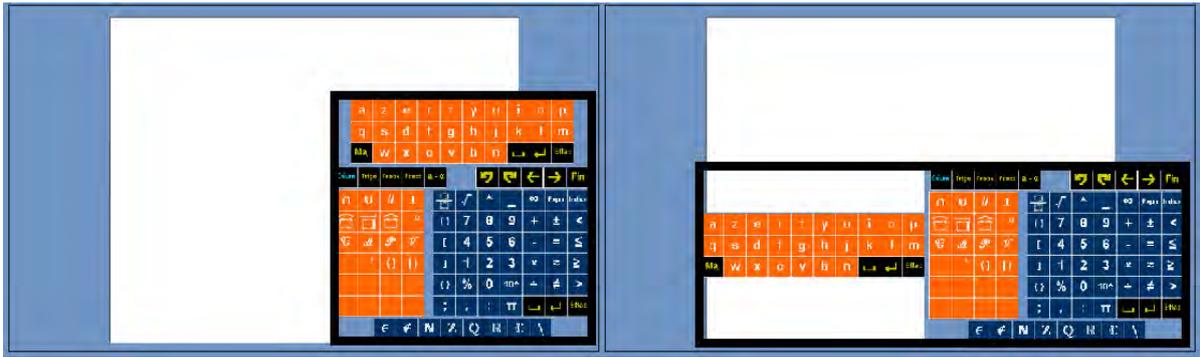


Figure 118 : Espace visuel utilisé par l'interface HandiMathKey

### 3.2.c.vi. HandiMathKey niveau lycée

La version Lycée a pour base les mêmes symboles que la version collège complétée de l'ensemble des nouveaux symboles nécessaires au lycéen. L'encadré en noir de la Figure 119, permet d'identifier les symboles ajoutés dans l'onglet "Fonct".

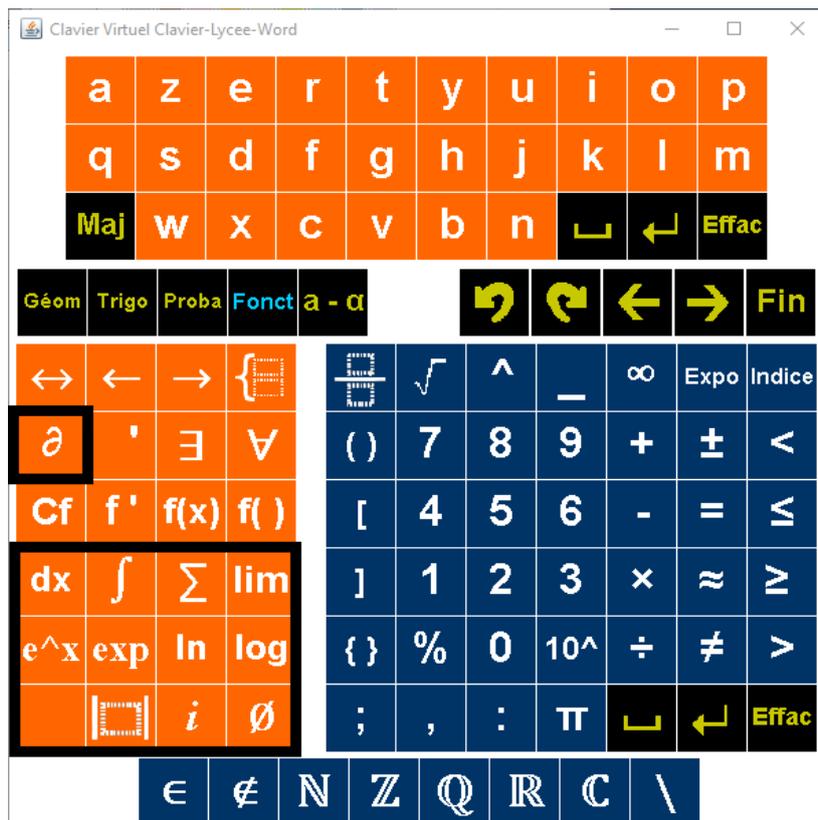


Figure 119 : Version Lycée HandiMathKey

### **3.2.d. Fonctionnement**

HandiMathKey permet :

- soit de saisir des chiffres, des lettres et des symboles mathématiques comme un clavier physique normal ;

soit de saisir des symboles plus complexes (voir Annexe 7 Liste des fonctions du protocole HandiMathKey), au moyen de macros Word, que nous avons élaborés.

### **3.3. Evaluations d'HandiMathKey**

Nous avons réalisé deux études : une étude de cas et une évaluation avec 12 personnes valides.

#### **3.3.a. Population d'étude**

Pour l'étude de cas, la personne en situation de handicap moteur est atteinte d'une amyotrophie spinale de degré 2. Son niveau de connaissance est Bac+8 (doctorat).

Pour interagir avec son ordinateur, elle utilise quotidiennement un trackball. Celle-ci lui permet d'écrire du texte avec un clavier virtuel. Ce trackball sera le dispositif de commande de HandiMathKey. Elle n'a eu aucune utilisation préalable de cet HandiMathKey. Cette évaluation repose sur un protocole d'expérimentation.

12 personnes valides novices dans l'écriture de formules mathématiques sous Word, sans aucune connaissance de l'interface HandiMathKey ont été recrutées. Ces 12 personnes sont droitières avec un âge moyen de 40 ans (de 25 à 60 ans, Ecart-Type de 13 ans). Le matériel utilisé est sur un EliteBook 8530p, avec Word 2007 et une souris "HP USB 3 Button Optical Mouse".

#### **3.3.b. Apparatus**

L'objectif de ces études est de comparer, dans un document Word, les performances de la saisie de formules mathématiques faite au moyen du clavier virtuel mathématique HandiMathKey de niveau collège, de celle faite avec les fonctionnalités proposées par Word. Nous souhaitons étudier le comportement d'interaction d'une personne en situation de handicap, de même que celle d'une personne valide, avec notre système.

Dans cette expérimentation, deux applications sont utilisées par chacun des participants :

#### Application 1 : Outils proposés par Word

L'application 1 comprend toutes les fonctionnalités proposées par l'éditeur de texte Word et plus précisément l'insertion de symboles (pour tous les opérateurs et autres symboles particuliers) et l'insertion d'équations (pour toutes les fonctions et accentuations). Pour les caractères numériques et alphabétiques, la personne utilisera de manière indifférenciée le clavier physique (participant valide et novice) ou le clavier virtuel de Windows (personne en situation de handicap) en fonction de ses aptitudes.

#### Application 2 : HandiMathKey Collège

Cette interface virtuelle s'affiche à l'écran. Elle peut être placée n'importe où sur l'écran et sa taille peut être modifiée en utilisant le même procédé que pour une fenêtre Windows normale. Cette interface contient des touches qui permettent d'afficher, sur un document Word, des caractères ainsi que des symboles et des fonctions mathématiques. Des touches permettent de se déplacer dans le document Word ou d'effectuer diverses actions (effacer un caractère, annuler une action, rétablir une frappe). La saisie selon la préférence des personnes pourra se faire avec l'utilisation du clavier physique ou du couple (interface HandiMathKey, souris).

L'interface HandiMathKey Collège propose deux principes de saisie : l'insertion directe d'un ou plusieurs caractères/symboles et l'insertion d'une zone d'équation Word.

Les fonctions (racine carrée, fraction, puissance de dix, système à deux équations), les accentuations (angle, vecteur, arc de cercle, moyenne) et les fonctions trigonométriques inverses ( $\cos^{-1}$ ,  $\sin^{-1}$ ,  $\tan^{-1}$ ) reposent sur le second principe de saisie. Pour limiter la taille du corpus des « formules de découverte », les exercices porteront uniquement sur la racine carrée, la fraction et la puissance de dix.

Après une phase de découverte de l'utilisateur, Il sera demandé d'écrire les formules mathématiques affichées à l'écran dans l'éditeur de texte Word, selon le système retenu. Le corpus de tests se compose de 5 parties (général, géométrie, trigonométrie,

probabilités/statistiques, fonctions). Une pause sera proposée aux participants après chaque partie. Le détail des formules à saisir est décrit en (Annexe 7 Liste des fonctions du protocole HandiMathKey). Les corpus se composent pour l'apprentissage de 14 symboles mathématiques, 55 chiffres numériques et lettres, 23 fonctions, et pour la partie évaluée de 166 symboles mathématiques, 486 chiffres numériques et 147 fonctions. La séquence de saisie est la même pour tous dans l'ordre des formules proposées en Annexe 7 Liste des fonctions du protocole HandiMathKey.

### 3.3.c. Variables dépendantes et variable indépendante

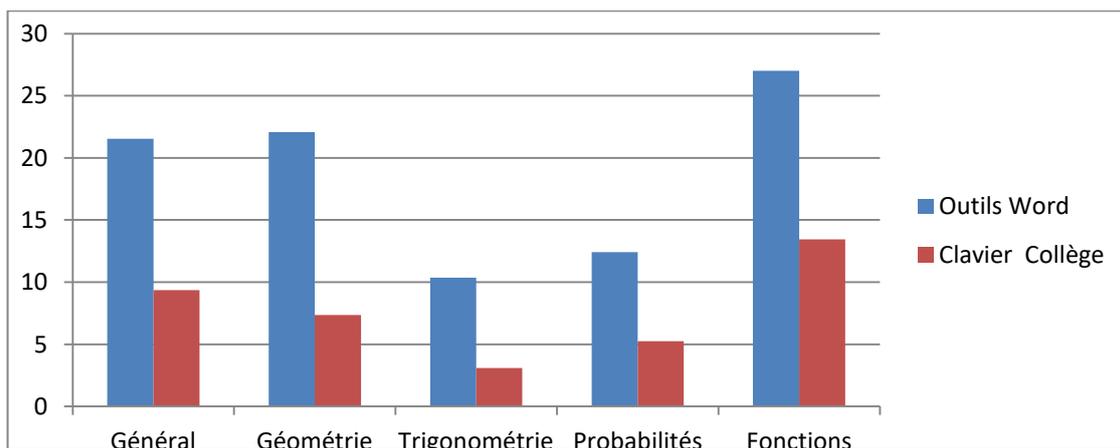
Pour mesurer la performance nous avons retenu trois variables dépendantes : le temps, la distance parcourue et le nombre de sélections de touches réalisées pour la saisie des formules mathématiques.

La variable indépendante est l'outil utilisé : Interface HandiMathKey ou les outils de Word.

### 3.3.d. Résultats

#### 3.3.d.i. Etude de cas

La Figure 120, la Figure 121 et la Figure 122 présentent respectivement les trois variables dépendantes.

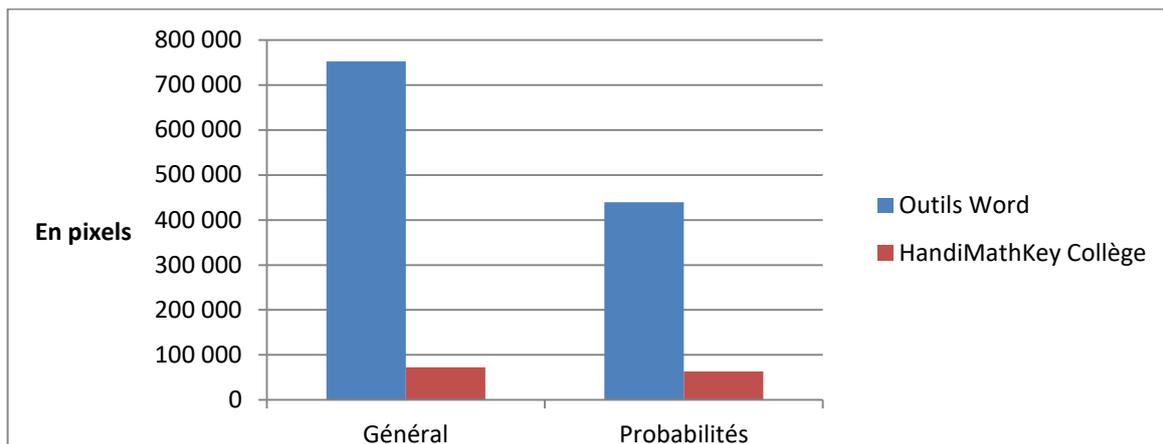


**Figure 120 : Temps de saisie, en minutes, de l'ensemble des formules mathématiques pour chacune des parties**

La Figure 120 rapporte le temps mis pour recopier toutes les formules mathématiques de chaque document de test, avec les outils Word et avec l'interface Collège. On remarque que

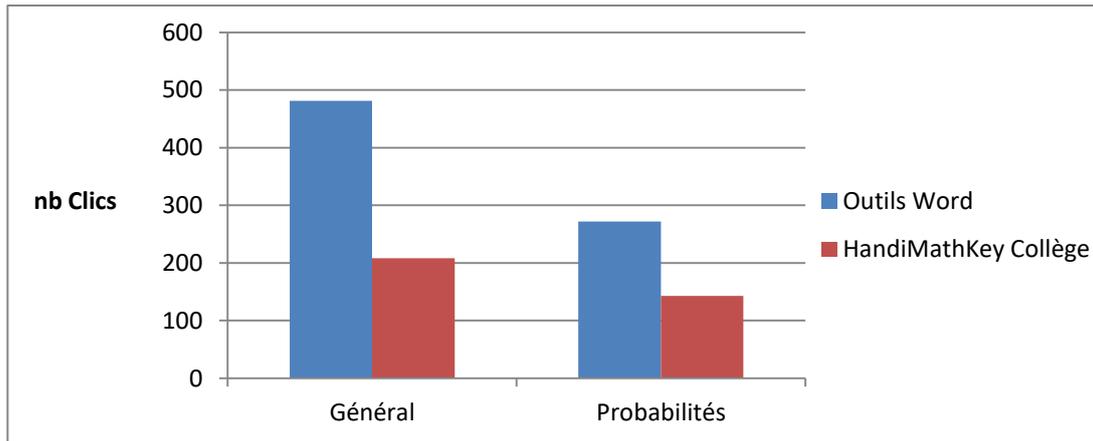
le temps de saisie avec l'interface mathématique Collège est en moyenne plus de deux fois inférieur à celui réalisé avec les outils Word, pour toutes les parties.

Nous allons maintenant faire un focus uniquement sur les parties « général » et la partie « probabilités ». L'enregistrement des traces au moyen de l'outil "INPUTLOG" utilisé pour Word n'a pas fonctionné lors de l'écriture de certaines formules.



**Figure 121 : Distance en pixels, parcourue par le curseur lors de la saisie des formules mathématiques pour les parties "Général" et "Probabilités"**

Le Figure 121 rapporte la distance parcourue par le curseur, lors de la saisie des formules mathématiques, avec les outils Word et avec l'interface mathématique Collège. Cette figure montre qu'en utilisant les outils Word, la distance parcourue par le curseur est plus de dix fois supérieure pour la partie "Général" et presque sept fois supérieure pour la partie "Probabilités", à celles mesurées en utilisant l'interface virtuel Collège.



**Figure 122 : Nombre de sélections de touches effectué lors de la saisie des formules mathématiques pour les parties "Général" et "Probabilités"**

La Figure 122 présente le nombre de sélections de touches nécessaire à la saisie des formules mathématiques. On peut voir que la valeur recueillie lors de l'utilisation de l'interface Collège, est d'environ deux fois inférieure à celle recueillie lors de l'utilisation des outils Word.

Sur cette étude de cas nous observons que les 3 variables analysées sont à l'avantage de l'interface HandiMathKey. L'interface Collège permet de mettre moins de temps, de faire moins de déplacements et moins de sélections de touches pour saisir une formule mathématique sur l'éditeur de texte Word, qu'avec les outils offerts par ce dernier.

### 3.3.d.ii. Retours de l'étude de cas

Différents retours ont été émis par le participant. Ces derniers concernent les outils de Word, l'interface HandyMathKey et la stratégie de saisie des formules. Pour commencer voici quelques verbatim du participant :

- Verbatim « Le clavier permet une écriture naturelle, exactement comme à la lecture de la formule » (Interface HandyMathKey Collège).
- Verbatim « A chaque fois il faut cliquer sur Insertion, je déteste, ça fatigue car il y a beaucoup de trajets à faire » (Outils Word).

### *Pour les outils Word*

Les principaux commentaires émis lors de l'utilisation des outils Word concernent la fatigue provoquée par les grandes distances de déplacement entre le clavier virtuel Windows et le menu Word, et le grand nombre de manipulations à faire. Ils portent aussi sur la mauvaise organisation des symboles mathématiques et sur la présence d'un trop grand nombre de symboles qui ne sont pas utilisés au niveau collègue.

### *Pour l'interface mathématique Collège*

Lors de l'utilisation de l'interface HandiMathKey Collège, les commentaires sont plutôt positifs ; 1) l'écriture d'une formule se fait de manière naturelle, exactement comme à la lecture de celle-ci ; 2) tous les symboles et fonctions nécessaires à la saisie d'une formule mathématique se trouvent dans une même interface ; 3) la saisie des dernières formules est moins fatigante avec l'interface HandiMathKey qu'avec les outils Word.

### *Stratégies de saisie*

Le participant a utilisé 2 stratégies pour l'écriture de formules mathématiques. Avec l'outil Word, il saisit toutes les fonctions composant la formule, puis tous les symboles et enfin les lettres et les chiffres. Par exemple, pour la formule :

$$\frac{5}{2} \times \frac{9}{2} \times \frac{1}{2} = \frac{45}{8}$$

Il a d'abord inséré toutes les fractions de la formule puis placé tous les symboles "×", en utilisant les flèches du clavier virtuel de Windows pour se déplacer. Enfin, il a placé son curseur en fin de formule et a rempli les fractions avec les chiffres, en utilisant la flèche de gauche pour se déplacer dans la formule.

La deuxième stratégie a été développée avec le clavier mathématique Collège pour saisir cette même formule : il a d'abord inséré une fraction, ce qui lui a permis d'écrire directement dedans. En utilisant la flèche de droite du clavier virtuel il a écrit la valeur du bas, puis est sorti de la fraction avec la touche "Fin". Il a ensuite inséré le symbole "×", puis de nouveau il a saisi la fraction avec la même stratégie jusqu'à la fin de la saisie de la formule.

La première méthode de saisie n'est pas intuitive puisqu'elle ignore le sens de lecture pour améliorer l'écriture à cause des contraintes de déplacement du curseur que provoque l'outil Word. La seconde méthode de saisie est utilisable avec l'éditeur Word et le clavier mathématique HandiMathKey qui permet de conserver le même sens de lecture et d'écriture.

### 3.3.d.iii. Etude sur des personnes valides

Pour les 12 personnes valides nous avons alterné l'ordre des interfaces, 6 ont commencé avec Word, et les 6 autres avec HandiMathKey, et nous avons étudié les trois mêmes variables dépendantes.

Un enregistreur de log a été créé pour récupérer le nombre de clics souris et le nombre de frappes au clavier : la somme des deux représente le nombre d'actions réalisées. Il récupère aussi la distance et le temps.

Nous avons appliqué un test de Wilcoxon car c'est un test statistique non paramétrique qui permet de tester l'hypothèse selon laquelle la distribution des données est la même dans deux groupes ce qui permet de créer une notion de rang entre deux variables. La Figure 123 montre une différence significative avec des significativités de 2 à 3 étoiles ( \* 0,1 > p-value ; \*\* 0,05 > p-value ; \*\*\* 0,01 > p-value ) dans l'utilisation d'HandiMathKey et Word. HandiMathKey offre un gain de temps de 35,62% par rapport à Word. HandiMathKey diminue donc le temps d'écriture de formules mathématiques pour des personnes valides.

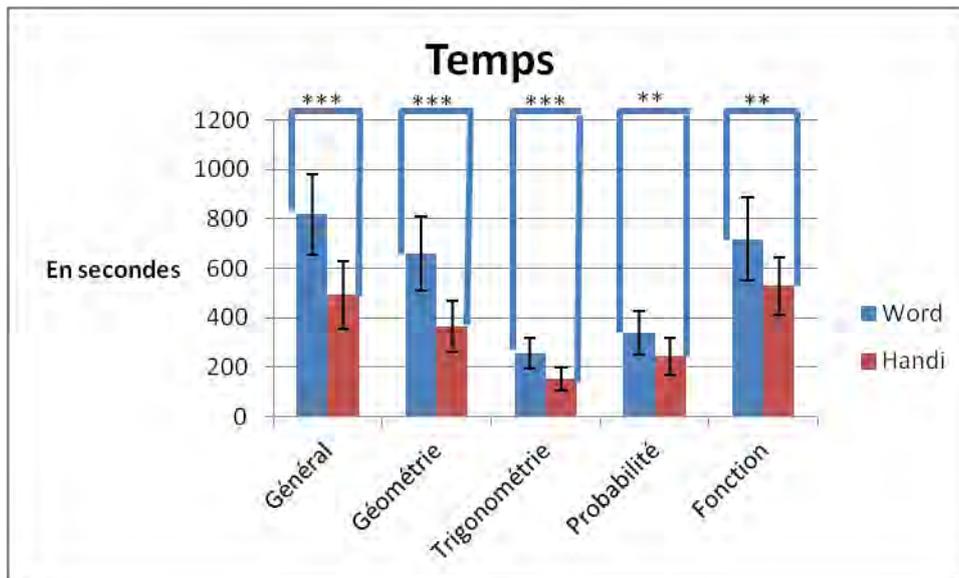


Figure 123 : HandiMathKey - étude du temps avec les personnes valides

La deuxième variable étudiée est le nombre d'actions pour écrire des formules mathématiques avec HandiMathKey (Figure 124). Les tests statistiques de Wilcoxon montrent une différence significative de 3 \* pour la variable nombre d'actions quelle que soit la session d'exercices à recopier. HandiMathKey permet un gain de 47,85% d'actions en moins par rapport à Word.

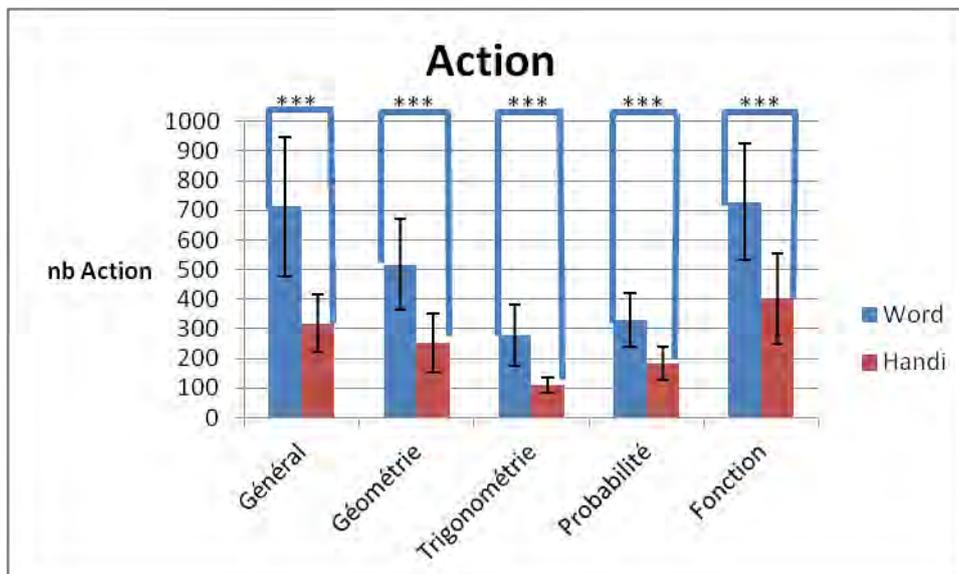


Figure 124 : HandiMathKey - étude du nombre d'actions avec les personnes valides

Nous avons ensuite étudié la variable distance parcourue lors d'une session. Les sessions « Général » et « Géométrie » ont une significativité de 2 étoiles et seulement de 1 étoile pour la session « trigonométrie ». Pour la session « Probabilité » et la session « Fonction », le test de Wilcoxon n'est pas significatif. En moyenne les personnes ont parcouru 15,80% de pixels en moins avec HandiMathKey. Pour le problème de significativité, nous avons une hypothèse. L'hypothèse est que les sessions « Probabilité » et « Fonction » comprennent plus de caractères que l'on peut saisir avec le clavier physique. Pour cela, nous allons étudier la distance moyenne parcourue pour effectuer un clic (Figure 125). Le test de significativité de Wilcoxon montre une significativité de 3 \* et de 1 \* : il y a donc une différence significative entre les outils de Word et l'interface HandiMathKey. L'interface HandiMathKey permet un gain par clic de 37,9% par rapport aux outils Word pour le déplacement de la souris.

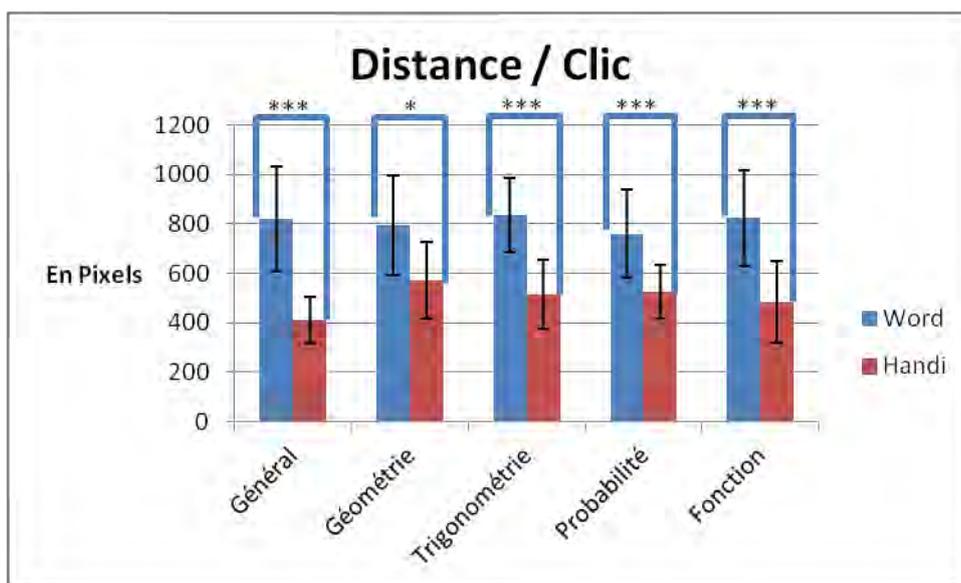


Figure 125 : La distance par clics pour les personnes valides sur HandiMathKey

#### 3.3.d.iv. Retour sur des personnes valides

Les retours des utilisateurs ont été recueillis au travers d'un débriefing. Ils ont permis de confronter la solution HandiMathKey aux outils de Word.

**Tableau 18 : Verbatim pour Word et HandiMathKey**

Verbatim pour Word	Verbatim pour HandiMathKey
<ul style="list-style-type: none"> <li>• "Word n'est pas assez confortable pour récupérer 1 élément, trop de blocs à ouvrir pour trouver ce que l'on cherche et trop de clics souris avec 1 visuel assez petit. Word n'est pas adapté pour les écritures scientifiques -&gt; perte de temps qui engendre de l'agacement"</li> <li>• "L'agencement des touches et fonctions de Word est un peu trop fourni, petit et paraît trop complet et de ce fait les touches sont trop nombreuses et paraissent plus compliquées"</li> <li>• "Tout est à revoir. TROP petit / TROP dur"</li> <li>• "TROP de perte de temps à chercher"</li> <li>• "Les touches de calculs devraient être plus accessibles"</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• "Le choix du clavier numérique, moins de manipulations à faire. Visuel plus confortable ce qui permet une rapidité d'actions"</li> <li>• "Handi plus rapide, plus personnalisable et plus abordable"</li> <li>• "Handi, touches plus rapide d'accès. On peut utiliser seulement la souris"</li> <li>• "plus ergonomique et plus logique"</li> <li>• "Handi est plus rapide car il y a moins de menus et sous menus"</li> <li>• "Handi est bien agencé, lisible, accessible très rapidement, simple"</li> <li>• "Chaque catégorie est adaptée sans 1000 fonctions superflues"</li> <li>• "Tout est en face, je vois tout"</li> </ul>

De l'ensemble des commentaires des utilisateurs novices, la préférence va vers notre solution HandiMathKey qui a été perçue comme une solution logique et intuitive pour l'écriture des formules mathématiques. A l'opposé, les outils de Word sont perçus comme une solution lente et compliquée à comprendre qui demande beaucoup de recherches pour écrire les différentes formules de mathématiques (Tableau 18).

### **3.3.e. Retours informels des membres de l'A.S.E.I**

Cette sous-section rapporte quelques retours des ergothérapeutes de l'ASEI sur le fonctionnement de la solution HandiMathKey.

- " *Félicitations pour tout le travail effectué et l'élaboration des divers documents mis à disposition ! Ils sont très complets et clairs, et m'ont permis de réaliser une installation sans difficulté sur mon poste à la maison (environnement Vista 32 bits) ça marche aussi ! "*

- " *Tout fonctionne correctement. Je démarre les pages de tests... et tout en l'utilisant, je me dis que les profs et les élèves vont apprécier votre outil ! "*

- " *1er retour rapide : lors de la saisie de 7 racine de 5, la fenêtre de l'éditeur cache le début du texte saisi (ici le 7) ce qui peut déstabiliser l'utilisateur. Je ne sais pas si cela peut se modifier... de toute façon, ce n'est pas associé au clavier visuel, il me semble. "*

- " *L'ergonomie visuelle est satisfaisante, par contre je ferais apparaître une nuance de couleur entre les deux claviers azerty et grec lorsque l'on utilise la touche a-alpha, je crains que cela ne soit l'objet de confusions. "*

- " *Ensuite la phase d'apprentissage sera indispensable auprès des élèves (notamment pour les indices/exposants et l'utilisation des flèches à ce moment-là, mais l'outil est facile à prendre en main. "*

Ces retours positifs montrent que, grâce à la conception centrée utilisateur, HandiMathKey a une meilleure utilisabilité que Word.

#### **3.4. Conclusion sur HandiMathKey**

La démarche de conception centrée utilisateur de HandiMathKey a permis une participation active des professeurs de mathématique. Les différentes phases de conception des interfaces mathématiques ont permis d'aboutir à deux versions : une pour le collège et une seconde pour le lycée.

La version collège de l'interface HandiMathKey a été comparée à l'écriture classique sous Word de formules mathématiques au cours d'une étude de cas. Cette étude démontre que l'interface collège HandiMathKey est plus performante que les outils de Word. Pour ce qui est des 12 personnes valides, toutes les variables sont à l'avantage de HandiMathKey avec des différences significatives.

Sur l'ensemble des tests conduits, le temps a été diminué de plus de 35% ce qui permet de donner comme hypothèse que notre solution permet aux élèves de passer plus de temps à écouter le contenu pédagogique qu'à écrire les formules de mathématiques.

Le nombre moyen de sélections pour atteindre l'élément à saisir a été divisé par deux. Ceci montre une optimisation du nombre de tâches que l'élève va effectuer et planifier pour

écrire ces formules de mathématique, de plus au débriefing, ce qui nous permet de dire que le clavier semble aussi plus efficace.

La distance parcourue sur l'interface HandiMathKey a été divisée de 7 à 10 fois par rapport aux outils de Word pour la personne en situation de handicap. Cette réduction de la distance peut se traduire par une réduction de la fatigue pour des personnes en situation de handicap. Il a été rapporté un sentiment de fatigue par notre participant pour l'utilisation de Word alors que pour le Clavier HandyMathKey, il n'a mentionné aucun signe de fatigue. Pour les personnes valides cette distance est moins évidente étant donné qu'elles peuvent utiliser l'interface physique pour écrire certains caractères. Toutefois les distances moyennes sont diminuées fortement pour atteindre la touche souhaitée avec l'interface HandiMathKey.

Par cette étude nous confirmons pour notre interface HMK les trois facteurs d'acceptabilité [A. Dillon et M. Morris 1999]. Nos hypothèses pour ces facteurs sont quasi confirmées, d'une part pour l'utilité car les interfaces répondent aux besoins des utilisateurs pour saisir des formules mathématiques de façon confortable. D'autre part le facteur utilisabilité a été montré aux travers de nos métriques d'évaluation, qui comparent HMK avec Word, donnant HMK comme le plus performant. Enfin pour le dernier facteur expérience utilisateur les questionnaires de satisfaction n'ont pas été transmis encore aux élèves. Mais une pré-étude montre la préférence pour HMK pour nos deux populations.

L'utilisation de la plateforme SoKeyTo, couplée à une mise en œuvre d'une méthode centrée utilisateur a permis de démontrer que la plateforme SoKeyTo est un outil de conception simple, complet qui permet facilement de considérer les spécifications de conception issues de chaque étape de la méthode de conception centrée utilisateur. De plus, que ce soit avec les 12 personnes valides ou avec la personne en situation de handicap, la préférence est donnée à HandiMathKey plutôt qu'à Word pour l'écriture de formules mathématiques.

### 3.5. Perspectives

Plusieurs perspectives sont envisageables pour ce projet. La première est d'adapter les claviers mathématiques pour une utilisation sur OpenOffice avec si possible le même fonctionnement que les macros Word pour conserver le même clavier. Il sera donc nécessaire de développer une configuration d'OpenOffice similaire à Word.

Une autre étude pourrait être faite en comparant LaTeX et HandiMathKey. En effet, les professeurs d'université et les étudiants en mathématiques nous ont fait un retour oral qui est : ils utilisent beaucoup LaTeX.

Des expérimentations devront être menées pour faire tester et évaluer ces claviers mathématiques par des élèves de collège et de lycée de l'ASEI, en situation de handicap moteur, dyslexiques avec ou sans troubles visuels, selon le même protocole expérimental. Il pourra aussi être évalué à l'IUT de Paul Sabatier et à l'université Paul Sabatier pour adapter une version universitaire puisque l'interface HandiMathKey vise à répondre à tous pour favoriser l'inclusion éducative.

## 4. Système CECI (Contrôle d'Environnement et Communication Intégrée)

### 4.1. Contexte

Les personnes en situation de handicap (tétraplégique, Locked In Syndrome et mutique) expriment le besoin de communiquer avec leur entourage et de contrôler leur environnement domotique au moyen d'un outil simple, accessible et intégré. De nombreuses technologies d'assistance sont commercialisées. Cependant, elles sont très coûteuses et ne répondent pas à tous les besoins. En l'absence de ces outils, ces personnes communiquent avec des gestes résiduels (Pouce, Yeux, etc.). Par conséquent, **comment concevoir une aide technique avec la méthode centrée utilisateur lorsque la personne est tétraplégique et mutique ? Et comment adapter la méthode de conception centrée utilisateur pour s'adapter à ces personnes ?**

Pour répondre à ces questions, dans un premier temps, nous allons donner la genèse du système de Contrôle d'Environnement et Communication Intégrée (dénommé CECI dans la suite du document), puis dans un second temps nous avons procédé à un état des lieux sur des sites commerciaux et à une recherche bibliographique en vue de définir les composants, les fonctionnalités et les options d'un système CECI. Dans un troisième temps nous expliquerons la méthodologie que nous avons mise en place ainsi que l'architecture du système CECI. En dernier, nous appliquerons notre méthodologie sur une personne atteinte de Locked In Syndrome. Cette mise en œuvre nous a permis d'améliorer à nouveau notre méthodologie.

## 4.2. La genèse du système CECI

Nous avons démarré une étude de cas : une famille est venue exprimer des besoins pour une personne en situation de handicap que nous nommerons Matthieu. Celui-ci est une personne tétraplégique mutique, avec troubles visuels associés. Ses seuls gestes de communication étaient deux mouvements du pouce pour signifier un « Oui » ainsi que des expressions faciales. Ses besoins exprimés étaient de pouvoir communiquer et de faire du contrôle d'environnement (regarder la télévision, éteindre la lumière, etc.) de manière autonome. Matthieu avait testé plusieurs communicateurs et contrôles d'environnement. Ces derniers étaient onéreux et ne répondaient pas totalement à ses besoins.

## 4.3. Etat des lieux des communicateurs et contrôles d'environnement

Le Tableau 19 présente des communicateurs et contrôles d'environnement existants dans le commerce et des prototypes de recherche. Nous avons synthétisé les principales caractéristiques pertinentes de chaque solution étudiée. Cette synthèse a été faite, soit par l'analyse des fiches techniques sur des sites trouvés à partir de Google, soit en testant directement la solution si cette dernière était téléchargeable et testable gratuitement.

**Tableau 19 : Synthèse des communicateurs et contrôles d'environnement**

Système	Caractéristiques pertinentes	Limite observée face aux besoins
Accessman avec Pictocom <sup>25</sup>	Une interface personnalisable Des techniques d'interaction complète Capacité de configuration dynamique Les avantages de Civikey Contrôle d'environnement par Infrarouge	Le contrôle d'environnement par radio
Control Omni <sup>26</sup>	Permet le contrôle d'environnement	Limité au téléphone intégré

<sup>25</sup> [www.access-man.com](http://www.access-man.com)

	Possède émetteurs infrarouge et radio	
HouseMate Control <sup>27</sup>	Permet le contrôle d'environnement Possède émetteurs infrarouge et radio	Version générique trop lourde avec trop d'outils
James 4 <sup>28</sup>	Permet le contrôle d'environnement Possède émetteurs infrarouge, radio, WLAN, GSM, GPS, Bluetooth. Configurable et personnalisable Adaptable aux besoins de la personne	Limiter au Smartphone
EDiTH [Souhir Ghedira 2009]	Réponse à des besoins utilisateur Communication Contrôle d'environnement Algorithme de fatigue pour le balayage	Plus de technique d'interaction
Autonomia [C.E. Steriadis et P. Constantinou, 2003]	Evaluation du balayage Liste de Prédiction Contrôle de l'environnement	Pouvoir ajouter de nouvelles fonctionnalités

A partir des besoins de Matthieu et de notre analyse (Tableau 19), nous allons répondre à ses besoins. Pour cela, nous avons mis en œuvre une méthode de Conception itérative centrée utilisateur à partir de scénarii d'usages sur son quotidien et de séances de brainstorming. Dans ce deuxième contexte, nous avons également utilisé la plateforme SoKeyTo afin de faire du prototypage rapide répondant aux besoins exprimés par la personne.

<sup>26</sup> <http://www.cree.fr/>

<sup>27</sup> [www.domodep.com](http://www.domodep.com)

<sup>28</sup> [www.domodep.com](http://www.domodep.com)

#### 4.4. La méthode de conception pour Matthieu

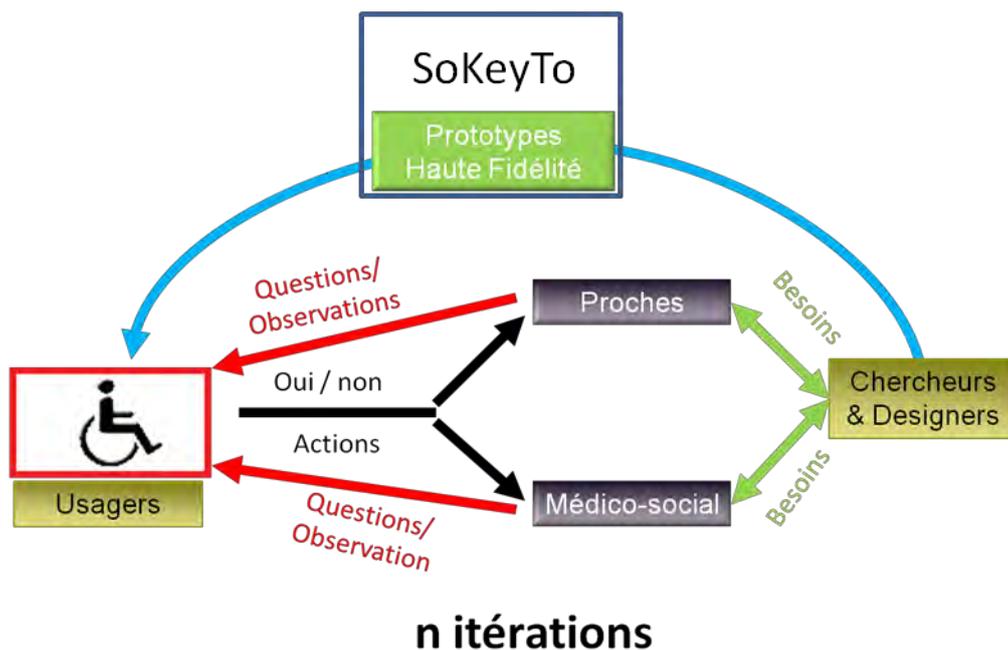


Figure 126 : Notre approche de Conception

Nous avons mis en œuvre une méthode de conception itérative (Figure 126) qui a impliqué sa famille, son équipe médico-sociale et une équipe de recherche en interaction homme-machine. Pour que Matthieu énonce ses besoins, les proches et l'équipe médico-sociale lui posaient des questions et il répondait par oui ou par non en déplaçant son pouce de haut en bas (2 fois pour dire oui) et avec des expressions faciales. Les proches et l'équipe médico-sociale (famille, amis et aide de vie) nous ont rapporté ses besoins. De ces derniers, nous avons conçu un prototype haute-fidélité (prototypes HF). Le cycle était à nouveau itéré pour améliorer le système. Deux itérations ont eu lieu :

La première a concerné :

- Le choix et l'amélioration des pictogrammes ;
- La validation de l'action, c'est-à-dire que comme Matthieu répond par oui en déplaçant son pouce de haut en bas 2 fois, il a fallu faire une validation en deux clics ;
- La configuration du balayage, c'est-à-dire paramétrer le délai de balayage et minimiser le nombre d'erreurs et de validations (quel que soit l'agencement) ;

La deuxième a concerné :

- L'ajout d'un feedback vocal pour aider Matthieu à avoir une représentation mentale de l'interface. En effet, Matthieu avait un problème d'attention visuelle ;
- L'ajout du mode invisible permettant la visualisation d'une vidéo en plein écran. Ce mode coupe la synthèse vocale et fait disparaître l'interface. Pour la faire réapparaître l'utilisateur fait une validation avec son contacteur.

Une fois que la toute première version conçue grâce aux itérations de la conception, nous avons réalisé un questionnaire de satisfaction (Annexe 11 Questionnaire de satisfaction de Matthieu). Les retours utilisateur nous ont permis de recueillir les nouveaux besoins exprimés dans le questionnaire :

- Amélioration du paramétrage de l'interaction de balayage ;
- Amélioration des feedbacks audio.

Cela a permis de définir les fonctionnalités du système CECI (communication et/ou contrôle d'environnement) et les paramétrages des techniques d'interaction appropriées (modes de commandes, retours et processus de mémorisation).

#### 4.5. L'architecture et l'interopérabilité du système CECI

Ce système est conçu en deux parties : un boîtier de commande (Figure 127) et de contrôle d'environnement et une interface virtuelle (Figure 128) générée avec la plateforme SoKeyTo.



Figure 127 : Boîtier de commande et de contrôle d'environnement

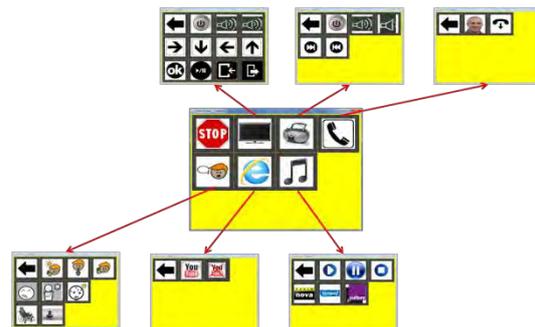


Figure 128 : Interface décomposée en sous-interfaces

La partie matérielle est principalement composée d'une carte Arduino Uno. Cette carte dispose d'une entrée jack, pour connecter un contacteur, et de deux leds. La première

s'allume lorsque l'utilisateur fait un clic avec son contacteur. Le second est l'émetteur infrarouge (IR) pour contrôler la domotique ou des médias (comme la TV, radio ...).

Une fois que le clic est envoyé par le contacteur, la carte Arduino Uno envoie les données au PC afin de contrôler le système de balayage. De plus, la carte est en mesure de recevoir et d'envoyer des commandes IR du PC (plusieurs protocoles sont mis en œuvre tels que NEC, Sony, RC5 et mode brut) ou de recevoir et d'envoyer des commandes radio. Nous avons fait le choix de choisir une technologie à faible coût pour la conception de notre système de balayage. En effet, ce faible coût permettra un remboursement total du système par des aides financières.

Afin de permettre aux interfaces et au boîtier de communiquer, nous utilisons le bus IVY [M. Buisson et al. 2002] qui est une application de communication inter-application. Une application envoie un message avec un identifiant et une application à l'écoute de cet identifiant prend le relais et traite le message.

Lorsque l'utilisateur clique, sur un bouton de l'interface virtuelle (par exemple pour allumer la télévision), celle-ci communique avec le boîtier. Les informations émises par l'interface transitent par le bus IVY et sont réceptionnées par l'application « CECI.jar ». Celle-ci va associer le média (ici la télévision) et la commande (allumer) au code Radio ou Infrarouge. Le code est envoyé au programme du boîtier qui exécute la commande. Ce principe de communication est illustré en la Figure 129.

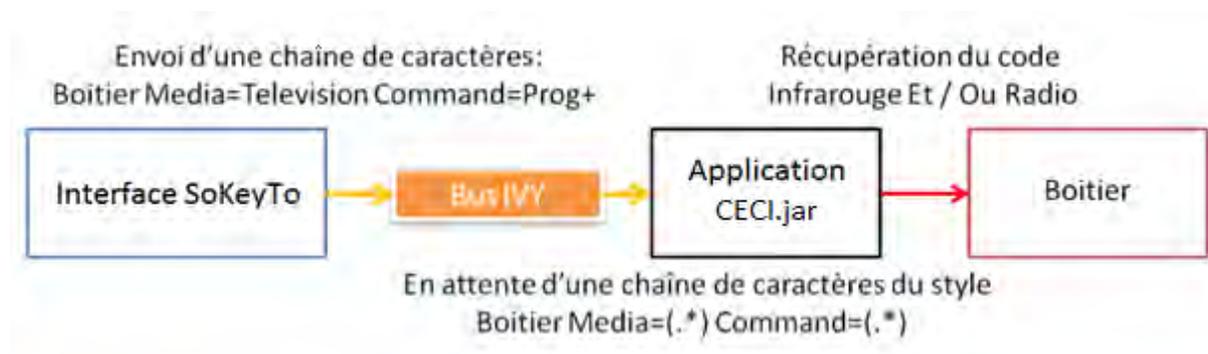


Figure 129 : Envoi d'une commande de contrôle d'environnement

Un autre mode de communication vient du Boitier vers l'interface générée par la plateforme SoKeyTo. Lorsque l'utilisateur appuie sur un contacteur branché sur l'un des jacks du boitier, l'application « CECI.jar » récupère le numéro du jack actionné. Elle associe alors le numéro du jack à une commande préalablement configurée (simulation d'actions de souris, par exemple click droit : macro clavier, CTRL+C pour copier par exemple). L'application « ClavierExe.jar » traite le click ce qui permet d'interagir avec les interfaces virtuelles générées par la plateforme SoKeyTo. De plus l'application « CECI.jar » peut également envoyer des combinaisons de touches à d'autres applications (exemple : CTRL+C pour copier).

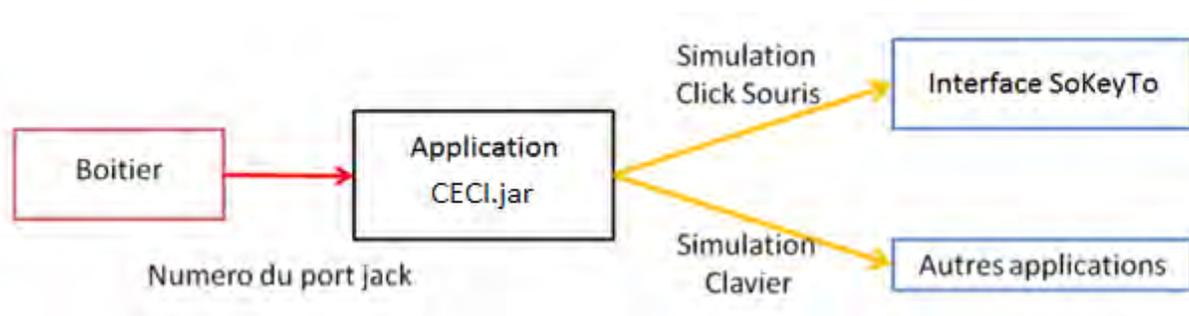


Figure 130 : Gestion de l'interaction sur les interfaces SoKeyTo avec le boitier

Ce boitier et ces interfaces de communication comme présentés ci-dessus nous permettent d'envisager des interfaces virtuelles de commande et de contrôle d'environnement.

#### 4.6. Conception de trois CECI

Pour réaliser une preuve de concept du système CECI et de l'approche de conception, nous allons les appliquer auprès de trois patients : une personne tétraplégique et deux personnes atteintes de Locked In Syndrome.

Pour pouvoir réaliser la conception des interfaces auprès des trois patients et pour simplifier le suivi et l'évolution des besoins, les ergothérapeutes nous ont demandé de concevoir une fiche des besoins et un questionnaire de satisfaction afin de faire évoluer les besoins de la personne en fonction de l'amélioration ou la dégradation de l'état du patient. A partir de là nous avons dû modifier notre schéma de conception (Figure 131).

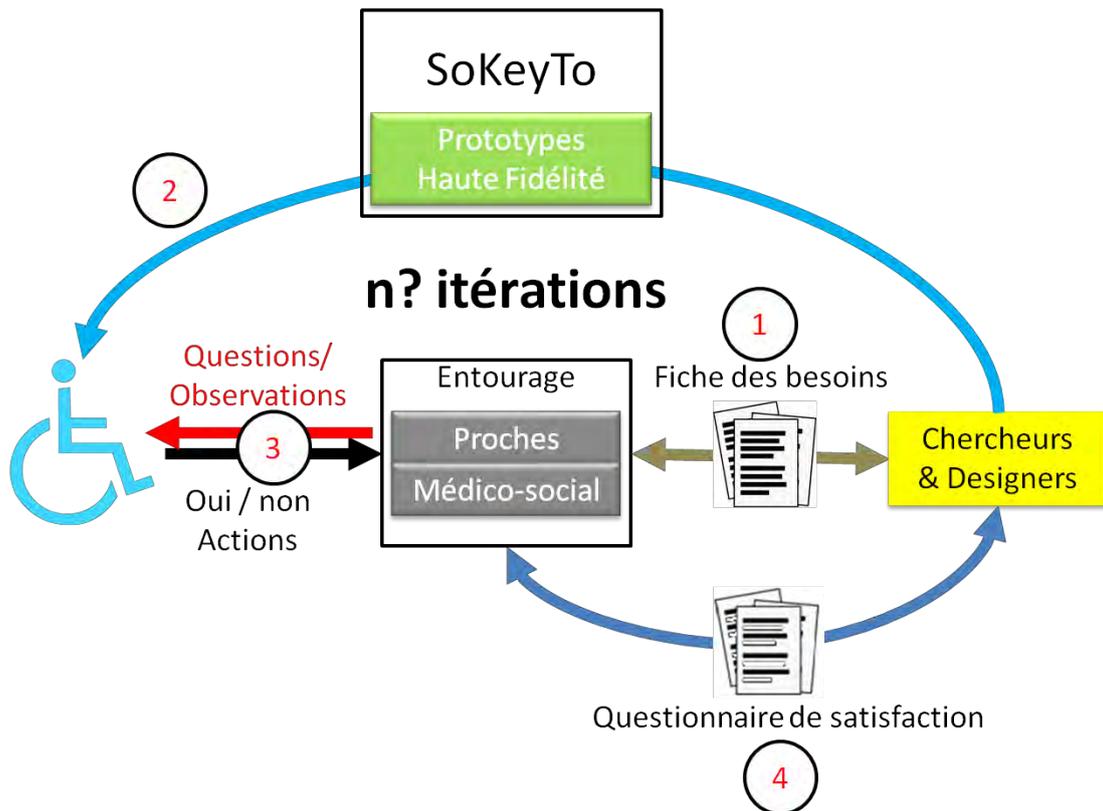


Figure 131 : Conception CECI générique

La Figure 131 présente les quatre étapes que nous avons appliquées lors de nos conceptions avec les trois patients :

- 1) Nous avons transmis une fiche des besoins remplie pour le patient par son entourage familial ou médico-social afin d'identifier ses besoins. Ces derniers sont ensuite traduits dans l'environnement SoKeyTo sous forme de fonctionnalités, d'icônes et de techniques ;
- 2) Le prototype Haute-fidélité généré par SoKeyTo est soumis au patient ;
- 3) L'entourage du patient teste avec lui le prototype. Le patient donne son avis, ou ses besoins adaptés ou nouveaux pour l'amélioration de son interface et l'étape 1 peut être réitérée;
- 4) Enfin après plusieurs séances d'essai un questionnaire de satisfaction est transmis au patient afin qu'il soit rempli avec les proches et le personnel médico-social.

#### 4.6.a. Participant 1 à l'Hôpital Nord 92

Le participant 1 est une femme atteinte d'un Locked In Syndrome ; elle a une bonne motricité de la main gauche. La mobilité lui permet de contrôler un fauteuil électrique avec un joystick. Afin de communiquer elle utilise un tableau de communication. Les mouvements de la tête sont très expressifs, ce qui permet de comprendre sa communication. Le participant 1 est une personne motivée et volontaire, mais il est nécessaire d'éviter de la mettre en échec pour éviter les découragements. Pour que le système CECI puisse répondre à ses besoins et lui soit accessible, il a fallu plusieurs sessions avec des ergothérapeutes pour chacune des étapes de conception des interfaces. Ce travail a mis 9 mois à se mettre en place ; il était nécessaire d'être réactif pour répondre aux différentes demandes.

##### 4.6.a.i. Etapes de conception

Les besoins initiaux exprimés par le service des ergothérapeutes du participant 1 sont la lecture, la musique, la télévision, les loisirs (Mots fléché et Sudoku), une synthèse vocale et le contrôle d'environnement.

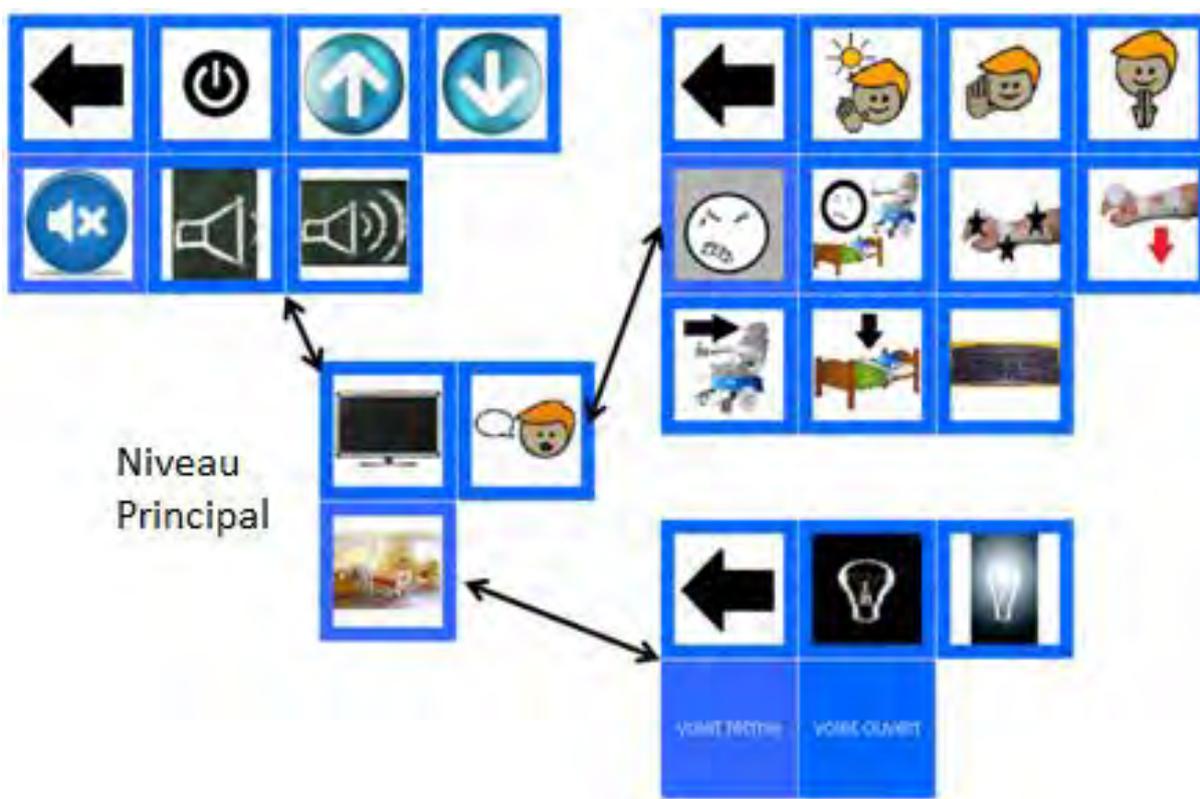


Figure 132 : Version 1 de l'interface du participant 1

La Figure 132 représente la version 1 de l'interface virtuelle, suite aux besoins exprimés. Les premiers besoins auxquels l'interface a répondu sont la télévision, la communication avec des phrases préenregistrées pour la lecture par synthèse vocale et le contrôle de l'environnement, des lumières et des volets.

Nous avons observé deux comportements du participant 1 : soit la version permettait de répondre à des besoins initiaux, soit l'utilisation de l'interface donnait à la personne l'impression de pouvoir réaliser plus de tâches. S'en suivait alors l'expression de nouveaux besoins par les ergothérapeutes de l'hôpital Nord. La technique d'interaction par balayage a été retenue en raison de ses difficultés motrices avec comme dispositif de validation un gros contacteur.

A partir de là, 6 autres itérations de conception ont été mises en œuvre (Annexe 12 Présentation de l'ensemble des itérations du système CECI pour le participant 1) :

- 1) La version 2 a pris en compte les besoins de communiquer et de voir ses proches. Dans ce cycle de conception, nous avons ajouté la fonctionnalité décrocher et raccrocher sur Skype ;
- 2) Dans la version 3, dans un désir d'autonomie dans sa communication, la patiente 1 a demandé de pouvoir s'exprimer de manière écrite. Dans le principe de mise en œuvre de la méthode de conception, l'équipe ELIPSE sur la proposition des ergothérapeutes a ajouté le clavier d'écriture « ejasint<sup>29</sup> » pour l'écriture de messages textuels. Le clavier a été complété par un pavé numérique muni de flèches de navigation du clavier pour que la patiente puisse se distraire avec le Sudoku (demande exprimée par la patiente) ;
- 3) Dans la version 4, l'option de configuration de répétition de touches a été instanciée pour éviter à la patiente de sélectionner les flèches de navigation plusieurs fois. Les deux modes de répétition proposés sont : appui rapide plusieurs fois sur le contacteur, ou maintien un certain temps du contacteur appuyé. A la demande de l'équipe médicale, il a été ajouté la fonction « appel malade » ;
- 4) La version 5 correspond à une correction du clavier d'écriture (proposé par un ergothérapeute) et à une optimisation pour que l'application démarre plus vite. Le bouton d'appel malade a été remonté au premier niveau. Un menu avec un bloc-notes a été ajouté

---

<sup>29</sup> [http://alis-asso.fr/wp-content/uploads/2014/05/Communiquer\\_2011\\_-2\\_1\\_.pdf](http://alis-asso.fr/wp-content/uploads/2014/05/Communiquer_2011_-2_1_.pdf)



Le résultat de cette série de sept itérations (Figure 133) montre que la mise en œuvre d'une méthode de conception permet d'être au plus près des besoins du participant et de répondre également aux exigences de la réadaptation.

#### 4.6.a.ii. Etude Longitudinale

Après la stabilisation de l'interface virtuelle et des réglages de l'utilisation de l'interface, nous avons souhaité observer le comportement du participant 1 par la réalisation d'un scénario.

Les ergothérapeutes ont défini le scénario suivant :

- Allumer la lumière,
- Ouvrir les volets,
- Eteindre la lumière,
- Dire « Bonjour » avec les pictogrammes
- Ouvrir le bloc-note
- Ecrire le mot théâtre
- Utiliser le bouton « Appel Malade »
- Dire « Merci » avec les pictogrammes.

Nous avons réalisé ce scénario deux fois par semaines pour un total de neuf scénarii. Le participant 1 connaissait bien la structure de l'interface virtuelle ainsi que la sémantique de tous les éléments de son interface. Les divers réglages des options de l'interface étaient stables après la phase de conception.

Dans cette étude nous avons traité les erreurs d'interaction. Est comptée comme une erreur d'interaction, toute interaction qui n'est pas celle attendue pour réaliser l'action du scénario. Une interaction qui permet de revenir à l'étape d'interaction demandée initialement par le scénario n'est pas considérée comme une erreur. Par exemple s'il est demandé d'aller dans le menu de la domotique et que le menu communication est choisi, alors on considère une erreur. Par contre le retour au menu principal pour choisir le menu domotique n'est pas compté comme une erreur.

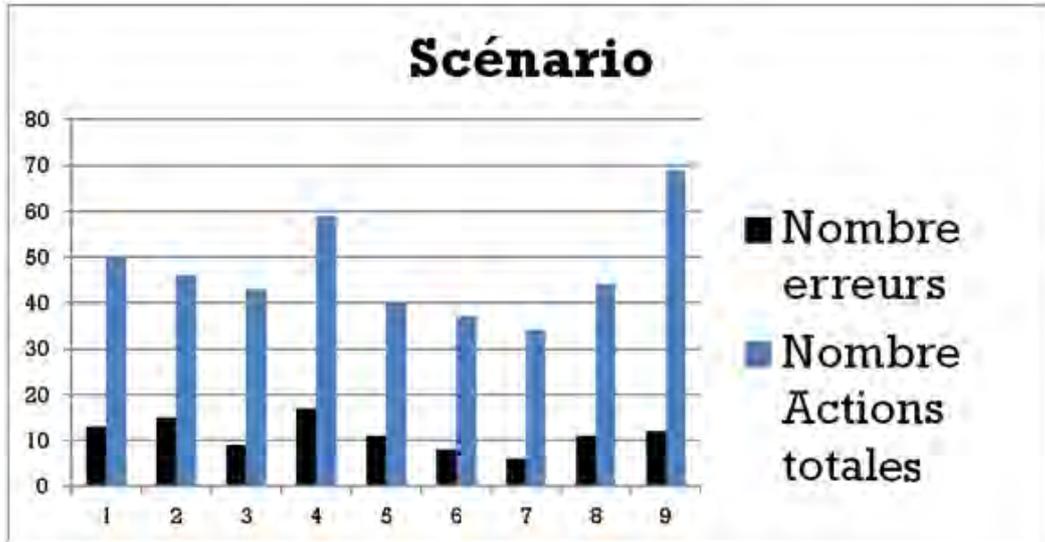


Figure 134 : Nombre d'erreurs et d'actions d'interactions du Participant 1

Le Test de Student effectué sur les variables Nombre d'erreurs et Nombre Total d'Actions, ( $p$ -value = 0.0008091), montre que le nombre d'erreurs est indépendant du nombre total d'actions. La Figure 134 montre que la patiente 1 met certainement en œuvre des stratégies différentes pour réaliser le même scénario (20 interactions supplémentaires dans la 9<sup>ième</sup> édition du scénario comparativement au 1<sup>er</sup> scénario alors que le nombre d'erreurs est sensiblement équivalent dans les deux cas.

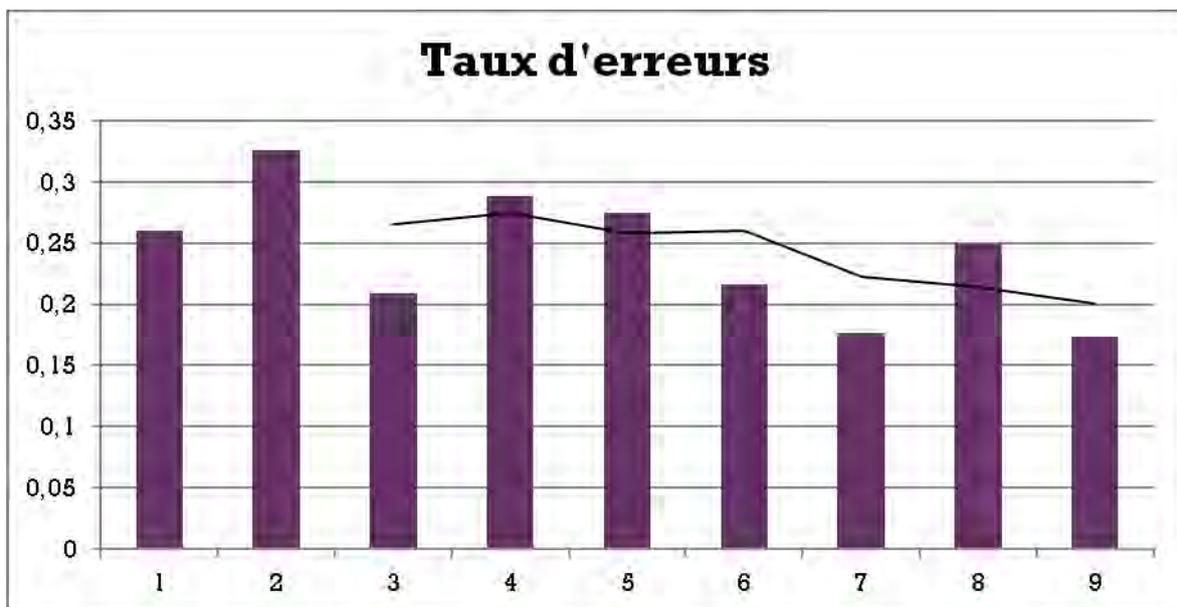


Figure 135 : Taux d'erreurs des scénarii du participant 1

Nous nous sommes intéressés aux taux d'erreurs (102 erreurs d'interaction pour 422 actions), soit environ 24 % d'erreurs. La courbe de tendance de la Figure 135 est une courbe calculée à partir des moyennes mobiles de facteur 3. Cette courbe montre que le taux d'erreurs a une tendance à diminuer au cours des scénarii. Cette tendance nous amène à formuler l'hypothèse que le participant progresse au fur et à mesure des scénarii et de l'utilisation du système.

Les observations rapportées par les ergothérapeutes vont dans ce sens. En effet, la diminution des erreurs d'interaction, semble être en phase avec une plus grande participation du participant. De plus cela semble aller dans le sens d'une réadaptation motrice et cognitive, le tout entraînant un gain d'autonomie du participant.

Par la suite, nous avons appliqué cette même méthode de conception à deux autres participants de la clinique de l'Ourcq (Annexe 13 Participant 2 et 3 du projet CECI).

Pour le projet CECI, nous confirmons pour le participant 1 les trois facteurs d'acceptabilité [A. Dillon et M. Morris 1999]. Nos hypothèses pour ces critères sont confirmées, d'une part pour l'utilité car l'interface répond aux besoins du participant. D'autre part le facteur utilisabilité a été montré aux travers d'un taux d'erreurs en constante diminution au fur et à mesure de l'utilisation de l'interface. Enfin pour le dernier facteur expérience utilisateur, les retours de l'entourage médico-social montrent l'intérêt du participant 1 pour l'interface. De plus, le participant demande à utiliser sa solution.

#### **4.7. Vers une version générique de l'interface CECI**

L'objectif que nous donnons à CECI est de devenir un système tout en un, conçu pour tous, évolutif et adaptable aux déficiences motrices et neurosensorielles avec une évolution simple au fil des besoins de la personne. Une version générique de l'interface est un souhait d'aller vers une conception "Do-It-Yourself" pour la distribuer et la partager. L'idée serait que toutes les fonctionnalités conçues au travers des différents exemples, permettent de définir cette interface. Chacune des fonctionnalités ou chaque niveau de l'interface pourra ou non être activée et réadaptée aux besoins de la personne. Pour cela l'idée est de proposer un questionnaire interactif qui a le même rôle que la fiche des besoins. Le questionnaire sélectionnera les fonctionnalités du système selon les besoins de la personne. L'objectif du

questionnaire est d'aligner les fiches des besoins au profil utilisateur pour identifier les tâches que peut effectuer l'utilisateur. Cela induit de lui proposer une solution version zéro avec des fonctionnalités répondant à ces besoins exprimés.

Ce questionnaire pourra contenir les options à ajouter :

- 1) Des boutons propres à l'interaction souhaitée par la personne. Par exemple, dans le cas du balayage, il sera nécessaire d'avoir un bouton STOP, dans le cas où la personne utilise la synthèse vocale pour lire l'interface, et un mode de balayage pour interagir. Ce qui permet d'avoir le confort d'avoir le silence quand la personne ne souhaite pas utiliser le clavier.
- 2) Si la personne est dans un établissement, ou qu'elle a besoin d'un bouton d'urgence, un bouton appel malade sera activé. Celui-ci permettra d'envoyer un signal à l'infirmerie.
- 3) Pour la télévision, il y a 2 choix, soit passer par une interface avec des codes infrarouges, soit passer par internet et accéder aux « directes » des chaînes de télévision.
- 4) Pour la radio et la musique, nous avons 3 possibilités : la première concerne le contrôle d'une radio par télécommande infrarouge, la deuxième, en utilisant un lecteur multimédia sur l'ordinateur pour lire les musiques enregistrées sur l'ordinateur. Et pour finir, l'accès au direct par internet des différentes radios FM.
- 5) Pour ce qui est d'internet, pour l'instant seulement, les seules vidéos favorites sont proposées par accès directe plein écran par les navigateurs internet.
- 6) Pour la communication, un lot de pictogrammes et de messages vocaux sont proposés de base (Bonjour, Merci, Au revoir, J'ai mal, Je suis mal installé, Laissez-moi tranquille). L'idée est de compléter par un clavier ESARIN adapté à l'écriture en balayage et à un bloc-notes pour permettre à la personne de préparer des messages plus complexes.
- 7) Pour la domotique de base, il faut un accès aux lumières et aux volets des chambres, pour permettre aux patients de gérer leurs réveils.

Cet ensemble d'idées est la base de notre idée de système générique. Pour permettre aux personnes de construire leurs interfaces en fonction de leurs besoins, SoKeyTo doit posséder tout un ensemble de fonctionnalités nécessaires.

## 5. Conclusions

Nous nous sommes plus particulièrement attachés à la proposition et la mise en œuvre d'une méthode centrée utilisateur. Nous l'avons utilisée pour la conception du clavier HandiMathKey et nous l'avons adaptée au projet CECI pour avoir comme principal interlocuteur l'entourage de la personne (famille + entourage médico-social). Cela permet l'inclusion de la personne.

Nous avons utilisé, pour la mise en œuvre de la méthode centrée utilisateur et la création des interfaces, la plateforme SoKeyTo. La plateforme SoKeyTo a évolué pour permettre la création d'interfaces de contrôle d'environnement, de domotique, de dispositifs multimédia et d'appels à des exécutables. Sa capacité à gérer de la communication a été aussi considérée. L'objectif est que SoKeyTo puisse répondre à un maximum de besoins dans le projet CECI, un boîtier avec des émetteurs et récepteurs a été ajouté pour augmenter la capacité d'interaction des interfaces.

Au niveau du projet HandiMathKey, le processus de conception nous a permis de répondre aux différents besoins formulés par les enseignants et les ergothérapeutes. Le nombre d'actions à réaliser pour l'écriture d'une formule mathématique a diminué en comparaison à l'utilisation des outils de Word. Le déplacement sur l'interface est également moins important. Au final l'interface HandiMathKey permet un gain de temps supérieur à 50% par rapport à Word. De plus, d'après le retour de l'étude de cas avec la personne en situation de handicap, l'interface est plus intuitive que les outils de base de Word et moins fatigante à l'usage et à l'exécution du protocole.

Les interfaces CECI ont été bien accueillies par les utilisateurs et les itérations de chacune des interfaces permettent d'améliorer la solution à chaque nouvelle étape des besoins. Elles montrent également la nécessité d'une très forte collaboration entre les concepteurs et les équipes d'ergothérapeutes pour la finalisation d'une interface et la configuration des

éléments d'interaction. L'étude du participant 1 montre l'importance de l'acceptabilité de l'interface et la nécessité de prendre en considération le degré de participation de la personne en situation de handicap.

Les résultats de CECI sont encourageants et demandent des études expérimentales et cliniques pour confirmer nos résultats.

## 6. Perspectives

Les projets ont permis de mettre en avant l'intérêt de disposer d'un outil de prototypage rapide tel que la plateforme SoKeyTo. Dans la perspective de ce travail, trois axes sont envisagés.

Le premier est la partie évaluation de ces interfaces qu'il va falloir poursuivre, afin de faire ressortir les avantages de notre méthode de conception.

Il est aussi nécessaire d'avoir de nouveaux contextes d'usage tels que des personnes à domicile pour leur domotique (contrôle de leur environnement ambiant), afin de valider notre conception et la stabilité de CECI, pour répondre à de nouveaux besoins.

Pour les nouvelles situations, nous allons confronter la méthode de conception à un nouvel aspect : une interface liée à CECI, pour jouer à des jeux vidéo, pour permettre l'accès à différents types de jeux auxquels les personnes en situation de handicap ne peuvent pas actuellement jouer dans de bonnes conditions.

Il serait intéressant aussi de concevoir un clavier scientifique qui généraliserait HandiMathKey à l'ensemble des matières scientifiques du cursus scolaire des élèves pour faciliter la saisie des cours.



## **Conclusion Générale**



Cette thèse a eu pour objectif de mettre en œuvre la méthode centrée utilisateur pour répondre aux différents besoins qui nous ont été formulés par les personnes en situation de handicap. Elle a décrit les contextes d'utilisation de la conception centrée utilisateur, les adaptations méthodologiques mises en œuvre ainsi que la plateforme de prototypage utilisée. Nous allons revenir sur chacun des chapitres de la thèse.

## 1. Chapitre 1

L'objectif du premier chapitre était : 1) de dresser un état des lieux des solutions existantes ; 2) de décrire la méthode de conception centrée utilisateur ; 3) de présenter les paramètres d'évaluation des interfaces virtuelles ; 4) de décrire les outils d'évaluation et d'analyse utilisés pour évaluer les interfaces virtuelles et les techniques d'interaction.

Dans un premier temps nous avons étudié les particularités des mouvements d'interaction du déplacement du curseur sur une interface graphique. Celles-ci sont dépendantes des capacités motrices des personnes. Le comportement des personnes en situation de handicap moteur et des personnes valides en est donc différent [K.Z. Gajos et al. 2008].

Nous avons ensuite effectué une synthèse des techniques d'interaction de la littérature en interaction homme-machine en vue de les réutiliser ou de les adapter aux besoins de notre population d'étude. En premier il est possible d'agir sur la cible en ajoutant de la prédiction de la cible à atteindre. Par exemple la cible peut se déplacer ou s'agrandir en fonction des actions de l'utilisateur pour faciliter leur atteinte. Il est aussi possible de mieux organiser les cibles. Par exemple le PIE Menu permet d'avoir accès à l'ensemble des fonctions à proximité du bouton central de l'interface. D'autres solutions proposent d'agir sur le curseur et sur son déplacement. Un curseur plus grand ou aimanté, peut permettre d'atteindre des cibles plus facilement. La synthèse de ces techniques a été discutée en fonction des situations de handicap.

Cette synthèse sur les outils de facilitation de l'interaction a permis d'identifier sur quel élément de l'interaction nous pouvons agir, ainsi que les avantages qu'ils peuvent apporter aux différentes techniques.

Puis nous avons présenté plus spécifiquement les concepts des méthodes de conception centrée utilisateur utilisés au cours de cette thèse afin de proposer des aides techniques répondant aux besoins des personnes.

Un des objectifs de la thèse étant l'évaluation des interfaces conçues par la mise en œuvre de la méthode de conception, nous avons rapporté quelques lois de la psychophysique utilisées en interaction homme-machine. Nous avons fait un focus sur la loi de Fitts en termes de temps prédictif de l'interaction. Puis, nous avons présenté la plateforme MPH d'exercices de pointages 2D qui permet de calculer la loi de Fitts. Nous avons ensuite rapporté les résultats d'une pré-étude d'expérimentation avec la plateforme MPH [F. Vella et N. Vigouroux, 2007]. Ces résultats ont fait ressortir l'importance de l'utilisation du dispositif usuel de la personne. Cette plateforme MPH a été également exploitée pour déterminer la prédiction du temps d'interaction d'atteinte de cibles 2D avec le dispositif usuel des personnes en situation de handicap. Ce temps de prédiction a été comparé au temps d'atteinte des boutons des interfaces virtuelles de commandes du bras JACO dans le chapitre 2. Cela nous a permis de comparer l'interaction avec un dispositif en situation écologique et contrôlée.

## 2. Chapitre 2

L'objectif de ce chapitre a été de concevoir une commande pour l'utilisation du bras robotique de préhension JACO, en particulier pour des personnes ne pouvant pas utiliser le joystick. Nous avons souhaité nous orienter vers une solution qui n'a pas été explorée dans l'état de l'art : l'utilisation d'une interface graphique. L'avantage d'un tel type d'interface est de permettre aux personnes d'utiliser leur dispositif usuel d'interaction. Ce choix se justifie par le fait que la personne, en termes d'apprentissage, n'aura à apprendre que l'interface graphique et le comportement du bras, et non un dispositif de commande non usuel. En effet les personnes en situation de handicap ont du mal à s'adapter à un nouveau dispositif [R. Khomiakoff et al. 2009]. Pour la création de ces interfaces graphiques, nous avons mis en œuvre une méthode centrée utilisateur comprenant « brainstorming », « focus group » et réunions avec deux focus groups (focus group 1 : 4 personnes tétraplégiques ; focus group 2 : 5 professionnels de la réadaptation). Les résultats du « focus group », nous ont permis la conception de trois interfaces :

- 1) Clavier, organisé comme un clavier virtuel utilisant la technique du pointage ;
- 2) Pie-menu par niveau (PN), menu circulaire découpé en parts, un clic sur une part, fait apparaître un sous-menu circulaire, utilisant la technique du pointage ;
- 3) Pie-menu par extension, même interface que PN, le passage du curseur fait apparaître à côté un sous-menu cliquable, utilisant la technique du « Goal Crossing » et du pointage.

Afin de pouvoir comparer toutes ces interfaces, nous avons d'abord normalisé l'ensemble des tailles des boutons. Puis, nous avons mis en place un protocole afin d'évaluer les interfaces auprès de personnes en situation de handicap moteur. Ce protocole s'effectue en deux étapes. La première consiste à évaluer l'interaction des personnes avec la plateforme MPH et leurs dispositifs. La seconde consiste à utiliser les trois interfaces pour réaliser deux tâches écologiques avec le bras Jaco et, à répondre à un questionnaire de satisfaction après cinq séances d'apprentissage par deux patients (un souffrant d'une amyotrophie spinale et l'autre ayant une plasticité cérébrale). Les taux de réussite sont respectivement de 94,7% pour le premier, et de 87,8% pour le second. Le PIE Menu extension semble montrer une prise en main plus simple que les autres interfaces en termes d'apprentissage. De plus, le PIE Menu niveau a le meilleur temps de réalisation. Pour le nombre d'actions, il n'y a pas de différence significative entre les interfaces. Cependant, les résultats qualitatifs montrent que pour la première personne le Pie menu par extension est préféré alors que pour la deuxième personne il s'agit du clavier virtuel.

Cette étude montre qu'il est nécessaire d'avoir un temps important d'apprentissage et de prise en main des interfaces. L'apprentissage de l'utilisation du bras robotique passe par l'appropriation de l'interface et la stratégie développée par l'utilisateur pour les commandes de bras Jaco. La mise en œuvre de la méthode de conception centrée utilisateur a permis de produire des interfaces virtuelles alternatives utilisables, en choisissant le type d'interface et de technique d'interaction. Des études cliniques devront être poursuivies pour valider conceptuellement les conceptions des interfaces virtuelles et les tendances des premiers résultats.

### 3. Chapitre 3

Dans ce chapitre 3, nous nous sommes concentrés sur la conception d'interfaces virtuelles pour la communication, le contrôle d'environnement et la saisie de formules mathématiques. Cette conception soulève trois questions : la première est celle de l'ingénierie de la conception d'interfaces ; la seconde d'ordre méthodologique est comment mettre en œuvre les méthodes de conception centrée utilisateur ; enfin la troisième est comment mesurer les performances des interfaces conçues.

Une des questions scientifiques de ma thèse étant la conception d'interfaces adaptées aux besoins des personnes en situation de handicap, nous avons fait évoluer, en tenant compte des besoins utilisateurs, la plateforme SoKeyTo, un environnement de conception d'interfaces virtuelles. La plateforme SoKeyTo permet de concevoir les composants de l'interface virtuelle et d'associer aux différentes touches, différentes actions. Nous avons effectué une introspection cognitive afin de connaître les avantages et les inconvénients des plateformes existantes pour les comparer avec la plateforme initiale SoKeyTo. Cette introspection a été rapportée ainsi que les composants logiciels ajoutés afin de répondre aux besoins de conception d'interfaces virtuelles.

Un fichier XML de représentation des interfaces générées par la plateforme SoKeyTo est généré ainsi qu'un fichier XML de traces des utilisations des interfaces. A partir de ce fichier des traces, nous avons déterminé les métriques (Précision, temps, distance, loi de Fitts ...) décrites dans le chapitre 1.

La plateforme SoKeyTo a été mise en œuvre pour la conception de deux types d'interfaces. Nous avons utilisé la plateforme SoKeyTo pour concevoir l'interface HandiMathKey, un clavier d'écriture de formules mathématiques pour les collégiens et les lycéens. Nous avons mis en œuvre une méthode de conception avec les ergothérapeutes et les professeurs de mathématiques de l'ASEI (Agir, Soigner, Eduquer, Insérer). Ces derniers nous avaient fait part des conditions difficiles de saisie de formules mathématiques. En effet les élèves éprouvent beaucoup de fatigue en cours lors de l'utilisation de traitements de texte. Nous avons conduit une expérimentation qui consistait à saisir des formules dans deux situations : avec HandiMathKey et Word. 12 personnes valides et une personne en situation de handicap

moteur ont participé à cette étude. Les résultats montrent un gain important sur le temps, le nombre d'actions (Click ou pression des touches physiques du clavier), et la distance en faveur du clavier HandiMathKey. Enfin, le ressenti des questionnaires est également très favorable à HandiMathKey.

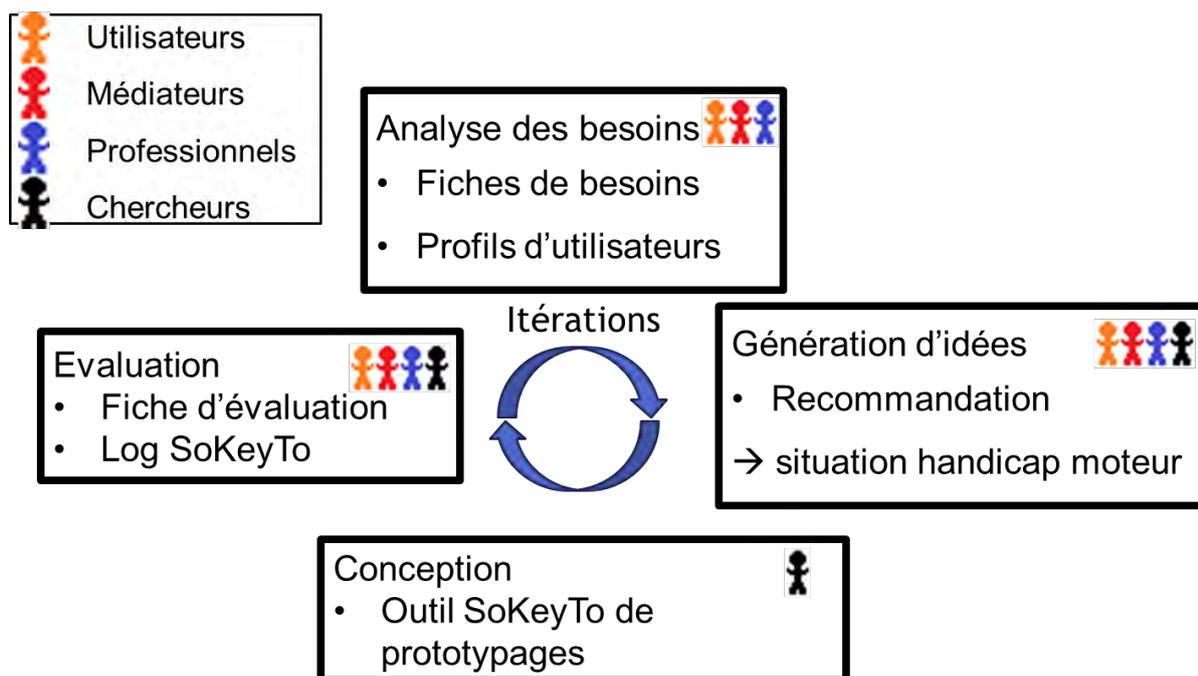
Le deuxième contexte d'utilisation de la plateforme SoKeyTo concerne la conception d'interfaces virtuelles répondant aux besoins des personnes ayant des troubles neuro-moteur et mutique. Cette conception s'est faite par l'intermédiaire des proches et des équipes cliniques des centres de rééducation (l'hôpital Nord 92 et la clinique de l'Ourcq). Ces personnes ont exprimé les demandes (communication, contrôle d'environnement, loisirs...) des personnes en situation de handicap.

Pour réaliser ce travail, nous avons mis en place une fiche composée du recueil des besoins et du profil de la personne en situation de handicap. Celle-ci est remplie par la personne, son entourage familial et/ou médico-social afin d'identifier ses besoins, ses déficiences et les dispositifs utilisés. Ces besoins sont ensuite traduits dans l'environnement SoKeyTo sous forme de fonctionnalités, d'icônes et de techniques d'interaction par le concepteur de l'interface. Les cycles itératifs de conception (proposition puis essai) ont fait apparaître l'émergence de nouveaux besoins et de demandes d'adaptation des interfaces. Ce procédé de conception dans lequel le rôle du médiateur est crucial a été mis en œuvre pour 3 patients. L'utilisation de ces interfaces sera évaluée dans une étude ultérieure par un protocole in situ sur le long terme, en analysant la fréquence d'utilisation des fonctionnalités, le réglage des techniques d'interaction et en mesurant la qualité des solutions par les retours utilisateurs.

#### **4. Synthèse générale**

Afin de répondre au premier objectif principal de cette thèse, nous avons mis en œuvre la méthode centrée utilisateur. Nous avons appliqué cette méthode dans trois situations de conception :

- interfaces alternatives pour le bras robotique JACO ;
- interface d'écriture de formules mathématiques pour les élèves du Centre Jean Lagarde de l'ASEI ;
- interface de contrôle d'environnement et de communication.



**Figure 136 : Apport de la Conception Centrée Utilisateur**

Au cours de cette thèse les différentes étapes de la conception centrée utilisateur ont été améliorées afin que les personnes avec un handicap neuro-moteur et langagier puissent être intégrées dans ce cycle de conception (Figure 136).

Pour chacune de nos solutions, la méthode nous a permis d'identifier les besoins des personnes ainsi que les limitations d'interaction de la personne en situation de handicap. Ceci nous a permis de définir une fiche de besoins et un profil utilisateur. C'est l'alignement de ces derniers qui permet d'identifier les tâches que pourra réaliser la personne avec son interface.

La projection des besoins et la connaissance des techniques d'interaction, nous ont permis de concevoir des prototypes basse et haute-fidélité. Ces prototypes ont été conçus et

améliorés suite aux retours des séances de Brainstorming, de Focus Groups et/ou de tests d'utilisation. A l'issue de la mise en œuvre de la méthode de conception centrée utilisateur pour les interfaces alternatives du bras JACO, nous avons proposé une liste de recommandations pour leur organisation (espace, gestion du temps de parole, aides à la personne) (Figure 136).

Nous avons fait évoluer la plateforme SoKeyTo (Figure 136) [Thèse F. Vella 2008], initialement prévue pour la création de claviers virtuels d'écriture, pour permettre la conception de prototype d'interface virtuelle répondant aux besoins exprimés en termes de techniques d'interaction, de communication (pictogrammes versus message vocal), de fonctionnalités de contrôle de l'environnement et d'accès aux loisirs. La plateforme SoKeyTo permet la configuration d'un profil utilisateur (technique d'interaction d'entrée et de sortie) et la hiérarchisation des menus sous forme de couches.

Dans le projet HandiMathKey et CECI, la plateforme SoKeyTo a permis la création de plusieurs prototypes haute-fidélité d'interfaces virtuelles en prenant en compte l'ensemble des besoins utilisateurs. Elle permet également de répondre rapidement aux demandes d'adaptations ou d'évolution des interfaces en tenant compte des nouveaux besoins grâce au fichier de description des besoins.

Dans le cas du projet JACO, les interfaces ont été créées en "C#" afin de communiquer avec l'API fournie par la société KINOVA. La création d'interfaces de type PIE menu nécessite une évolution de la plateforme SoKeyTo pour la forme de la touche et la spécification de la technique de Goal Crossing.

Pour répondre au troisième objectif de la thèse, à savoir l'évaluation des interfaces (Figure 136), nous avons mis en place des outils de capture et d'analyse de traces et des protocoles expérimentaux. Dans le cas du bras JACO, nous avons proposé un protocole basé sur la réalisation de deux tâches écologiques par deux participants. Les résultats montrent que les trois interfaces conçues par la méthode de conception sont utilisables. Les préférences d'utilisation dépendent de la déficience motrice de la personne. Les résultats montrent également une différence entre le temps théorique estimé par la plateforme MPH et

l'utilisation des interfaces. Cette différence peut être expliquée comme étant le temps supplémentaire de recherche de la fonction de commande du bras dans l'interface.

Le protocole d'évaluation de l'interface HandiMathKey a été effectué auprès de 12 personnes valides et d'une personne handicapée myopathe pour une tâche de recopie de 30 formules mathématiques dans deux situations : L'éditeur Word et l'interface HandiMathKey. Les résultats montrent un gain de temps supérieur à 50% et un nombre d'actions réduit avec notre interface. Les retours utilisateurs montrent que notre interface est plus intuitive et moins fatigante que les outils de Word.

D'un point de vu sociétal, ces interfaces virtuelles co-conçues semblent permettre, selon nos premiers retours utilisateurs, un gain d'autonomie et de confort pour les personnes en situation de handicap moteur des membres supérieurs.





# Perspectives



Dans ce mémoire de thèse, nous avons, d'une part utilisé une méthodologie de conception centrée utilisateur pour la conception des différentes interfaces (CECI, HandiMathKey, JACO), et d'autre part étudié l'utilisabilité de celles-ci. Nos perspectives porteront donc sur les parties suivantes.

## 1. Les interfaces produites par la plateforme SoKeyTo

Les interfaces réalisées au cours de cette thèse nécessitent des études d'usage en situation écologique. Dans le cas des interfaces CECI, des études d'usage sur le long terme devront être mises en œuvre pour mesurer l'utilisabilité des interfaces, élaborer des adaptations du profil utilisateur et de l'interface par des algorithmes de décision pour tenir compte de l'évolution des capacités motrices et cognitives de la personne. L'étude de ces interfaces comme outils de rééducation est une voie à explorer.

L'évaluation de HandiMathKey soulève la question de la mesure de l'inclusion éducative de HandiMathKey dans les classes en tant qu'outil d'intégration pédagogique : ceci devra être étudié. Les critères de cette évaluation pourraient être le temps de configuration de l'écran de travail, le temps passé à recopier des formules mathématiques, le temps passé à écouter le cours, le temps passé à réaliser les exercices et l'analyse de la stratégie employée pour l'apprentissage des mathématiques. L'hypothèse serait de vérifier comment HandiMathKey redistribue les tâches cognitives employées (lecture, décodage, écriture et attentionnelle) lors d'un cours de mathématiques.

D'autres besoins ont été exprimés par les orthophonistes pour les personnes atteintes de trouble de dyscalculie : mode calculatrice ; configuration des contrastes des touches ; augmentation de la taille de police ; définition de touches d'enregistrement de formules saisies pour les réutiliser. Deux verrous scientifiques sont aussi formulés : il s'agit, d'une part de concevoir un assistant à la saisie de formules mathématiques, et d'autre part d'envisager la conception d'un lecteur vocal de formules mathématiques. Ce dernier demande d'étudier les pratiques de lecture des enseignants en mathématiques en vue de les modéliser pour proposer des stratégies d'oralisation des formules mathématiques. Cela nous permettra d'obtenir un corpus en vue de la constitution de la base de sons à restituer au moyen d'un système de synthèse vocale, compréhensible pour une personne dyslexique ou dyscalculie. Il

faudra aussi voir en quoi la lecture des formules mathématiques est un processus pour l'apprentissage.

Pour la plateforme SoKeyTo, il est nécessaire d'ajouter de nouvelles formes d'interfaces comme les Pie Menu, et aussi de permettre d'associer à un bouton deux techniques d'interaction différentes comme le Goal Crossing et le pointage, par exemple. De plus dans le Chapitre 1 « La taxonomie des techniques d'interaction », pour une partie de ces techniques d'interaction, elles ont été testées avec des personnes valides. Il serait intéressant de les évaluer avec des personnes en situation de handicap pour définir leurs intérêts potentiels. Si ces techniques sont avantageuses pour des personnes en situation de handicap alors il serait intéressant de les ajouter à SoKeyTo.

L'amélioration des interfaces du système CECI et de HandiMathKey implique l'amélioration de l'application SoKeyTo en termes de fonctionnalités, d'ergonomie et d'en faciliter la conception des interfaces pour les non-informaticiens. Pour ce dernier point, nous proposons la mise en place d'un Webservice de type SAAS basé sur la plateforme SoKeyTo accessible et intuitive ayant pour objet la conception d'aides techniques (communication et contrôle d'applications interactives et domotiques). Ce service permettrait à des aidants familiaux ou professionnels de concevoir des aides techniques par la mise en œuvre du concept "Do-It-Yourself". De plus, les interfaces SoKeyTo devront permettre de définir un profil utilisateur à travers leurs utilisations. Ce profil devra pouvoir être transmis d'une interface à l'autre afin de conserver l'interaction choisie par la personne.

La facilité de conception de l'interface HandiMathKey par la plateforme SoKeyTo laisse présager d'autres utilisations de celle-ci pour la conception d'autres types d'interfaces de saisie, comme la conception d'un clavier virtuel pour l'écriture de l'espagnol.

## 2. Le projet JACO

Dans le cadre du projet JACO, l'étude avec deux personnes aux pathologies différentes a montré d'une part que la chaîne des composants logiciels (plateforme MPH , interfaces virtuelles) est robuste, et d'autre part qu'une étude clinique sur une population importante avec des pathologies différentes (tétraplégie, paralysie cérébrale, sclérose en plaque,

myopathie, paralysie cérébrale, sclérose latérale amyotrophique....) est nécessaire pour mesurer l'utilité, l'utilisabilité et l'acceptabilité des interfaces virtuelles. Cela permettra de répondre à la question : est-ce que les interfaces virtuelles alternatives au joystick sont des solutions utiles, efficaces répondant correctement aux besoins des personnes ? Il serait aussi intéressant d'ajouter une caméra au bras robotique dans le but d'analyser et d'interpréter des mouvements résiduels de la personne. Ces mouvements pourront être associés, soit à des commandes du bras robotique, soit au contrôle de nos interfaces graphiques.

### 3. Evolution de la conception centrée utilisateur

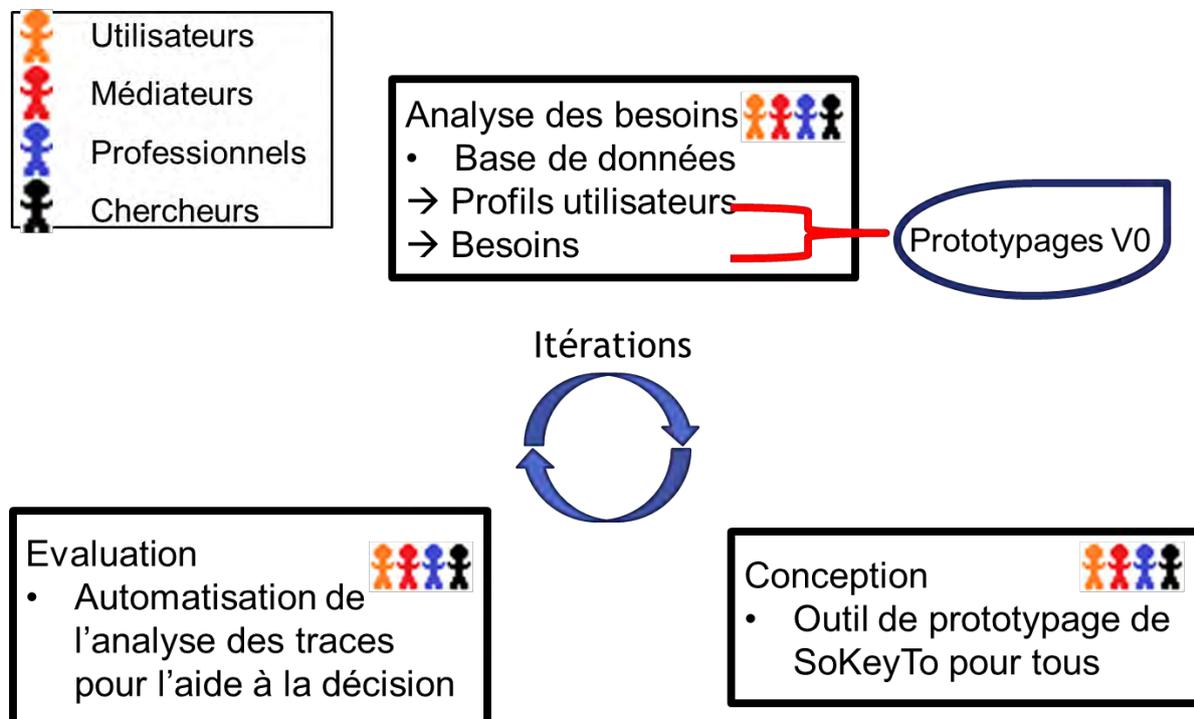


Figure 137 : Evolution de la conception centrée utilisateur

Les perspectives d'évolution concernent essentiellement les outils, Il serait opportun de mettre à la disposition de la communauté des professionnels et des personnes en situation de handicap une base de données comportant des profils utilisateurs et de besoins (Figure 137). Avec l'utilisation d'une telle base de données, il pourrait être également envisagé à termes un outil d'alignement des besoins et du profil utilisateur afin de proposer la version 0 du prototype.

L'évolution de la plateforme SoKeyTo devrait permettre qu'elle devienne un outil de conception pour tous par l'introduction de fonctionnalités de personnalisation. Ainsi elle pourrait être un bon outil logiciel sous le principe du « Do-it-yourself » puisque le concepteur pourrait utiliser les composants logiciels de base pour concevoir son interface.

Enfin, l'analyse dynamique des logs d'activités des interfaces, au moyen d'outil (par exemple le Deep-Learning), pourrait être envisagée pour ajuster les paramètres des techniques d'interaction et proposer des commandes adaptées en fonction du contexte d'usage (la tâche et la récupération ou dégradation des déficiences de la personne), ce qui permettrait d'avoir un outil de configuration de l'interaction automatique.





# Bibliographie

B. Abdulrazak, B. Grandjean, M. Mokhtari, 2001, Toward a new high level controller for Manus robot : the Commanus project. In M. Mokhtari (Ed.), Integration of assistive technology in the information age. Volume 9 Assistive Technology Research Series, pages. 221-226. Amsterdam: IOS Press.

J. Accot, S. Zhai, 1997, Beyond fitts' law : models for trajectory-based hci tasks. In Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, pages 295–302. ACM, 1997.

J. Accot, S. Zhai, 2002, More than dotting the i's—foundations for crossingbased interfaces. In Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems : Changing our world, changing ourselves, pages 73–80. ACM, 2002.

J. Accot, S. Zhai, 2003, Refining Fitts' law models for bivariate pointing CHI 2003, April 5–10, 2003, Ft. Lauderdale, Florida, USA.

K. Al Faraj, M. Mojahid, N. Vigouroux, 2009, BigKey: A Virtual Keyboard for Mobile Devices. 13th International Conference, HCI International 2009, San Diego, CA, USA, July 19-24, 2009, Proceedings, Part III.

R. Alqasemi, E. McCaffrey, K. Edwards, R. Dubey, 2005, Analysis, evaluation and development of wheelchair mounted robotic arms. ICORR - 9th Int. Conf. on rehabilitation robotics, pages 469-472.

C. Appert, O. Chapuis, M. Beaudouin-Lafon, 2008, Evaluation of pointing performance on screen edges. In AVI '08 : Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces, pages 119–126, New York, NY, USA, 2008. ACM.

T. Asano, E. Sharlin, Y. Kitamura, K. Takashima, F. Kishino, 2005, Predictive interaction using the delphian desktop. In UIST '05 : Proceedings of the 18th annual ACM symposium on User interface software and technology, pages 133–141, New York, NY, USA, 2005. ACM.

G. Ashlock, H. Koester, E. Lopresti, W. Mcmillan, R. Simpson , 2003, User-centered Design of Software for Assessing Computer Usage Skills. In Proceedings of RESNA 2003 Annual Conference, Atlanta, GA. (2003) Key: citeulike : 300687.

B. Azéma, N. Martinez, 2005, « Les personnes handicapées vieillissantes : espérances de vie et de santé ; qualité de vie. Une revue de la littérature», Revue française des affaires sociales 2/2005 (n° 2), pages 295-333.

R. Balakrishnan, 2004, "beating" fitts' law : virtual enhancements for pointing facilitation. Int. J. Hum Comput. Stud., 61(6) : pages 857–874, 2004.

D. Bassily, C. Georgoulas, J. Güttler, T. Linner, T. Bock, 2014, Intuitive and Adaptive Robotic Arm Manipulation using the Leap Motion Controller, Conference ISR ROBOTIK 2014 TU München, Germany.

P. Baudisch, E. Cutrell, D. Robbins, M. Czerwinski, P. Tandler, B. Bederson, A. Zierlinger, 2003, Drag-and-pop and drag-and-pick : Techniques for accessing remote screen content on touch- and pen-operated systems. In Proceedings of INTERACT, volume 3, pages 57–64, 2003.

P. Baudisch, A. Zotov, E. Cutrell, K.Hinckley, 2008, Starburst : a target expansion algorithm for non-uniform target distributions. In AVI '08 : Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces, pages 129–137, New York, NY, USA, 2008. ACM.

C. Bérard, 2004, « Clavier-écran : concevoir avec les utilisateurs », Handicap 2004, Paris, pages 83-88, 17-18 Juin 2004.

C. Bérard, C. Payan, J. Fermanian, F. Girardot, F. Girardot, 2006, La mesure de fonction motrice, outil d'évaluation clinique des maladies neuromusculaires. Étude de validation, Revue Neurologique, Volume 162, Issue 4, April 2006, pages 485–493.

N. Biard, 2008, Robotique d'assistance et compensation des limitations de préhension, implémentation d'une commande référence vision sur le bras manipulateur Manus : Evaluation du projet AVISO, Mémoire de Master 2, Science de la Motricité, Mention

Viellissement, Handicap : Mouvement et Adaptation, Université Paris-Sud 11, Paris Descartes.

Z. Bien, H. Lee, J. Do, 2008, Intelligent interaction for human-friendly service robot in smart house environment. *International Journal of Computational Intelligence System*. 1(1): pages 77-93.

R. Blanch, 2004, Pointage sémantique et distracteurs, la dynamique du pointage à la rescousse. In *Actes des secondes rencontres jeunes chercheurs en interaction homme-machine (RJC-IHM 2004)*, Lacanau, 2004.

R. Blanch, Y. Guiard, M. Beaudouin-Lafon, 2004, Semantic pointing : improving target acquisition with control-display ratio adaptation. In *CHI '04 : Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 519–526, 2004.

R. Blanch, M. Ortega, 2009, Rake cursor : improving pointing performance with concurrent input channels. In *CHI '09 : Proceedings of the 27th international conference on Human factors in computing systems*, pages 1415–1418, New York, NY, USA, 2009. ACM.

P. Boissière, N. Vigouroux, M. Mojahid, F. Vella, 2012, Adaptation of AAC to the context communication: a real improvement for the user Illustration through the VITIPI word completion, In Miesenberger, K., Karshmer A., Penaz P. Zagler, W: (Eds) *Computers Helping People with Special Needs, Proceedings of the 13th International Conference, ICCHP'2012*, Linz, Austria, July 2012. *Lecture Notes in Computer Science (LNCS 7383, Part II)*, pages 451-458.

L. Bougrain, M. Duvinage, E. Klein, 2012, Inverse reinforcement learning to control a robotic arm using a Brain-Computer Interface. *Research Report 2012. ENTERFACE'12 summer workshop*.

L. Bougrain, O. Rochel, O. Boussaton et L. Havet, 2012, From the decoding of cortical activities to the control of a JACO robotic arm: a whole processing chain. *arXiv preprint arXiv:1212.0083*.

A. Brock, S. Kammoun, J.L Vinot, P. Truillet, B. Oriola, C. Jouffrais, Méthodes et outils de conception participative avec des utilisateurs non-voyants, IHM'10, Luxembourg, 2010.

M. Bruce, J.J. Foster, 1982, The visibility of colored characters on colored backgrounds in viewdata displays. *Visible Language*, 16(4), 382.

C. Bühler, 1996, Approach to the analysis of user requirements in assistive technology. *International journal of Industrial Ergonomics*. 17 : pages 187-192.

M. Buisson, A. Bustico, S. Chatty, F.R. Colin, Y. Jestin, S. Maury, C. Mertz, P. Truillet, 2002, Ivy : un bus logiciel au service du développement de prototypes de systèmes interactifs. IHM 2002, 14ème Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine, Nov 2002, Poitiers, France. pages 223-226, 2002.

L. Burzagli, P.L. Emiliani, F. Gabbanini, 2009, Design for All in action: An example of analysis and implementation. *Expert Systems with Applications*, 36(2), pages 985-994.

J. Callahan, D. Hopkins, M. Weisert, B. Shneiderman, 1988, an empirical comparaison of PIE vs Linear menus, CHI'88, 1988 ACM-O-89791-265-9/88/0004/0095.

G. Casiez, D. Vogel, R. Balakrishnan, A. Cockburn, 2008, The impact of control-display gain on user performance in pointing tasks. *Human-Computer Interaction*, Taylor and Francis, 23(3): pages 215–250, 2008.

G. Casiez, N. Roussel, R. Vanbelleghem, F. Giraud, 2011, 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.

S.K. Card, W.K. English, B.J. Burr, 1978, "Evaluation of mouse, rate-controlled isometric joystick, step keys, and text keys for text selection on a CRT". *Ergonomics* 21, pages 601-613, 1978.

S.K. Card, T.P. Moran, A., Newell, 1980, "Computer text-editing: An information processing analysis of a routine cognitive skill". *Cognitive Psychology* 12, pages 32-74, 1980.

L.G. Carlton, 1981, Processing visual feedback information for movement control. *Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 7 : pages 1019–1030, 1981.

S.J. Castellucci, I.S. MacKenzie, 2009. TnToolkit: A design and analysis tool for ambiguous, QWERTY, and on-screen keypads. *Proceedings of the ACM Symposium on Engineering Interactive Computing Systems – EICS 2009*, pages 55-60 New York.

O. Chapuis, J.B. Labrune, E. Pietriga, 2009, Dynaspot : speeddependent area cursor. In *CHI '09 : Proceedings of the 27th international conference on Human factors in computing systems*, pages 1391–1400, New York, NY, USA, 2009. ACM.

CS Chung, H Wang, PD Rory, A. Cooper, 2012, Literature Review of Wheelchair-Mounted Robotic Manipulation: User Interface and End-User Evaluation, 2012 RESNA Annual Conference, Internet.

P. Coignard, J.P. Departe, O. Remy Neris, A. Baillet, A. Bar, D. Drean, A. Verier, C. Leroux, P. Belletante, J.L. Le Guiet, 2013, ANSO study: Evaluation in an indoor environment of a mobile assistance robotic grasping arm, *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, Volume 56, Issues 9–10, December 2013, pages 621-633, ISSN 1877-0657.

E. Colle, K. Nait-Chabane, S. Delarue, P. Hoppenot, 2006, ARPH: Comparaison d'une méthode classique et d'une méthode utilisant la coopération homme-machine pour exploiter la redondance de l'assistant robotisé. *HANDICAP 2006*, Jun 2006, Paris, France, pages 121–125, 2006.

A. Craig, 2005, The efficacy and benefits of environmental control systems for the severely disabled. *Medical science monitor : international medical journal of experimental and clinical research*, 2005. 11(1): p. RA32-9.

D.M.C. Cruz, M.L.G. Emmel, M.G. Manzini, P.V. Braga Mendes, 2016, Assistive Technology Accessibility and Abandonment: Challenges for Occupational Therapists, *The Open Journal of Occupational Therapy*: Vol. 4: Iss. 1, Article 10.

L. Dai, R. Goldman, A. Sears, J. Lozier, 2004, Speech-based cursor control: a study of grid-based solutions. Assets '04 Proceedings of the 6th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility, pages 94-101. New York: ACM.

M. Dawe, 2006, Desperately seeking simplicity: how young adults with cognitive disabilities and their families adopt assistive technologies. In Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in computing systems (CHI '06), ACM, pages 1143-1152.

C. De Lattre, C. Payan, C. Berard, 2011, Validation de l'échelle MFM-20: une version réduite de la mesure de fonction motrice (MFM) pour les jeunes enfants porteurs d'une maladie neuromusculaire. Annals of Physical and Rehabilitation Medicine, 54, e192-e193.

M. Delcey, 2002, Déficiences motrices et situations de handicaps, aspects sociaux, psychologiques, techniques, sociaux et législatifs, Ed. APF 2002, pdf, 5 pages.

A. Dillon, M. Morris, 1999, Power, Perception and Performance: From Usability Engineering to Technology Acceptance with the P3 Model of User Response, Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, Vol 43, Issue 19, pages 1017-1021.

B.J.F. Driessen, H.G. Evers ; J.A. van Woerden, 2001, MANUS—a wheelchair-mounted rehabilitation robot. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine March 1, 2001 vol. 215 no. 3, pages 285-290.

S. Federici, S. Borsci, 2011, The use and non-use of assistive technology in Italy: A pilot study. In G. J. Gelderblom, M. Soede, L. Adriaens & K. Miesenberger (Eds.), Everyday Technology for Independence and Care: AAATE 2011, Vol. 29, pages 979-986. Amsterdam, NL: IOS Press.

S. Federici, F. Meloni, S Borsci, 2016, The abandonment of assistive technology in Italy: a survey of National Health Service users. European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine, vol. 52, pages 516-526.

W. Feng, M. Chen, M. Betke, 2014, Target reverse crossing: a selection method for camera-based mouse-replacement systems. PETRA '14 Proceedings of the 7th International

Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments Article No. 39 ACM  
New York, NY, USA 2014.

A. Firth, A. Cockburn, 2003, Improving the acquisition of small targets. *People and Computers XVII : British Computer Society Conference on Human-Computer Interaction.*, 7 : pages 181–196, 2003.

P.M. Fitts, 1954, "The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of the movement", *Journal of experimental psychology*, 47, pages, 381-391, 1954.

G. Fitzmaurice, J. Matejka, A. Khan, M. Glueck, G. Kurtenbach, 2008, PieCursor: Merging Pointing and Command Selection for Rapid In-place Tool Switching, *CHI 2008 Proceedings · Menu and Command Selection April 5-10, 2008, Florence, Italy.*

S. Fortune, 1987, *A Sweepline Algorithm for Voronoi Diagrams*, Algorithmica Springer-Verlag New York, 1987.

R. Fung, E. Lank, M. Terry, C. Latulipe, 2008, Kinematic Templates: End-User Tools for Content-Relative Cursor Manipulations *UIST'08*, October 19–22, 2008, Monterey, California, USA.

K.Z. Gajos, J.O. Wobbrock, D.S. Weld, 2008, Improving the Performance of Motor-Impaired Users with, *Automatically-Generated, Ability-Based Interfaces*, *CHI'08*, Florence, Italy.

N. Garay-vitoria, J. Abascal, 2006, Text prediction systems: a survey, *Journal Universal Access in the Information Society Springer-Verlag*, pages 188-203.

S. Gebhardt, S. Pick, F. Leithold, B. Hentschel, T. Kuhlen, "Extended Pie Menus for Immersive Virtual Environments", *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, vol. 19, no. , pages 644-651, April 2013, doi:10.1109/TVCG.2013.31

S. Ghedira, 2009, *Aide à la communication pour personnes handicapés moteurs: modélisation et optimisation du système homme-machine*. Diss. Université Paul Verlaine-Metz, 2009.

C.B. Gibbs, 1962, Controller design : Interactions of controlling limbs, time-lags, and gains in positional and velocity systems. *Ergonomics*, 5 : pages 385–402, 1962.

D.J. Gillan, K. Holden, S. Adam, M. Rudisill, L. Magee, 1990, How does Fitts' law fit pointing and dragging? *Proceedings of the CHI '90 Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 227-234. New York:ACM.

F. Girardot, C. Bérard, 2005, Apport de l'Évaluation Motrice Fonctionnelle Globale chez l'enfant infirme moteur cérébral, *Motricité Cérébrale: Réadaptation, Neurologie du Développement* Volume 26, Issue 4, Décembre 2005, pages 139–146.

E. Graham, 1996, Virtual pointing on a computer display : non-linear control displaymappings. *Graphics Interface Conference*, pages 36–46, 1996.

T. Grossman R. Balakrishnan, 2005, The bubble cursor : enhancing target acquisition by dynamic resizing of the cursor's activation area. In *CHI '05 : Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 281–290, 2005.

Y. Guerrier 2015, Proposition d'une aide logicielle pour la saisie d'information en situation degrade, application à des utilisateurs IMC athétosiques dans des contextes liés au transport et aux activités journalières, thèse de doctorat, Université de Valenciennes, Septembre.

M. Guffroy, 2017, Adaptation de méthodes d'évaluation dans le cadre de la conception d'une application numérique pour un jeune public avec troubles du spectre autistique - Étude au cours de la conception et de l'évaluation de l'application çATED au sein d'une ULIS TED, Thèse en informatique, Université du Maine.

Y. Guiard, R. Blanch, M. Beaudouin-Lafon, 2004, Object pointing : a complement to bitmap pointing in guis. In *GI '04 : Proceedings of Graphics Interface 2004*, pages 9–16, 2004.

B. Hawkins, H.N. Zelaznik, L. Kisselburgh, 1983, Rapid visual feedback processing in single-aiming movements. *Journal of Motor Behavior*, 15 : pages 217–236, 1983.

J. Heidmann, C. Dumazeau 1999 Evaluation du robot Manus par des personnes lourdement handicapées. Rapport interne Handicom.

W.E. Hick, 1952, "On the rate of gain of information". Quarterly Journal of Experimental Psychology, 4, pages 11-26, 1952.

H. Hok Kwee, 1998, Integrated control of Manus manipulator and wheelchair enhanced by environmental docking. Robotica , Volume 16 (n°5), pages. 491-498.

D. Hopkins, 1991, The design and implementation of pie menus. Dr. Dobb's Journal, 16(12), pages 16-26, 1991.

P. Hoppenot, E. Colle, 2000, Robotique d'assistance aux personnes handicapées Handicap 2000 - Nouvelles technologies : assistance technique aux handicaps moteur et sensoriel - PARIS - 15 / 16 Juin 2000 pages 11-16.

H. Horstmann Koester, S.P. Levine, 1994, Modeling the speed of text entry with a word prediction interface. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, 2(3) : pages 177–187.

J.P. Hourcade, B.B. Bederson, A. Druin, F. Guimbretiere, 2004, Differences in Pointing Task Performance Between Preschool Children and Adults Using Mice. ACM Transactions on Computer-Human Interaction, 11(4), pages 357-386.

J.P. Hourcade, K.B. Perry, A.Sharma, 2008, Pointassist : helping four year olds point with ease. In IDC '08 : Proceedings of the 7th international conference on Interaction design and children, pages 202–209, New York, NY, USA, 2008. ACM.

J.P. Hourcade, C.M. Nguyen, K.B. Perry, N.L. Denburg, 2010, Pointassist for older adults : analyzing sub-movement characteristics to aid in pointing tasks. In CHI '10 : Proceedings of the 28th international conference on Human factors in computing systems, pages 1115–1124, New York, NY, USA, 2010. ACM.

A. Hurst, J. Mankoff, A.K. Dey, S.E. Hudson, 2007, Dirty desktops : using a patina of magnetic mouse dust to make common interactor targets easier to select. In UIST '07 : Proceedings of

the 20th annual ACM symposium on User interface software and technology, pages 183–186, New York, NY, USA, 2007, ACM.

A. Hurst, J. Tobias, 2011, Empowering individuals with do-it-yourself assistive technology. In The proceedings of the 13th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility pages 11-18, ACM.

F. Hwang, P.M. Langdon, P.J. Clarkson, S. Keates, 2004 “Mouse movements of motion-impaired users: a submovement analysis”, 6th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility (ASSETS 2004), Atlanta, GA, USA, 2004.

R. Hyman, 1953, “Stimulus information as a determinant of reaction time”. Journal of Experimental Psychology, n°45, pages 188-196, 1953.

M. Jeannerod, 1984; The timing of natural prehension movements. Journal of Motor Behavior, 16(3) : pages 235–254, 1984.

W.L. Jenkins, M.B. Connor, 1949, Some design factors in two dimensions with hand and head movements. Journal of Motor Behavior, 17: pages 77–79, 1949.

H. Jiang, J.P. Wachs, B. S. Duerstock, M. Pendergast, 2013, 3D Joystick for Robotic Arm Control by Individuals with High Level Spinal Cord Injuries, 2013 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics June 24-26, 2013, Seattle, Washington USA.

J.W. Jung, W.K. Song, H. Lee, J.S. Kim, Z. Bien, 1999, a study on the enhancement of manipulation performance of wheelchair-mounted rehabilitation service robot, ICORR '99: International Conference on Rehabilitation Robotics, Stanford, CA.

A. Jurine, 1989, "An Expert System for the Selection of Input Devices", Proceedings of Human Factors Society 33rd Annual Meeting, October 16-20, 1989, Denver Colorado, pages 335-339.

P. Kabbash W. Buxton, 1995, The "prince" technique : Fitts' law and selection using area cursors. In Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, pages 273–279. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1995.

S Keates, PJ Clarkson, LA Harrison, P Robinson, 2000, Towards a practical inclusive design approach. Proceedings on the 2000 conference on Universal Usability, pages 45-52.

M. Kobayashi, T. Igarashi, 2008, Ninja cursors : using multiple cursors to assist target acquisition on large screens. Proc. ACM CHI'08, pages 949–958, 2008.

I. Laffont, N. Biard, G. Chalubert, L. Delahoche, B Marhic, F.C. Boyer, C. Leroux, 2009, Evaluation of a graphic interface to control a robotic grasping arm : a multicenter study, Arch Phys Med Rehabil Vol 90, Octobre 2009.

C.E. Lang, J.M. Wagner, A.W. Dromerick, D.F. Edwards, 2006 Measurement of Upper-Extremity Function Early After Stroke: Properties of the Action Research Arm Test, Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, Volume 87, Issue 12, December 2006, pages 1605–1610.

E. Lank, Y.C. Nikko Cheng, J. Ruiz, 2007, Endpoint prediction using motion kinematics. In CHI '07 : Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, pages 637–646, New York, NY, USA, 2007. ACM.

R. Likert, 1932, A Technique for the Measurement of Attitudes, Archives of Psychology, vol. 140, 1932, pages 1–55.

I.S. MacKenzie, A. Sellen, W.A.S. Buxton, 1991, A comparison of input devices in element pointing and dragging tasks, CHI '91 Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pages 161-166, ACM New York, NY, USA 1991.

I.S. MacKenzie, 1992, Movement time prediction in human-computer interfaces. Proceedings of Graphics Interface '92, 7(1), 1992.

I.S. MacKenzie, 1992, Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction, *Human-Computer Interaction*, 7, Moscow, pages 91-139, 1992.

I.S. MacKenzie, W. Buxton, 1993, A tool for the rapid evaluation of input devices using Fitts' law models. *SIGCHI Bulletin*, 25(3), pages 58-63.

I.S. MacKenzie, S. X. Zhang, 1999, The Design and Evaluation of a High-Performance Soft Keyboard. *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '99*, pages 25-31. New York: ACM.

I.S. MacKenzie, T. Kauppinen, M. Silfverberg, 2001, Accuracy measures for evaluating computer pointing devices. *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI 2001*, pages 9-16. New York: ACM.

L. Magnien, J.L. Bouraoui, N. Vigouroux, 2004, Saisie de texte en mobilité avec des claviers logiciels: optimisation par l'usage d'indices visuels. *Mobilité et ubiquité 2004*, June 1–3, 2004, Nice, France.

V. Maheu, 2011, Développement des critères d'apprentissage pour le contrôle d'un bras robot manipulateur à 7 ddl par le traitement des signaux EMG chez les blessés médullaires, 2011, Ecole de Technologie Supérieure, Université du Québec: Montréal.

V. Maheu, J. Frappier, P.S. Archambault, F. Routhier, 2011, Evaluation of the JACO robotic arm, 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics Rehab Week Zurich, ETH Zurich Science City, Switzerland, June 29 - July 1, 2011.

J. Malkin, B. House et J. Bilmes, 2007, Control of Simulated Arm with the Vocal Joystick *CHI 2007 Workshop on Striking a C[h]ord: Vocal Interaction in Assistive Technologies, Games, and More (2007)*.

C. Martens, N. Ruchel, O. Lang, O. Ivlev, A. Graser, 2001, A FRIEND for assisting handicapped people. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, Vol. 8, Issue 1, pages 57-65, Mars 2001.

V. McArthur, S.J. Castellucci, I.S. MacKenzie, 2009, An Empirical Comparison of "Wiimote" Gun Attachments for Pointing Tasks Proceedings of the ACM Symposium on Engineering Interactive Computing Systems – EICS 2009, pages 203-208. New York: ACM.

M. McGuffin, R. Balakrishnan, 2004, Acquisition of expanding targets. In Proceedings of the ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pages 57–64, 2004.

B. Merlin, M. Raynal,, H. Fülber, 2012, "Tackling the acceptability of freely optimized keyboard layout." International Conference on Computers for Handicapped Persons. Springer Berlin Heidelberg, 2012.

D. Miniotas, 2000, "Application of Fitts' Law to Eye Gaze Interaction". CHI '00. ACM Press, pages 339–340, 2000.

P. Mormiche, Le handicap se conjugue au pluriel, Insee Première n° 742, 2000, internet.

M.J. Muller, S. Kuhn, Participatory design. Commun. ACM 36, 6 (1993), pages 24-28.

D. Natapov , S.J. Castelluci, I.S. Mackenzie, 2009, ISO 9241-9 evaluation of video game controllers. Proceedings of Graphics Interface 2009, pages 223-230. Toronto: Canadian Information Processing Society.

D. Niemeijer, 2005, "In memoriam of Christian Bérard: Striving for effort reduction through on-screen keyboard word prediction". Assistive technology: from virtuality to reality - 8th European conference for the advancement of assistive technology in europe (AAATE 2005), A Pruski, H Knops (Eds.), IOS Press, <http://www.irit.fr/aaate2005wk/>, Lille, France, 6-9 septembre 2005.

D.A. Norman, S.W. Draper, 1986, User Centered System Design; New Perspectives on Human-Computer Interaction. L. Erlbaum Assoc. Inc., Hillsdale, NJ, USA.

B. Oriola, A. Amadiou, P. Boissière, M. Raynal, A. Tricot, F. Vella, N. Vigouroux, 2007, Projet ChatCom: Étude des usages de différents claviers logiciels dans une tâche de saisie via Internet par des personnes handicapées. In 1ère Conférence Internationale Sur l'accessibilité

et les systèmes de suppléance aux personnes en situations de handicaps (ASSISTH'2007)"  
Pour une meilleure insertion dans la société (pages 07-21).

A.M. Penkar, C. Lutteroth, G. Weber, 2012, Designing for the Eye – Design Parameters for Dwell in Gaze Interaction, OZCHI '12, November 26-30, 2012, Melbourne, Victoria, Australia.

B. Phillips, H. Zhao, 1993, Predictors of assistive technology abandonment *Assist Technol.* 1993;5(1): pages 36-45.

M.I. Posner, S.W. Keele, 1968, Processing visual feedback in rapid movement. *Experimental Psychology*, 77 : pages 155–158, 1968.

M. Raynal, N. Vigouroux, 2005, Genetic algorithm to generate optimized soft keyboard. In CHI '05 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '05). ACM, New York, NY, USA, pages 1729-1732.

M. Raynal, P. Truillet, 2007, Fisheye keyboard: Whole keyboard displayed on PDA. In: Jacko, J.A. (ed.) HCI 2007. LNCS, vol. 4551, pages 452–459. Springer, Heidelberg 2007.

M Raynal, M Serrurier, 2007, Loi de fitts: prédiction du temps de pointage sous forme d'ensembles flous. Proceedings of the 19th Conference on l'Interaction Homme-Machine, 3-10 2007.

F.E. Ritter, G.D. Baxter, G. Jones, R.M. Young, 2000, Supporting cognitive models as users. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 7(2), pages 141-173.

B. Roche, J.M. Drake, J. Brown, D.E. Stallknecht, T. Bedford, P. Rohani, 2014, Adaptive Evolution and Environmental Durability Jointly Structure Phylodynamic Patterns in Avian Influenza Viruses. *PLOS Biology* 12(8): e1001931.

F. Routhier, P. Archambault, M.C. Cyr, V. Maheu, M. Lemay, I. Gélinas, Benefits Of Jaco Robotic Arm On Independent Living And Social Participation: An Exploratory Study, RESNA annual conference 2014.

J. Ruiz, E. Lank, 2009, Effects of target size and distance on kinematic endpoint prediction. Technical report, Technical Report CS-2009-25, University of Waterloo, 2009.

T.D. Sanger, J. Henderson, 2007, Optimizing Assisted Communication Devices for Children With Motor Impairments Using a Model of Information Rate and Channel Capacity, *Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, IEEE Transactions on (Volume:15, Issue:3) 2007.

S. Schepensa, A. Goldberga, M. Wallacea, 2010, The short version of the Activities-specific Balance Confidence (ABC) scale: Its validity, reliability, and relationship to balance impairment and falls in older adults, *Archives of Gerontology and Geriatrics*, Volume 51, Issue 1, July–August 2010, pages 9–12.

D. Sauzin, F. Vella, N. Vigouroux, 2014, SoKeyTo: a tool to design universal accessible interfaces (regular paper). Dans : *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2014)*,pologne, 19/07/2014-23/07/2014, T Ahram, W Karwowski, T Marek (Eds.), AHFE International, pages 659-670, 2014.

D. Sauzin, F. Vella, N. Vigouroux, 2015, Choisir le dispositif de pointage le plus performant avec le throughput (short paper). Dans : *Conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine*, Toulouse, 27/10/2015-30/10/2015, HAL.

R.C. Simpson, H.H. Koester, E. Lopresti, 2006, Evaluation of an adaptative row/column scanning system. *Technology and disability* 2006, 18 : pages 127-138.

M.W. Smith, J. Sharit, S.J.Czaja 1999, Aging, motor control, and the performance of computer mouse tasks. *Hum Factors*. 1999 Sep;41(3) : pages 389-96.

R.W. Soukoreff, I.S. MacKenzie, 1995, "Theoretical upper and lower bounds on typing speed using a stylus and soft keyboard". *Behavior & Information Technology*, 14, pages 370–379, 1995.

C.E. Steriadis, P. Constantinou, 2003, Designing human-computer interfaces for quadriplegic people. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, Vol. 10, No. 2, June 2003, pages 87–118.

M. Topping, J.K. Smith, 1999, The development of Handy 1, a robotic system to assist the severely disabled. In Proceedings of ICORR '99: International Conference on Rehabilitation Robotics, pages 244–249, 1999.

U. Trankle and D. Deutschmann. Factors influencing speed and precision of cursor positioning using a mouse. *Ergonomics*, 34 : pages 161–174, 1991.

K. Tsui, 2009, Performance Evaluation Methods for Assistive Robotic Technology, in Performance Evaluation and Benchmarking of Intelligent Systems, R. Madhavan, Springer Verlag. pages 41-66.

I.C. Van Haastert, L.S. De Vries, P.J.M. Helders, M.J. Jongmans, 2006, Early gross motor development of preterm infants according to the Alberta Infant Motor Scale, *The Journal of Pediatrics*, Volume 149, Issue 5, November 2006, pages 617–622.

F. Vella, N. Vigouroux, P. Truillet, 2004, Environnement de conception de clavier virtuel : SOKEYTO (Software KEYboard TOolkit). Dans : IHM 2004, Namur, Belgique, 30/08/2004-03/09/2004, ACM Press, ACM ISBN 1-58113-926-8, pages 181-182, août 2004.

F. Vella, N. Vigouroux. 2007, Layout keyboard and motor fatigue: first experimental results. Dans : AMSE journal, Association for the Advancement of Modelling and Simulation Techniques in Enterprises (AMSE), Vol. 67, pages 22-31, avril 2007.

F. Vella, 2010, Conception D'Interface Homme Machine Avec Les Modeles Psychophysiques, EUE : Editions Universitaires Européennes, Vol. 1, 1, septembre 2010.

F. Vella, 2013, Manuel d'utilisation de la plateforme MPH version 2.0 dans le cadre du projet Bennetot, Manuel utilisateur, 2013.

F. Vella, N. Vigouroux, 2013, Validation of Fitts' law adapted for upper limb motor impairment on software keyboards (regular paper). Dans : European Conference for the Advancement of Assistive Technology in Europ (AAATE 2013), Vilamoura, Portugal, 19/09/2013-22/09/2013, Vol. 33, IOS Press, pages 500-505, 2013.

N. Vigouroux, F. Vella, P. Truillet, M. Raynal, 2004, "Evaluation of AAC for text input by two populations: normal versus handicapped motor persons", 8th ERCIM UI4All, Adjunct Proceedings, Vienna (Österreich), 2004.

N. Walker, K. Bharat, A. Worden, S. Hudson, 1997, Making computers easier for older adults to use : area cursors and sticky icons. Proc. CHI'97, pages 266–271, 1997.

A.T. Welford, 1968, The fundamentals of skill. London: Metbuen.

G. Willem-Römer, H. Stuyt, G. Peters, K. Van Woerden, 2006, Part II Rehabilitation Robots For Assistance Of Human Movements: II.3 Rehabilitation-Robot Evaluation Advances in Rehabilitation Robotics Volume 306 of the series Lecture Notes in Control and Information Science pages 221-230 Date: 16 August 2006 14 Processes for Obtaining a "Manus" (ARM) Robot within the Netherlands.

J.O. Wobbrock, K.Z. Gajos, 2007, A comparison of Area Pointing and Goal Crossing for People with and without Motor Impairments, ASSETS'07, October 15-17, Tempe.

J.O. Wobbrock, K.Z. Gajos, 2008, Goal crossing with mice and trackballs for people with motor impairments: Performance, submovements, and design directions. ACM Transactions on Accessible Computing 1 (1). Article No. 4.

Woodworth R, 1899, The accuracy of voluntary movement. Psychology Review, 13(3), 1899.

S. Zhai, P. Milgram, W. Buxton, 1996, The influence of muscle groups on performance of multiple degree-of-freedom input. Proceedings of CHI'96 Conference on Human Factors in Computing Systems, pages 308–315, 1996.

S. Zhai, C. Morimoto, S. Ihde, 1999, Manual and gaze input cascaded (magic) pointing. Proc. ACM CHI'99, 15 : 246–25, 1999.

S. Zhai, M. Hunter, B.A. Smith, Performance Optimization of Virtual Keyboards, Human-Computer Interaction. Vol. 17, No2&3. 2002, pages 229-269.

S. Zhai, S. Conversy, M. Beaudouin-Lafon, Y. Guiard, 2003, Human on-line response to target expansion. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '03, pages 177–184, New York, NY, USA, 2003. ACM.

S. Zhai, 2004, Characterizing computer input with Fitts' law parameters — The information and non-information aspects of pointing. *International Journal of Human-Computer Studies*, 61(6), pages 791-809. December 2004.

Norme ISO 9241-210 Ergonomie de l'interaction homme-système -- Partie 210: Conception centrée sur l'opérateur humain pour les systèmes interactifs, 2010.

Norme ISO 9241-9 08/2000 Exigence relatives aux dispositifs d'entrée autres que les claviers.

Norme ISO 16982 Méthodes d'utilisabilité pour la conception centrée sur l'opérateur humain, Oct. 2002.





# Annexe 1 : Questionnaire JACO

1 Fortement contre / 2 Plutôt contre / 3 Plutôt pour / 4 Fortement pour

Question sur le bras robotique Jaco					
1	L'apprentissage du principe du bras Jaco est facile	1	2	3	4
2	Les fonctionnalités du bras vous semblent satisfaisantes	1	2	3	4
3	Le bras robotique est facile à manipuler	1	2	3	4
4	L'utilisation du bras robotique vous fatigue	1	2	3	4
5	L'utilisation du bras robotique a engendré des douleurs	1	2	3	4
6	L'utilisation du bras robotique nécessite toute votre attention et concentration	1	2	3	4

Q1 : Avez-vous des remarques que vous souhaitez nous signaler sur le fonctionnement du bras Jaco ?

-----  
 -----  
 -----  
 -----

Q2 : Avez-vous des suggestions à faire pour améliorer la manipulation du bras Jaco ?

-----  
 -----  
 -----  
 -----

	Question sur les dispositifs	Joystick du bras JACO				Dispositif de pointage			
		1	2	3	4	1	2	3	4
7	L'apprentissage du dispositif est facile	1	2	3	4	1	2	3	4
8	Le dispositif proposé est utilisable	1	2	3	4	1	2	3	4
9	Le dispositif est facile à manipuler	1	2	3	4	1	2	3	4
10	L'utilisation du dispositif est fatigante	1	2	3	4	1	2	3	4
11	L'utilisation du dispositif a engendré des douleurs	1	2	3	4	1	2	3	4
12	L'utilisation du dispositif a mobilisé votre attention / concentration	1	2	3	4	1	2	3	4

Q3 : Avez-vous des remarques que vous souhaitez nous signaler sur le dispositif ? -----

-----  
 -----  
 -----  
 -----

Q4 : Avez-vous d'autres dispositifs de contrôle du bras robotique à nous suggérer ? -----

-----  
 -----  
 -----  
 -----

	Question sur les interfaces	Interface Clavier				Interface Pie-menu Niveau				Interface Pie-menu Extension			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
13	L'apprentissage de l'interface est facile	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
14	L'interface est facile à utiliser	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
15	L'utilisation de l'interface vous semble intuitive	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
16	L'utilisation est fatigante	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
17	L'interface est attrayante	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
18	La possibilité de personnaliser l'interface vous paraît utile	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
19	L'organisation des boutons vous paraît logique	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
20	Les blocs de couleur sont utiles pour le choix de la commande	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
21	Les icônes représentent bien les commandes du bras Jaco	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
22	La mémorisation des commandes de l'interface est facile	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
23	Le retour visuel vous semble utile	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
24	L'utilisation de l'interface a mobilisé votre attention / concentration	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4

Q5 : Avez-vous des améliorations ou suggestions à proposer pour les interfaces ?

Q5.1 : Interface clavier :-----  
 -----  
 -----  
 -----  
 -----

Q5.2 : Interface Pie-menu Niveau : -----  
 -----  
 -----  
 -----  
 -----

Q5.3 : Interface Pie-menu Extension : -----  
 -----  
 -----  
 -----  
 -----

Q6 : Quelles autres interfaces proposeriez vous ? -----  
 -----  
 -----  
 -----  
 -----

	Question Globale	JACO et son joystick				JACO et l'interface clavier				JACO et l'interface Pie-menu Niveau				JACO et l'interface Pie-menu Extension			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
25	Le temps de réalisation des tâches avec le bras jaco et l'interface est acceptable	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
26	Vous avez pris plaisir à l'utilisation du bras avec l'interface	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
27	Vous avez mobilisé votre attention / concentration pour l'utilisation du bras avec l'interface	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
28	Je pense que j'aimerais utiliser ce bras avec l'interface fréquemment	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
29	Je pense que j'aurais besoin de l'aide d'une personne expérimentée pour utiliser le bras jaco avec l'interface	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4

Les classements, 1 pour le favoris, 4 pour le dernier, il est possible d'avoir des égalités

Classements	JACO et son joystick	JACO et l'interface clavier	JACO et l'interface Pie-menu Niveau	JACO et l'interface Pie-menu Extension
Quelle solution avait vous préférée ?				
Quelle solution est la plus facile d'utilisation ?				
En quelle solution avez-vous le plus confiance pour utiliser le bras JACO ?				

Q7 : Justifier les classements ? -----  
 -----  
 -----  
 -----  
 -----

Q8 : Avez-vous d'autres remarques ? -----  
 -----  
 -----  
 -----  
 -----



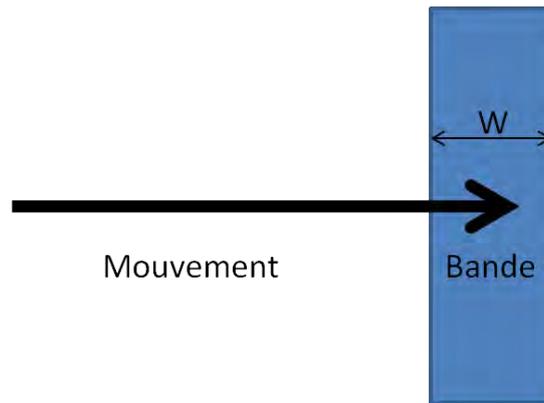
## Annexe 2 : Normalisation de la taille des touches

L'organisation spatiale d'une interface graphique et les tailles des boutons d'interaction influencent les temps de recherche [Hick-Hyman (7)] et les temps de sélection d'une action [I.S. Mackenzie 1992, Loi de Fitts (11)]. Nous avons homogénéisé la taille des différentes formes de boutons d'interactions (Figure 138). Dans la littérature, Soukoureff et Mackenzie [R.W. Soukoureff et I.S. Mackenzie, 2004] ont proposé un modèle qui permet l'évaluation théorique de l'organisation d'un clavier virtuel pour la saisie de texte.



Figure 138 : Forme de bouton

Pour calculer la taille moyenne d'un bouton d'une interface, nous nous baserons sur l'exercice à 1 dimension de Fitts (Figure 139) consistant à venir atteindre des bandes verticales par des mouvements horizontaux. La taille  $W$  définit la largeur de la bande verticale qui représente la distance qu'à une personne pour stopper son mouvement dans une cible. Dans leur article, Accot et Zhai (2003) montrent que la distance d'arrêt du curseur est plus importante que l'angle d'erreur d'approche du curseur.



**Figure 139 : Mouvements sur un exercice Fitts 1D**

Le passage en 2 dimensions complexifie le calcul de la taille de la cible, pour le cercle il s'agit de son diamètre. La raison de ce choix repose sur 2 propriétés du cercle:

- Le centre du cercle est aussi le centre de gravité de ce dernier. Toute droite passant par un centre de gravité coupe la surface d'une figure en 2 parts de même surface.
- Toute corde du cercle passant par son centre est un diamètre, ils font tous la même taille.

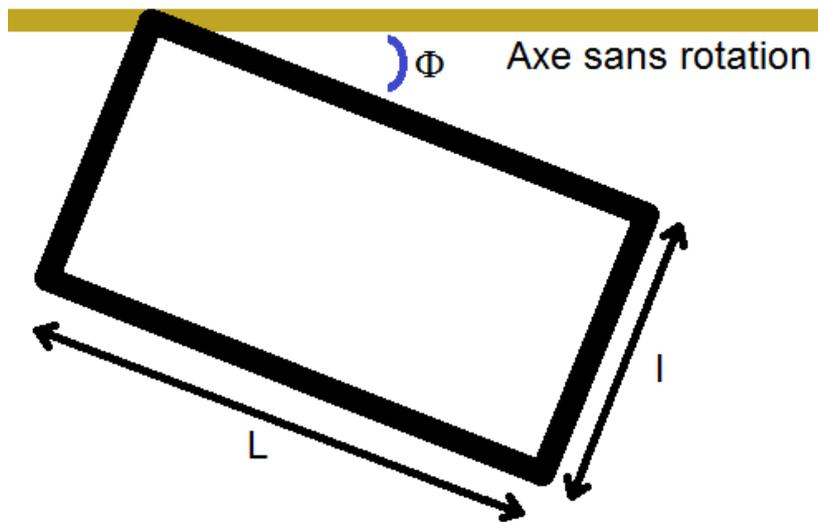
A partir de ces deux propriétés du cercle il est possible de dire que la distance moyenne du centre de gravité avec chaque point du cercle est la même. Le diamètre définit notre taille de cible.

Maintenant il faut l'étendre à des figures plus complexes en tenant compte des connaissances et propriétés du cercle. Nous allons calculer la largeur moyenne d'une cible de forme rectangulaire et de type portion de PIE-Menu (Figure 142) que l'on retrouve sur nos interfaces du bras JACO. La première étape est l'identification de nos composants graphiques, suivie du calcul du centre de gravité des composants et pour finir nous calculerons la distance moyenne au centre de gravité de chacun des composants.

### **1. Phase 1 : Connaissance initiale des composants graphiques**

Pour dessiner un composant graphique, il est nécessaire d'avoir un minimum de connaissances.

Un rectangle (Figure 140) est généralement dessiné à partir de l'angle haut-gauche de ce dernier, il est nécessaire d'avoir la longueur «L» et la largeur «l» du rectangle pour le dessiner. Il est aussi possible d'avoir un angle de rotation « $\Phi$ » pour incliner le rectangle. Dans notre cas il n'y a pas de rotation effectuée, on retiendra donc les coordonnées du point initial, ainsi que la longueur et largeur du rectangle.



**Figure 140 : Dessiner une touche rectangle**

Une touche de Pie-Menu (Figure 141) se dessine à partir de 2 cercles de même centre. Le rayon appelé « r » du plus petit cercle est la limite intérieure de la touche de Pie-Menu. Le rayon du plus grand cercle est appelé « R » et représente la limite extérieure de la touche du Pie-Menu. Il y a aussi un angle qui applique une rotation « $\Phi$ » à la touche de Pie-Menu et un angle d'ouverture de la touche « $\alpha$ ».

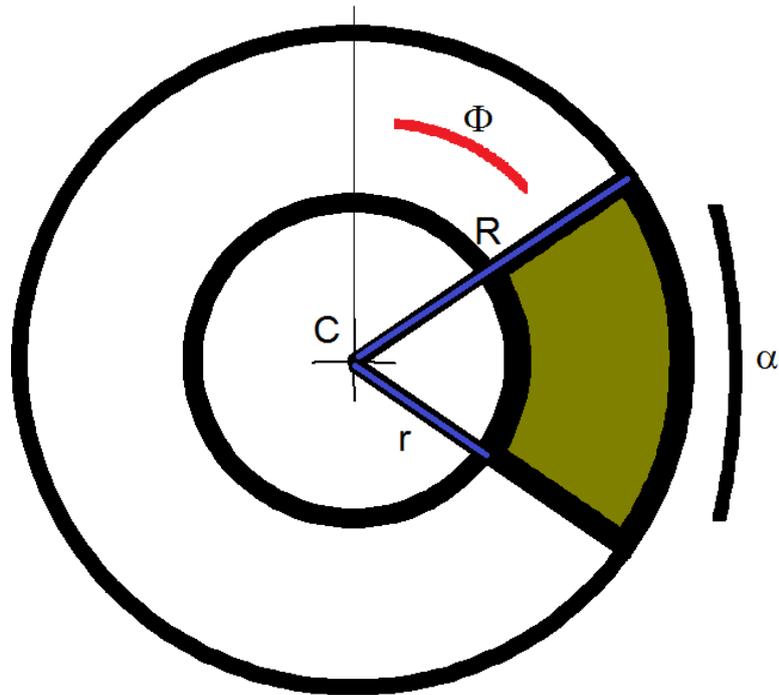


Figure 141 : Dessiner une touche PIE menu

## 2. Phase 2 : le Calcul d'un centre de gravité

L'étape suivante est de calculer le centre de gravité de chacune des touches.

**Pour le rectangle**, le centre de gravité se situe à l'intersection de ses 2 axes de symétrie. Les axes de symétrie sont les médiatrices de chacun des côtés du rectangle, il suffit donc de tracer les médiatrices des 2 côtés adjacents du rectangle pour que l'intersection soit le centre de gravité (Figure 142). Pour calculer les coordonnées de ce point il suffit d'effectuer depuis le sommet haut gauche du rectangle une translation de la demi-longueur et une translation de la demi-largeur.

**Pour le bouton Pie-Menu**, chaque arc du Pie-Menu est un arc de cercle, avec un cercle de même centre pour les 2 arcs. Il existe donc un axe de symétrie qui correspond à la moitié de l'angle d'ouverture du secteur circulaire sur lequel est le bouton du Pie-Menu. Le centre de gravité se trouve sur cet axe de symétrie.

Pour calculer la position sur l'axe, en premier on calcule le centre de gravité du secteur du petit arc de cercle et celui du grand arc de cercle. La formule de distance (19), permet de connaître la position en partant du centre du cercle d'une zone circulaire.

$$Distance = \frac{2R \sin \frac{\alpha}{2}}{3 \frac{\alpha}{2}} \quad (19)$$

Il suffit ensuite d'appliquer une formule de soustraction de zone sur les centres de gravité pour trouver la position de celui de la touche Pie-Menu (20). On positionne le centre des cercles sur la coordonnée (0 ; 0) et l'axe de symétrie sur l'axe des ordonnées. Gy1 est la position y du centre de gravité de la grande zone circulaire. S2 est la surface de la petite zone circulaire et S1 la grande zone circulaire. Gy1-Gy2 correspond à la distance qui sépare les centres de gravité de la petite zone circulaire et de la grande zone circulaire.

$$Position Gy = Gy1 + \frac{S2}{(S1 - S2)} * (Gy1 - Gy2) \quad (20)$$

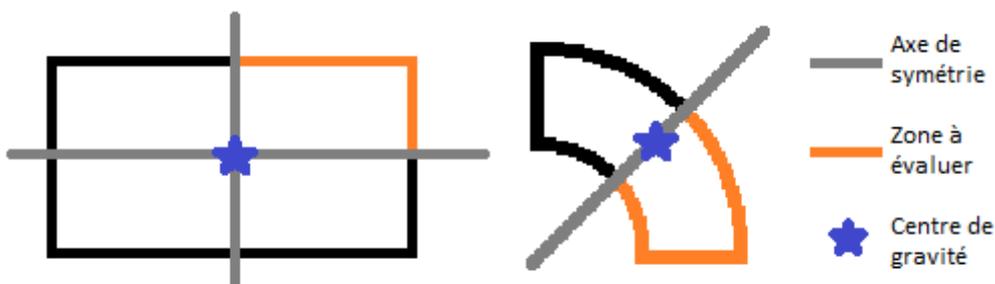
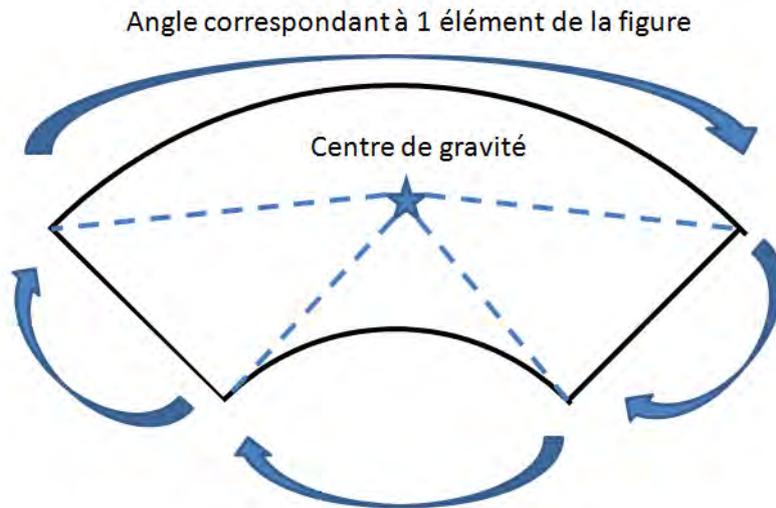


Figure 142 : Représentations de 2 types de touches à gauche le rectangle, à droite une touche de Pie Menu

### 3. Phase 3 : Le calcul de la distance moyenne au centre de gravité de chacun des composants de la figure

Ce calcul peut-être simplifié en utilisant une propriété des axes de symétrie, tout point d'une figure a un symétrique à la même distance de l'axe de symétrie. Il suffit donc de calculer la distance d'un seul côté de la figure pour avoir la distance moyenne au centre de gravité (voir zone à évaluer Figure 142) pour chacun des axes de symétrie l'angle à évaluer est divisé par 2 (21).

$$Angle \text{ à évaluer} = \frac{2\pi}{2^{\text{Nombre d'axe de symétrie}}} \quad (21)$$



**Figure 143 : Calcul de la distance moyenne découpage des éléments**

Chaque élément de la cible va être découpé (trait tiré Figure 143), Pour chacune des formes segment ou arc de cercle, un traitement différent sera choisi.

Un algorithme va démarrer à partir du centre de gravité pour un angle de 0 puis il va aller jusqu'à un angle à évaluer. Le pas pour avancer vers cet angle doit être suffisamment petit pour avoir une valeur approximative inférieure au pixel. Le pas doit être inférieur à 1/10ème de degré soit  $2 \pi / 3600$  en radian. On effectuera la moyenne de toutes les distances calculées.

Pour calculer la distance pour un segment :

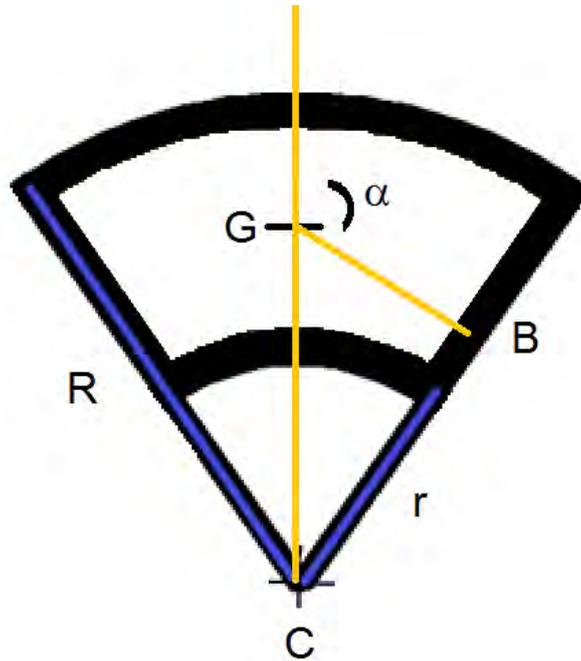


Figure 144 : Calcul de distance à un point d'un segment

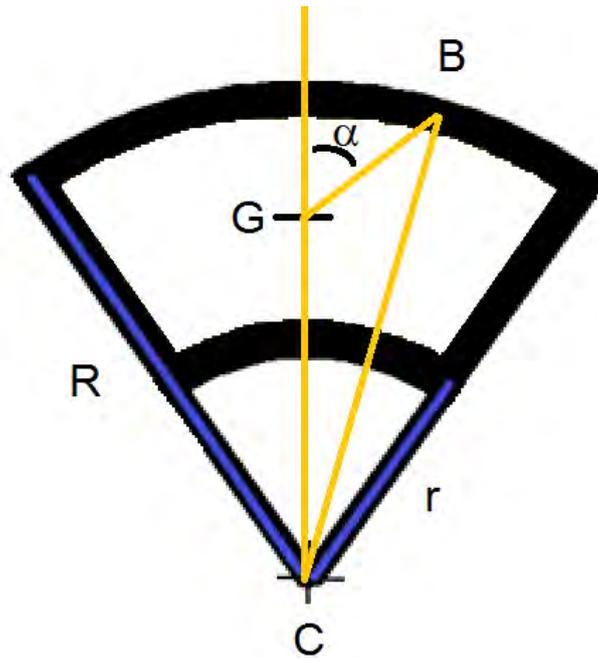
Sur la Figure 144 la distance au centre de gravité G est la taille du segment [GB]. En sachant que l'angle  $\widehat{GCB}$  est égal à la moitié de l'angle d'ouverture de la touche Pie-Menu. En premier nous calculerons l'angle  $\widehat{GBC}$  (22) :

$$\widehat{GBC} = \alpha - \widehat{GCB} \text{ (La somme des angles d'un triangle} = \pi \text{ et } \widehat{CGB} = \pi - \alpha) \quad (22)$$

A partir de l'angle on utilise la loi des sinus qui permet de calculer la distance [GB] (23) :

$$[GB] = \frac{Gy * \sin \widehat{GCB}}{\sin \widehat{GBC}} \quad (23)$$

Pour calculer la distance à un arc de cercle :



**Figure 145 : Calcul de distance à un point d'un arc de cercle**

Sur la Figure 145 la distance au centre de gravité G est la taille du segment [GB]. En sachant que la distance [CB] est égale au rayon de l'arc de cercle sur lequel se trouve B, « r » pour le cas du petit cercle et « R » sur le grand cercle (Figure 145). En premier calculons l'angle  $\widehat{GCB}$  (24) :

$$\widehat{GCB} = \alpha - \sin^{-1} \frac{Gy * \sin(\pi - \alpha)}{R} \text{ (Pour la Figure 145) } \quad (24)$$

A partir de l'angle, on utilise la Formules d'Al Kashi pour calculer la distance [GB] (25) :

$$[GB] = \sqrt{R^2 + Gy^2 - 2 * R * Gy * \cos \widehat{GCB}} \quad (25)$$

Une fois la distance moyenne calculée, la taille de la touche est le double de cette distance et elle définit la taille de la touche. Les interfaces de la Figure 49 en sont le résultat. Les tailles des boutons des interfaces ont été générées avec les formules présentées ci-dessus.



## Annexe 3 : Tableau de données MPH

Tableau 20 : Résultats MPH du participant 1 pour le Pointage

Pointage			
ID	IDe	MT	Ecart-type Temps
1,00	1,93	0,66	0,22
1,22	2,61	0,81	0,18
1,58	2,49	0,82	0,23
1,58	2,95	0,81	0,24
1,87	2,72	0,85	0,22
2,00	2,89	0,98	0,21
2,32	3,22	0,99	0,22
2,32	3,34	0,94	0,19
2,32	3,20	1,09	0,21
2,81	3,64	1,14	0,26
3,17	4,31	1,39	0,47
3,17	4,23	1,17	0,28
3,70	4,99	1,60	0,45
4,09	5,29	1,48	0,57
4,64	6,02	1,64	0,53

Tableau 21 : Résultats MPH du participant 1 pour le Goal Crossing

Goal Crossing			
ID	IDe	MT	Ecart-type Temps
1,00	1,88	0,18	0,10
1,22	2,41	0,22	0,14
1,58	2,34	0,22	0,16
1,58	2,51	0,30	0,11
1,87	3,02	0,39	0,22
2,00	3,03	0,52	0,28
2,32	3,22	0,39	0,28
2,32	3,16	0,41	0,22
2,32	3,31	0,53	0,26
2,81	3,73	0,67	0,36
3,17	4,29	0,60	0,53
3,17	4,39	0,58	0,30
3,70	4,54	0,72	0,33
4,09	5,27	0,73	0,37
4,64	6,20	0,83	0,33

Tableau 22 : Résultats MPH du participant 2 pour le Pointage

Pointage			
ID	IDe	MT	Ecart-type Temps
1,00	1,86	4,59	1,51
1,22	2,17	4,36	1,87
1,58	2,33	5,46	2,24
1,58	2,50	5,30	1,29
1,87	2,71	5,25	2,12
2,00	2,88	5,43	1,22
2,32	3,16	5,31	3,45
2,32	2,92	5,85	2,20
2,32	3,04	6,54	2,91
2,81	3,69	6,17	2,08
3,17	3,96	6,51	2,89
3,17	4,04	6,10	2,77
3,70	4,60	6,45	2,74
4,09	4,84	7,01	2,32
4,64	5,10	7,17	1,75

Tableau 23 : Résultats MPH du participant 2 pour le Goal Crossing

Goal Crossing			
ID	IDe	MT	Ecart-type Temps
1,00	2,87	2,25	0,99
1,22	3,21	1,99	0,33
1,58	4,68	1,94	0,13
1,58	5,56	2,68	0,42
1,87	5,60	2,89	1,23
2,00	8,02	3,17	0,43
2,32	4,24	2,02	0,52
2,32	5,48	2,60	0,16
2,32	8,10	3,17	0,56
2,81	7,23	3,33	1,25
3,17	4,49	1,95	0,13
3,17	5,53	2,68	0,59
3,70	6,14	3,29	1,32
4,09	5,46	2,64	0,35
4,64	7,98	3,18	0,63

## Annexe 4 Tableau de données JACO

**Tableau 24 : Participant 1 Clavier Déviation  
Exercice 1**

Clavier	Exo 1	Déviatiion moyenne
Pointage	Essai 1	2,098729045
Pointage	Essai 2	1,909155345
Pointage	Essai 3	1,338177125
Pointage	Essai 4	1,236172549
Pointage	Essai 5	2,384280213
Pointage	Essai 6	1,130064552
	Moyenne	1,682763138
	Ecart-type	0,4479584

**Tableau 25 : Participant 1 PIE Menu Niveau  
Déviation Exercice 1**

Niveau	Exo 1	Déviatiion moyenne
Pointage	Essai 1	1,37112384
Pointage	Essai 2	0,824396789
Pointage	Essai 3	0,797752414
Pointage	Essai 4	0,592117594
Pointage	Essai 5	1,153424201
Pointage	Essai 6	1,012017107
	Moyenne	0,958471991
	Ecart-type	0,22038306

**Tableau 26 : Participant 1 PIE Menu Extension Déviation Exercice 1**

Extension		Déviatiion moyenne
Goal Crossing	Essai 1	1,668733318
Pointage	Essai 1	1,135973277
Goal Crossing	Essai 2	1,137881596
Pointage	Essai 2	0,819346349
Goal Crossing	Essai 3	3,576608633
Pointage	Essai 3	1,403720981
Goal Crossing	Essai 4	0,534299489
Pointage	Essai 4	0,693554818
Goal Crossing	Essai 5	2,374102783
Pointage	Essai 5	1,048534275
Goal Crossing	Essai 6	3,196836976
Pointage	Essai 6	0,773418765
	Pointage Moyenne	0,979091411
	Pointage Ecart-type	0,21698477
	Goal Crossing Moyenne	2,081410466
	Goal Crossing Ecart-type	0,96777233

**Tableau 27 : Participant 1 Clavier Déviation  
Exercice 2**

Clavier	Exo 2	Déviatiion moyenne
Pointage	Essai 1	3,35591292
Pointage	Essai 2	2,002787867
Pointage	Essai 3	2,373172054
Pointage	Essai 4	1,412610403
Pointage	Essai 5	1,526271842
Pointage	Essai 6	1,501655337
	Moyenne	2,028735071
	Ecart-type	0,55720494

**Tableau 28 : Participant 1 PIE Menu Niveau  
Déviation Exercice 2**

Niveau	Exo 2	Déviatiion moyenne
Pointage	Essai 1	1,74225329
Pointage	Essai 2	2,093136655
Pointage	Essai 3	1,372400683
Pointage	Essai 4	1,335745848
Pointage	Essai 5	0,781681955
Pointage	Essai 6	1,357405606
	Moyenne	1,447104006
	Ecart-type	0,31372731

**Tableau 29 : Participant 1 PIE Menu Extension Déviation Exercice 2**

Extension		Déviatiion moyenne
Goal crossing	Essai 1	1,442301073
Pointage	Essai 1	1,252576934
Goal crossing	Essai 2	1,439807409
Pointage	Essai 2	0,791521557
Goal crossing	Essai 3	2,471306382
Pointage	Essai 3	0,944944404
Goal crossing	Essai 4	0,704735769
Pointage	Essai 4	0,902934341
Goal crossing	Essai 5	0,854354787
Pointage	Essai 5	0,912187552
Goal crossing	Essai 6	0,997541855
Pointage	Essai 6	0,97585194
	Pointage Moyenne	0,963336121
	Pointage Ecart-type	0,10058554
	Goal crossing Moyenne	1,318341213
	Goal crossing Ecart-type	0,46613041

**Tableau 30 : Participant 2 Clavier Déviation  
Exercice 1**

Clavier	Exo1	Déviatiion moyenne
Pointage	Essai 1	13,89603649
Pointage	Essai 2	19,9876027
Pointage	Essai 3	7,41062742
Pointage	Essai 4	8,511946987
Pointage	Essai 5	12,90543579
Pointage	Essai 6	16,32896024
	Moyenne	13,17343494
	Ecart-type	3,56409821

**Tableau 31 : Participant 2 PIE Menu Niveau  
Déviation Exercice 1**

Niveau	Exo 1	Déviatiion moyenne
Pointage	Essai 1	5,430589271
Pointage	Essai 2	10,39741707
Pointage	Essai 3	3,432846301
Pointage	Essai 4	5,673392371
Pointage	Essai 5	5,488284777
Pointage	Essai 6	6,095456888
	Moyenne	6,086331112
	Ecart-type	1,44007058

**Tableau 32 : Participant 2 PIE Menu Extension Déviation Exercice 1**

Extension	Exo 1	Déviatiion moyenne
Goal crossing	Essai 1	14,82007478
Pointage	Essai 1	5,655828549
Goal crossing	Essai 2	6,327172619
Pointage	Essai 2	4,333409354
Goal crossing	Essai 3	9,800689715
Pointage	Essai 3	4,000355706
Goal crossing	Essai 4	12,23135829
Pointage	Essai 4	2,470227303
Goal crossing	Essai 5	25,94746432
Pointage	Essai 5	6,247264405
Goal crossing	Essai 6	19,13445626
Pointage	Essai 6	3,591611294
	Pointage Moyenne	4,383116102
	Pointage Ecart-type	1,04562025
	Goal crossing Moyenne	14,71020266
	Goal crossing Ecart-type	5,25712912

**Tableau 33 : Participant 2 Clavier Déviation  
Exercice 2**

Clavier	Exo 2	Déviatiion moyenne
Pointage	Essai 1	12,13374989
Pointage	Essai 2	14,96736346
Pointage	Essai 3	15,03237478
Pointage	Essai 4	11,77022222
Pointage	Essai 5	10,26387997
Pointage	Essai 6	10,62251263
	Moyenne	12,46501716
	Ecart-type	1,68990131

**Tableau 34 : Participant 2 PIE Menu Niveau  
Déviation Exercice 2**

Niveau	Exo 2	Déviatiion moyenne
Pointage	Essai 1	4,636959671
Pointage	Essai 2	5,770316178
Pointage	Essai 3	9,02868575
Pointage	Essai 4	3,030219524
Pointage	Essai 5	4,997711951
Pointage	Essai 6	5,666485367
	Moyenne	5,52172974
	Ecart-type	1,30009936

**Tableau 35 : Participant 2 PIE Menu Extension Déviation Exercice 2**

Extension	Exo 2	Déviatiion moyenne
Goal crossing	Essai 1	9,520701456
Pointage	Essai 1	2,456135044
Goal crossing	Essai 2	19,0943035
Pointage	Essai 2	4,094319585
Goal crossing	Essai 3	13,56311158
Pointage	Essai 3	1,720724403
Goal crossing	Essai 4	11,34181443
Pointage	Essai 4	1,192847244
Goal crossing	Essai 5	10,29250328
Pointage	Essai 5	4,541196973
Goal crossing	Essai 6	15,08953364
Pointage	Essai 6	4,609498595
	Pointage Moyenne	3,102453641
	Pointage Ecart-type	1,31255141
	Goal crossing Moyenne	13,15032798
	Goal crossing Ecart-type	2,76532159

# Annexe 5 Avantages et Inconvénients des concurrents de SoKeyTo

## 1. Les interfaces de saisie

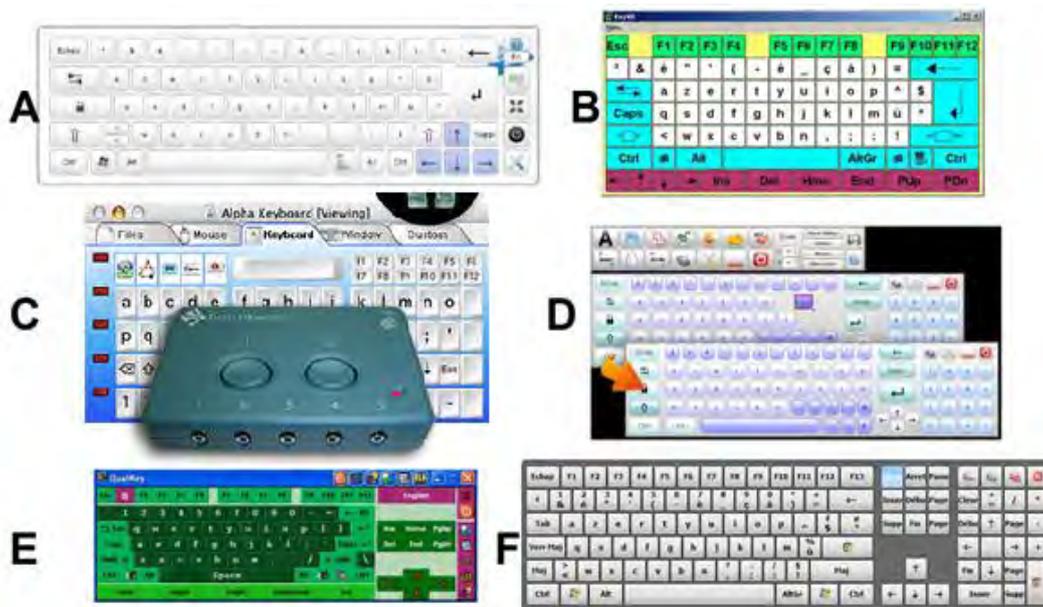
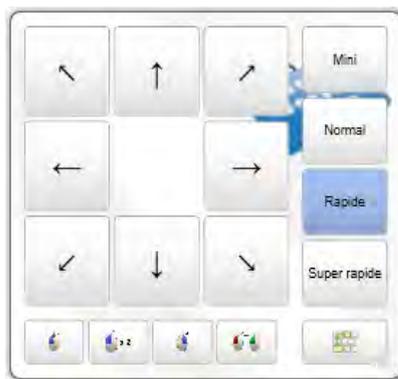


Figure 146 : Présentation de solution commerciale, A Civikey, B KeyVit, C Discover Envoy, D Clavicom NG, E Qualikeys et F Hot Virtual Keyboard

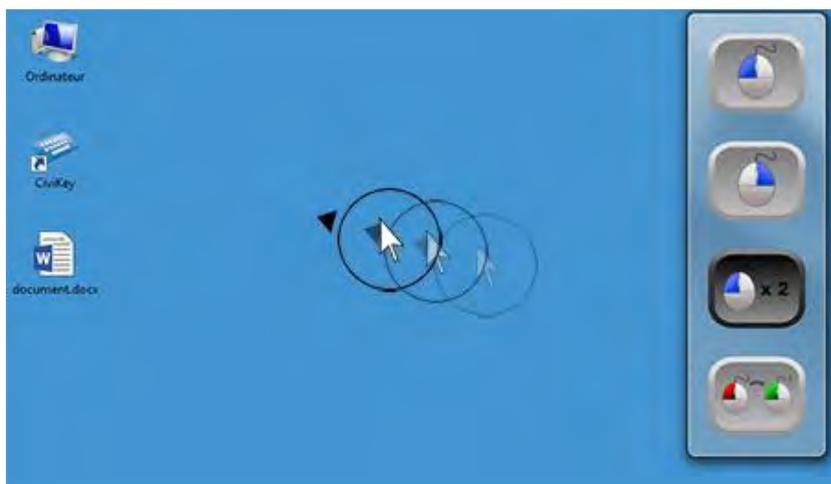
**Civikey** (Figure 146 A) permet l'écriture et l'accès à l'ordinateur sous Windows à partir des techniques d'interaction, pointage, clic temporisé et balayage.

**Avantages :** Civikey possède une base donnée de plusieurs claviers, cette base de données peut être enrichie grâce à l'éditeur de clavier. L'éditeur de clavier contient une zone de dessin et des panneaux sur lesquels on peut définir les différentes fonctions de l'application. Civikey possède aussi 2 techniques de contrôle de souris virtuelle.



**Figure 147 : Contrôleur de souris par balayage de CiviKey**

Sur la Figure 147, il s’agit du clavier de contrôle de souris virtuelle. Ce clavier fonctionne en balayage. L’utilisateur doit en premier choisir s’il effectue un mouvement dans quel cas il a le choix entre 8 directions, les 4 points cardinaux et leurs milieux. Il peut aussi choisir le type de clic (simple gauche, double gauche, droit ou le drag’n drop), le dernier menu du clavier permet de changer la vitesse de déplacement de la souris avec 4 vitesses possibles.



**Figure 148 : Contrôleur de souris "Radar" de Civikey**

Dans le cas de la Figure 148, la deuxième souris virtuelle est une souris radar, un anneau tourne autour du curseur, l’utilisateur doit appuyer sur un contacteur pour choisir une direction indiquée par la flèche noire. Si l’anneau fait un tour complet alors l’utilisateur se retrouve dans le menu de sélection du type de clic. L’avantage de cette souris virtuelle est d’avoir plus de directions de mouvements possibles que la précédente, toutefois le temps de réaction pour choisir la bonne direction est plus difficile à bien choisir.

**Inconvénients** : Il ne possède pas de liste de prédiction pour l'écriture, et il ne permet pas le dialogue avec d'autres applications pour permettre du contrôle d'environnement.

**KeyVit** (Figure 146 B) est un clavier d'écriture qui permet aussi de contrôler l'ordinateur. Il est muni d'un dictionnaire de prédiction sous forme d'application additionnelle, appelée Skippy, qui peut être indépendante.

**Avantages** : KeyVit possède un module d'affectation de fonction aux différentes touches du clavier, ainsi que la possibilité de modifier la taille et la position des touches. Il est possible de sauvegarder un clavier personnalisé pour le réutiliser à tout moment. Il possède les fonctionnalités d'interaction de pointage, de clic temporisé et de balayage, il possède aussi une souris virtuelle équivalente à Civikey Figure 147. Le gros avantage de KeyVit est pour l'écriture, il est possible d'intégrer dans le clavier, des touches de prédiction de l'application Skippy. L'avantage de cette application Skippy est de pouvoir proposer une fenêtre à part, ce qui permet de l'utiliser avec d'autres solutions même s'il a été adapté pour KeyVit. Il possède aussi DocReader une autre application qui permet de lire le texte écrit, ce qui peut être une aide pour les personnes avec des troubles attentionnels.

**Inconvénients** : il ne permet pas l'appel à d'autres applications qui permettent de faire du contrôle d'environnement.

**Discover Envoy** (Figure 146 C) est une application pour remplacer le clavier et la souris, spécialement conçue pour fonctionner avec une interface de commutation Intelliswitch.

**Avantages** : Discover Enjoy est une interface compatible avec le système Mac OS, il existe aussi une version Windows. Il possède une fonction de souris virtuelle. Le boîtier qui se connecte par USB à l'ordinateur permet d'accéder à des contacteurs, pour le balayage. Mais il est aussi possible de définir les fonctionnalités des contacteurs dans le contrôle du système, ou de l'écriture. Il possède aussi une synthèse vocale pour lire le texte écrit

**Inconvénients** : Seul l'onglet custom, permet de personnaliser l'interface. Il n'est pas possible aussi d'associer aux contacteurs des commandes pour communiquer sur d'autres applications, de façon différente que des raccourcis clavier.

**Clavicom NG** (Figure 146 D) est un clavier virtuel pour l'écriture, fait spécifiquement pour les personnes avec des troubles moteurs des membres supérieurs.

**Avantages :** L'éditeur de clavier, est le plus simplifié, une barre d'outils apparaît au-dessus du clavier et transforme la fenêtre du clavier directement en fenêtre de dessin de clavier. La fermeture de la barre d'outils réactive immédiatement le clavier et permet de l'utiliser avec les modifications directement activées et retenues par le système. Il possède aussi une prédiction de mots basée sur son propre dictionnaire.

**Inconvénients :** Clavicom NG est limité à de la saisie de texte. De plus il ne propose pas la fonctionnalité de balayage.

**QualiKey** (Figure 146 E) est un clavier virtuel qui fait partie d'une suite logicielle.

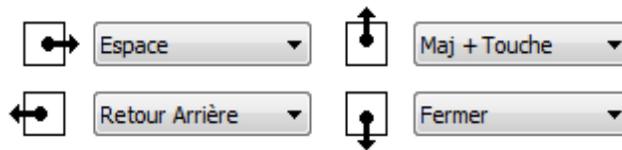
**Avantages :** QualiKey propose différentes techniques d'interaction, entre les classiques, pointage, click temporisé, et balayage. Il est possible d'utiliser QualiEye pour libérer les mains et utiliser des mouvements devant une WebCam pour déplacer le curseur. Il est aussi possible d'utiliser l'application QualiSPEAK pour la lecture du texte écrit, cette application peut être utilisée pour communiquer à l'oral lorsque la personne a des troubles ou des difficultés pour communiquer à l'oral.

**Inconvénients :** L'application ne communique pas avec les applications en dehors de sa suite logicielle.

**Hot Virtual Keyboard** (Figure 146 F), se présente comme un clavier de saisie de texte comme le clavier virtuel de Windows.

**Avantages :** La configuration de l'interaction permet de contrôler les chronomètres de répétition d'une touche, de la même façon qu'un clavier physique, le premier chronomètre permet d'identifier le démarrage de la répétition, puis un autre chronomètre permet d'afficher par seconde le nombre de répétitions souhaité. Il possède aussi un dictionnaire de mots pour de la prédiction.

De plus cette application possède un mode d'interaction supplémentaire aux autres solutions, sous forme de mouvement post pression sur une touche. Il faut sélectionner une touche, puis effectuer un mouvement qui sort de la touche, en fonction du côté par le quel on est sorti une action se déclenche, il est possible de configurer cette fonctionnalité (Figure 149). La fonctionnalité peut être indépendante de la touche sur laquelle on réalise l'action, par exemple fermer l'application. Mais elle peut être aussi dépendante, comme écrire la lettre de la touche courante en majuscule. Il est possible d'avoir 4 fonctionnalités, pour chacune des directions haut, bas, droite, gauche. Ce mode d'interaction s'active pour toutes les touches du clavier.



**Figure 149 : Fonction de mouvement Hot Virtual Keyboard**

D'un point de vue fonctionnel en plus de l'utilisation normal d'une touche clavier, il est possible de créer des touches de « Macro » qui permettent de réaliser un séquençement de touches, ce qui permet entre autre de réduire le nombre d'appuis sur le clavier pour réaliser une action. Parmi les actions possibles, les raccourcis clavier des fonctions alt, ctrl, shift plus d'autres touches, de la navigation internet, mais aussi du traitement de texte. Dans le cas de hot virtual Keyboard, il est aussi possible de démarrer des applications, et de contrôler des fonctions système (son, affichage etc..).

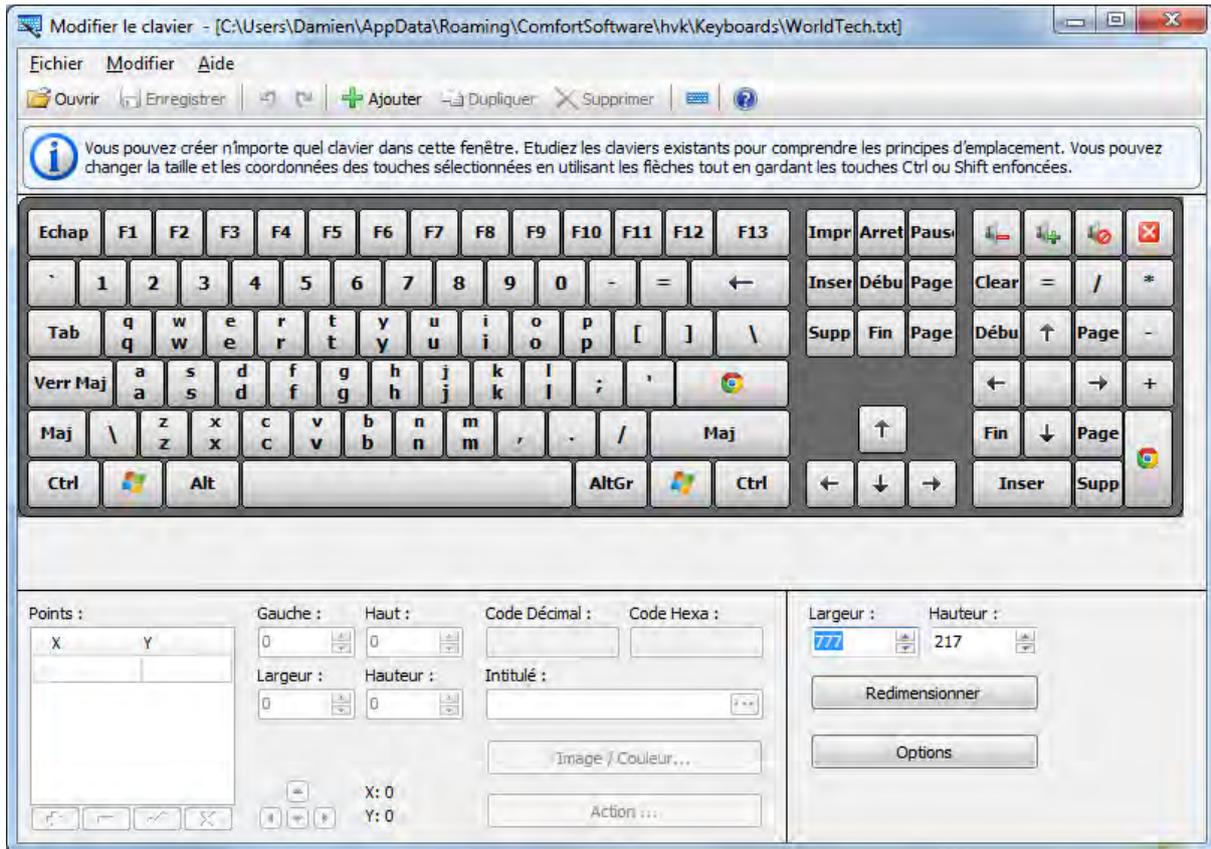


Figure 150 : Plateforme de modification de clavier pour Hot Virtual Keyboard

Pour permettre à l'utilisateur de configurer son clavier, le module d'agencement et de définition de fonction (Figure 150) permet de personnaliser tout le clavier. Par rapport aux autres solutions, il a la possibilité de créer différentes formes de touches, il définit la forme de la touche avec une liste de points (X;Y), parmi les possibilités, il est possible de créer des touches circulaires, pour par exemple créer un PIE menu.

**Inconvénients** : Il n'y a pas de mode balayage sur ce clavier, ce qui limite la population qui peut être amenée à utiliser ce clavier. Il ne peut pas non plus communiquer avec d'autres applications.

## 2. Les plateformes Scientifiques

Du côté science, les plateformes sont développées pour des contextes spécifiques, pour l'évaluation de solutions, ou pour proposer des systèmes ciblés pour des personnes.

**La plateforme TnToolkit** [S.J. Castellucci, I.S. MacKenzie, 2009] a pour but l'évaluation de touches ambiguës dans le contexte de l'écriture. Contrairement à un clavier Azerty, les touches ambiguës permettent d'associer plusieurs caractères à une même touche, elles sont apparues sur les téléphones sur lesquels le nombre de boutons mécaniques était limité à 12 touches (Figure 151).

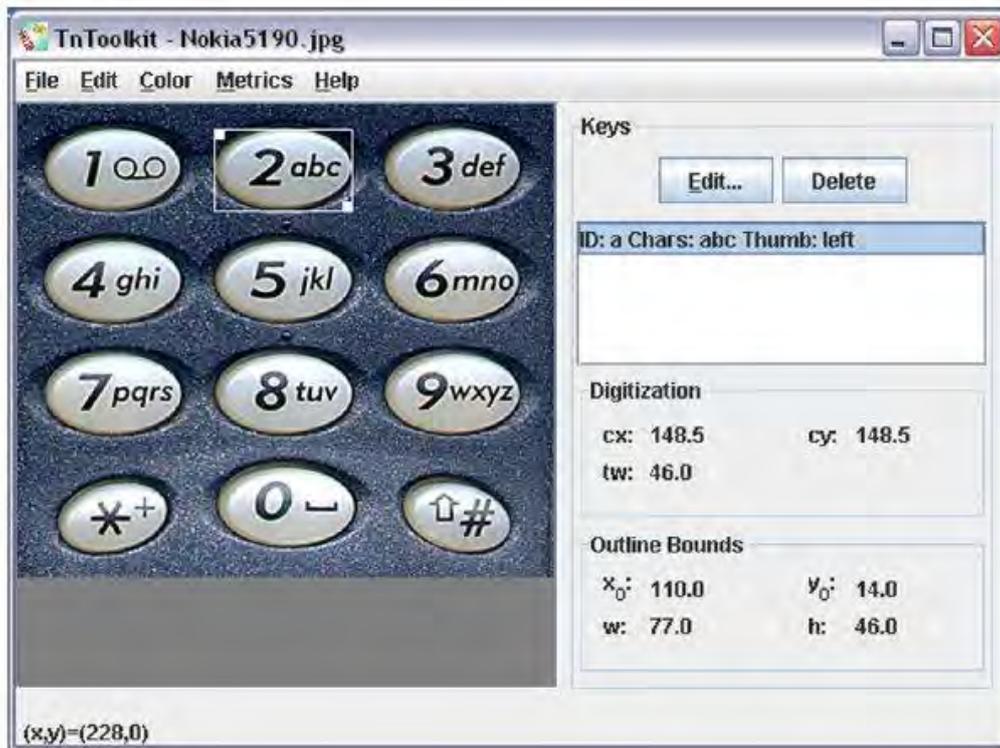


Figure 151 : TnToolkit image [ S.J. Castellucci, I.S. MacKenzie, 2009]

**Avantages :** Les touches ambiguës permettent d'avoir des claviers de plus petite taille, ce qui diminue les déplacements des doigts pour écrire.

TNToolkit permet aussi d'utiliser des techniques d'aide à la saisie comme la solution proposée par Tegic Communications, la technique du T9, qui combine le clavier téléphonique et une modélisation de la langue, qui va analyser l'ambiguïté de la frappe et fera apparaître les mots possibles dans l'ordre de fréquence décroissant de l'usage de ces mots. Et pour valider une proposition la touche « Espace » est utilisée. Le système de T9 permet donc de diminuer le nombre de frappes sur le clavier téléphonique.

TnToolkit a été conçue pour faciliter l'évaluation et l'analyse rapide des claviers ambigus à partir d'un modèle KLM [S.K. Card et al 1983]. L'objectif principal est de pouvoir comparer des claviers ambigus avec un nombre de touches variables, avec des dispositions différentes, ainsi que pour comparer des outils de prédictions.

Ceci doit aider les chercheurs et les cliniciens à créer des nouveaux logiciels de claviers virtuels et à les évaluer au travers de différents exercices. L'interface permet aussi un affichage des performances réalisées (Figure 152).

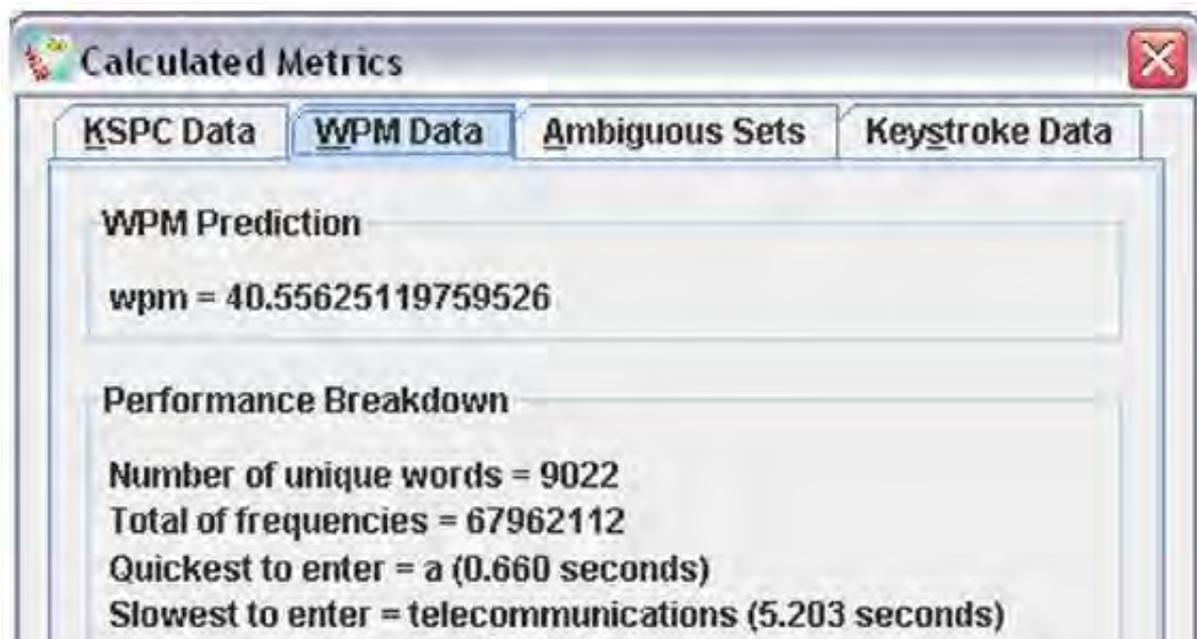


Figure 152 : TnToolkit évaluation [S.J. Castellucci, I.S. MacKenzie, 2009]

**Inconvénients** : La plateforme se limite aux touches ambiguës, de plus les touches ambiguës nécessitent plusieurs validations d'une même touche pour choisir le caractère ; le nombre de validations est donc plus important que pour un clavier classique Azerty.

**La plateforme E-Assist II** [B. Merlin et al. 2012] a pour objectif d'évaluer les techniques d'interaction sur un clavier virtuel pour des tâches d'écriture Figure 153.

**Avantages** : Il utilise une représentation XML des claviers, ce qui a pour avantage la possibilité de conserver, voire d'utiliser les claviers conçus sans l'application.

Différents modules d'interaction peuvent ainsi être ajoutés pour évaluer une technique d'interaction particulière. Les évaluations sont visualisables sur le module d'évaluation, Figure 153. Ce module permet la visualisation du texte en parallèle du temps mis à la réalisation de chacune des tâches. Il est ainsi possible d'identifier de possibles erreurs d'interaction quant à la complétude de la tâche.

**Inconvénients** : Cette plateforme se limite à la réalisation de tâches d'écriture.

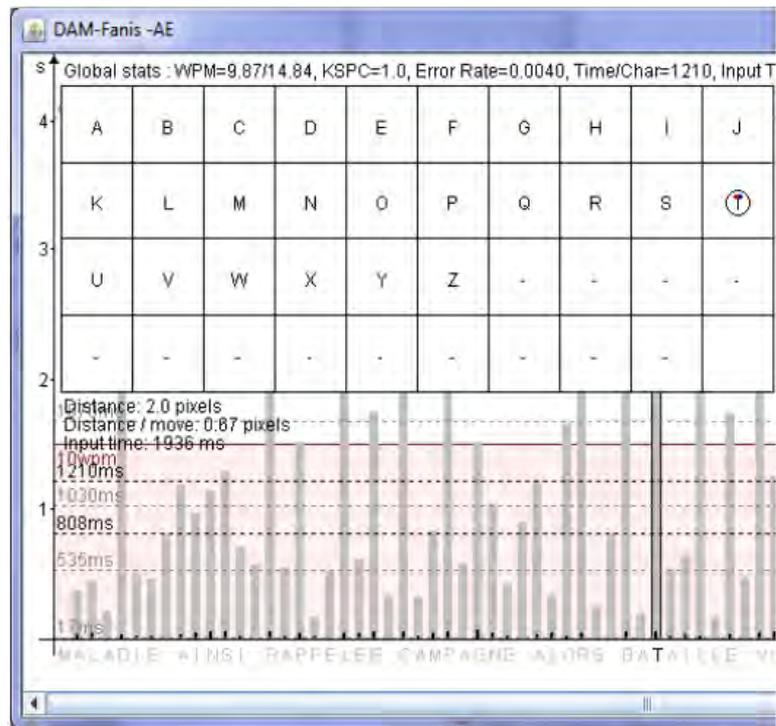


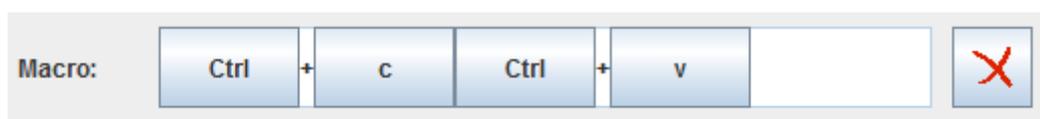
Figure 153 : E-Assist II Evaluation emprunté à B. Merlin et al. 2012

# Annexe 6 Notice du fonctionnement de la plateforme SoKeyTo

## 1. Les fonctions des touches

**La touche normale** correspond à une touche du clavier physique, sa fonction est la même que la touche physique choisie. Elle permet aussi le maintien d'une touche enfoncée le temps d'appui sur cette dernière (elle est principalement utilisée pour écrire, mais permet également de naviguer dans le texte à partir de touches du clavier par exemple). Le fait de pouvoir garder enfoncée la touche permet d'accéder à la répétition propre au système d'exploitation, et ne nécessitera pas d'appui répété sur une même touche.

Mais la touche normale est insuffisante pour réaliser la grande majorité des actions possibles à partir d'un clavier. Sur un clavier virtuel, l'utilisateur ne possède qu'un seul curseur et ne peut appuyer en simultané que sur une unique touche. **Les Macro** permettent d'effectuer des séquences de touches clavier en une seule touche. Par exemple, l'une des fonctions les plus connues est la touche CTRL + la touche C pour copier une sélection, ou aussi sa combinaison complémentaire CTRL + la touche V pour coller une copie. Les Macro sont créées à partir d'une interface qui leur est propre. Un composant graphique a été créé Figure 154. Comme sur une barre de saisie de texte, on clique dessus et on écrit du texte, le texte écrit s'affiche sous forme de boutons et non sous forme de caractères ; toutefois, ce n'est pas une barre de saisie de texte, puisque les touches « entrée », « flèches », « espace » ou « backspace » ..., ajoutent une touche, à la place de leurs actions habituelles. Il a donc été ajouté un bouton, avec comme icône une croix rouge, pour remettre à zéro la barre macro, ou il suffit de cliquer sur un bouton pour le supprimer. Il est aussi possible d'appuyer simultanément sur plusieurs touches, lors d'un appui simultané, les touches seront associées par un petit « + » entre elles. En termes de séquence, la macro sera écrite dans l'ordre d'apparition des touches. Dans le cas d'appui simultané, par exemple CTRL+C de la Figure 154, « CTRL » sera appuyé en premier puis maintenu, la touche « C » sera émise à son tour, puis dans l'ordre inverse seront effectués les relâchements de touches, donc « C » sera relâché en premier, suivi de « CTRL ».



**Figure 154 : Barre de création de Macro**

Pour la communication écrite, il existe 2 autres solutions, les **touches textes** permettent, tout simplement de copier un mot ou un texte préenregistré. Cela peut être utile en temps que raccourci d'écriture si une personne utilise régulièrement certains mots, ou même certaines phrases. La dernière solution d'écriture est la **touche ambiguë**. C'est l'équivalent des touches d'écriture téléphonique des téléphones à touches, par exemple la touche « 2 abc », au premier appui de la touche en mode écriture, la lettre « a » est écrite, puis si l'utilisateur ré-appuie vite sur la touche, le « a » sera remplacé par un « b ». L'avantage des touches ambiguës est de permettre d'écrire avec moins de touches ; sur un clavier téléphonique les 26 lettres de l'alphabet sont contenues dans seulement 8 touches. Elles peuvent être utiles sur les petites interfaces, sur lesquelles le nombre de touches ne peut être important, puisque des touches trop petites sont difficiles d'atteinte (Loi de Fitts).

La communication écrite n'est pas la seule activité possible avec un clavier, comme vu auprès des autres plateformes, il est important pour un clavier de pouvoir communiquer avec les autres applications. Dans le cas de la plateforme SoKeyTo, il est possible de démarrer d'autres applications grâce aux **touches d'exécution**. Prenons l'exemple ci-dessous :

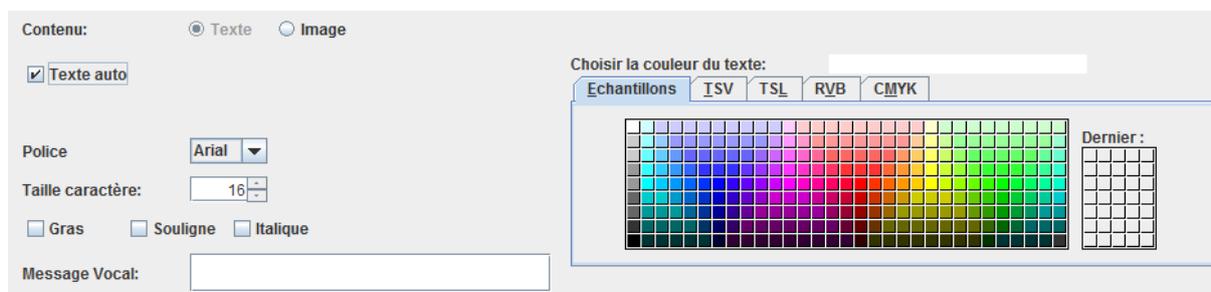
**C:\Program Files (x86)\Skype\Phone\Skype.exe /callto:(numero!ou!pseudo)**

La touche associée à ce texte, permet de démarrer l'application « SKYPE ». Celle-ci permet d'appeler un proche, à partir de l'adresse où se situe l'application, à laquelle on ajoute le nom de l'exécutable. Mais en plus il est possible d'ajouter des options dans notre cas « /callto: » permet de démarrer « SKYPE » en appelant directement une personne, toutefois « (numero!ou!pseudo) » doit être remplacé par le pseudonyme de la personne ou son numéro. Pour plus d'accessibilité auprès d'autres applications, il est donc possible d'utiliser des options de démarrage, ou d'ajouter des raccourcis clavier.

Mais il existe une dernière méthode pour communiquer avec d'autres applications: l'utilisation du **bus Ivy**. « Ivy est un bus logiciel permettant de mettre en relation rapidement plusieurs "modules" de code à priori incompatibles entre eux. ». Le Bus Ivy permet l'intercommunication entre applications au travers d'un Bus de communication. Dans notre cas, il est principalement utilisé pour la synthèse vocale, un module appelé « PPilot », est à l'écoute du Bus Ivy. Avec SoKeyTo il est possible d'envoyer un message à « PPilot » sur le bus Ivy. « PPilot » va ensuite utiliser le module de Windows « SAPI5 » pour lire avec la synthèse vocale le message envoyé.

La dernière fonctionnalité possible est les touches de navigation entre les couches claviers. Nous reviendrons sur l'explication des couches sur la partie du module de gestion des couches.

Le module de définition fonctionnelle permet aussi de définir le contenu visuel et auditif d'une touche. C'est ce contenu qui permet d'identifier une touche, ainsi que sa fonction. La première possibilité est d'écrire du texte, il est possible de définir la police, la taille, le style du texte et sa couleur (Figure 155). Ce dernier devra être en adéquation avec le choix de la couleur de fond du module morphologique.



**Figure 155 : Choisir l'option d'identification de la fonction**

Dans le cas où le texte est insuffisant, ou que la personne possède des troubles pour la lecture, il est aussi possible d'associer une image (Figure 156) à la touche. Il faudra choisir une image et définir la proportion que prendra cette image sur la touche. Il est important pour les feedback que l'image ne prenne pas l'ensemble de la touche pour que la couleur de fond de touche puisse apparaître pour de possibles feedback visuels.

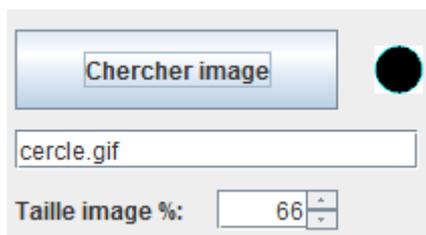


Figure 156 : Choix du pictogramme

Dans le cas où la personne a de véritables troubles visuels, ou des troubles attentionnels, il est possible d'associer à une touche un feedback vocal qui permet d'identifier la touche.

## 2. La gestion des couches

Il existe sur les claviers physiques des touches qui permettent de modifier les actions des autres touches, par exemple les touches majuscules qui passe le clavier en majuscule, ou aussi la touche « fn » des claviers d'ordinateurs portables qui permet de modifier les fonctionnalités des touches tant qu'elle est appuyée.

L'objectif de ces touches est de permettre d'ajouter des fonctionnalités supplémentaires alors que toutes les touches de l'interface sont déjà utilisées. Il sera associé à chaque touche plusieurs fonctionnalités, ces fonctionnalités ne seront accessibles que si la couche sur laquelle la fonction est définie est active. Ce sont les touches de navigation de couches qui permettent d'activer différentes couches.

Chaque couche peut être vue comme étant une autre interface. Il est donc possible de créer une interface principale qui permet d'accéder à des sous-interfaces spécifiques à une activité précise. Elles ont donc aussi un but organisationnel.

Une interface de SoKeyTo (Figure 157) permet de sélectionner une touche et la couche active, pour ensuite avec le module fonctionnel y associer une fonction. Il y aura donc pour une touche autant de fonctions et de représentations de la fonction qu'il y aura de couches.

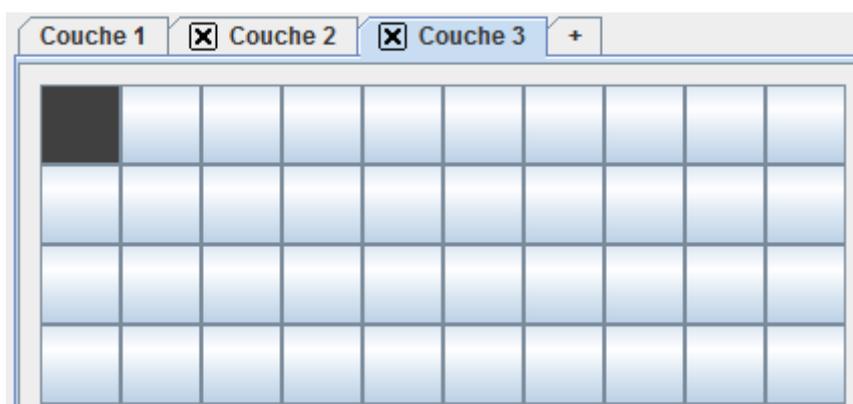


Figure 157 : Gestion des couches et de la sélection des touches

### 3. Description DTD du fichier XML des interfaces SoKeyTo

<!ELEMENT Clavier Touche\*,Balayage ?>

La description d'une touche se fait grâce aux différents modules de SoKeyTo. Le module d'agencement permet de créer plusieurs touches : il ajoute un élément Touche pour chacune des touches de l'interface.

<!ELEMENT Touche Position,Taille,Couleur,Forme,Couche+>

Le module d'agencement permet aussi de renseigner l'élément position qui donne l'emplacement de la touche sur l'interface. Les coordonnées de la touche correspondent au coin haut gauche de la touche, X est la position en pixels en partant de la gauche vers la droite sur l'interface, et Y est la position en pixels en partant du haut de l'interface vers le bas.

<!ELEMENT Position>

<!ATTLIST Position Y CDATA #REQUIRED X CDATA #REQUIRED>

Le module morphologique permet de renseigner 3 éléments donnés d'une touche. Le premier est la taille de la touche, la hauteur et la largeur de la touche sont en pixels. Puis, l'élément couleur est décrit en RGB (Red Green Blue), les valeurs R, G, B sont les valeurs entières de 0 à 255 associées respectivement au rouge, vert et bleu. Et pour finir la forme de la touche peut-être : rectangulaire, circulaire, ou hexagonale.

<!ELEMENT Taille>

<!ATTLIST Taille Largeur CDATA #REQUIRED Hauteur CDATA #REQUIRED>

<!ELEMENT Couleur>

<!ATTLIST Couleur B CDATA #REQUIRED V CDATA #REQUIRED R CDATA #REQUIRED>

<!ELEMENT Forme>

<!ATTLIST Forme patron CDATA #REQUIRED>

Le module suivant est la gestion des couches qui ajoute dans une touche les éléments couche. Elle contient le « Mode » qui correspond à l'identifiant de la couche. Elle contient différents attributs : « Active » permet de savoir si la touche est affichée sur cette couche, « ModePause » et « ModeRepeat » sont 2 booléens qui sont associés à la technique de « Balayage » que nous présenterons ultérieurement. Quant à « Message » il est rempli par le module fonctionnel, il correspond au feedback audio associé à la fonctionnalité pour cette couche.

<!ELEMENT Couche (Action,Contenu)?>

<!ATTLIST Couche ModeRepeat CDATA #REQUIRED ModePause CDATA #REQUIRED Active (true|false) #REQUIRED Mode CDATA #REQUIRED>

Lorsque la touche est active sur une couche donnée, il est nécessaire d'avoir l'élément d'action, et les éléments de contenu. Dans le cas de l'action, l'élément sera créé à partir du module fonctionnel qui décrit l'action que va réaliser la touche.

<!ELEMENT Action Normal|Macro|Texte|Ivy|Commande|Ambigue|Mode+>

Une touche normale pour la fonctionnalité d'une touche du clavier physique, contient la valeur correspondante à celle-ci.

<!ELEMENT Normal>

<!ATTLIST Normal Valeur CDATA #REQUIRED>

Une touche Macro contient des éléments étapes qui représentent le séquençage des actions de la Macro. Les éléments étapes vont contenir des éléments KeyEvent qui sont les touches du clavier physique ; dans une étape toutes les touches vont être appuyées et maintenues dans l'ordre d'apparition des éléments, et seront relâchées dans l'ordre inverse.

Il sera ici possible de l'améliorer en augmentant l'élément KeyEvent, par un élément qui peut désigner une touche d'une interface SoKeyTo.

```
<!ELEMENT Macro Etape*>  
<!ELEMENT Etape KeyEvent+>  
<!ATTLIST Etape Numeros CDATA #REQUIRED>  
<!ELEMENT KeyEvent>  
<!ATTLIST KeyEvent Key CDATA #REQUIRED>
```

L'élément Texte va contenir une chaîne de caractères qui sera copiée dans les champs de texte lors de l'usage de la touche qui contient cet élément.

```
<!ELEMENT Texte>  
<!ATTLIST Texte Valeur CDATA #REQUIRED>
```

L'élément Ivy contient une chaîne de caractères qui sera le message émis sur le bus Ivy, ce qui permet de communiquer avec d'autres applications qui utilisent le bus Ivy. Il pourra dans une future version aussi permettre à différents claviers SoKeyTo de communiquer entre eux.

```
<!ELEMENT Ivy>  
<!ATTLIST Ivy Message CDATA #REQUIRED>
```

L'élément Commande est associé à la fonctionnalité Java de lancement d'une application. Cela permet de lancer un fichier.exe d'un ordinateur, et il est aussi possible d'ajouter des options de démarrage d'applications. Un exemple possible est le démarrage de l'application Skype, avec en option l'appel automatique d'une personne à partir de son pseudonyme.

```
<!ELEMENT Commande>  
<!ATTLIST Commande Fichier CDATA #REQUIRED>
```

L'élément Ambiguë contient des éléments Etat qui représentent la liste des différentes lettres que la touche ambiguë peut écrire, L'élément état contient un unique caractère ainsi que l'ordre d'apparition de ce dernier, ce qui détermine le nombre de validations de la touche pour écrire ce caractère.

```
<!ELEMENT Ambigue Etat+>
```

<!ELEMENT Etat>

<!ATTLIST Etat Lettre CDATA #REQUIRED Ordre CDATA #REQUIRED >

Le dernier élément des actions de SoKeyTo est le Mode qui permet en fonction de la couche actuellement active, d'activer la couche de la valeur de l'attribut « Direction ».

<!ELEMENT Mode>

<!ATTLIST Mode Direction CDATA #REQUIRED Actuel CDATA #REQUIRED >

Pour chacune des couches actives il est nécessaire aussi d'avoir le contenu d'une touche ; il décrit l'affichage visuel de la touche.

<!ELEMENT Contenu Image |(Couleur,Police,Taille,Fond,Texte)>

Il y a 2 cas :

La touche à une représentation textuelle, il faudra les éléments : Couleur pour la couleur du texte, Police et Taille du texte, ainsi que Fond savoir si le texte est en gras, souligné ou en italique. Et pour finir le dernier élément Texte, Ici il existe une option pour définir automatiquement le texte en fonction de l'action qu'elle réalise, si ce texte n'est pas pertinent il est possible d'écrire un texte dans l'attribut Fixe.

<!ELEMENT Couleur>

<!ATTLIST Couleur B CDATA #REQUIRED V CDATA #REQUIRED R CDATA #REQUIRED>

<!ELEMENT Police>

<!ATTLIST Police Nom CDATA #REQUIRED>

<!ELEMENT Taille>

<!ATTLIST Taille Valeur CDATA #REQUIRED>

<!ELEMENT Font>

<!ATTLIST Font Souligner CDATA #REQUIRED Italique CDATA #REQUIRED Gras CDATA #REQUIRED>

<!ELEMENT Texte>

<!ATTLIST Texte Auto (true|false) #REQUIRED Fixe CDATA #IMPLIED>

Si le contenu descriptif de l'action de la touche est un Pictogramme, alors, il faudra l'élément Image, qui contient le nom du fichier image ainsi que sa Taille en pourcentage. Ce pourcentage est la taille du pictogramme par rapport à la surface total de la touche.

```
<!ELEMENT Image>
```

```
<!ATTLIST Image Taille CDATA #REQUIRED Adresse CDATA #REQUIRED>
```

Pour le balayage dans l'élément clavier, il est possible d'ajouter une représentation de ce dernier. La représentation choisie est un arbre. Les éléments branches sont des ensembles de plusieurs touches et les éléments feuilles sont associés à une touche de l'interface. Actuellement le module de Balayage ne permet que de créer des arbres de taille 3, donc une branche de branche ne pourra contenir que des feuilles.

```
<!ELEMENT Balayage Branche>
```

```
<!ELEMENT Branche (Branche|Feuille)*>
```

```
<!ELEMENT Feuille>
```

```
<!ATTLIST Feuille NumerosTouche CDATA #REQUIRED>
```

#### 4. Description du fichier DTD des traces

Le fichier trace est initialisé avec un élément clavier, décrit par son attribut nom, et il va contenir l'ensemble des éléments qui décrivent la trace d'usage d'un utilisateur.

```
<!ELEMENT Clavier Configuration,(EcranTaille|(Sortie?,Entree?))|Balayage|Move|
```

```
EntreeTouche|SortieTouche|Presse|Released)>
```

```
<!ATTLIST Clavier Nom CDATA #REQUIRED>
```

Le fichier trace va en premier commencer par l'élément de configuration, qui permet de connaître les conditions dans lesquels l'interface a été utilisée. Il contient l'état de tous les paramètres du module de configuration.

```
<!ELEMENT Configuration>
```

```
<!ATTLIST Configuration Repetition CDATA #REQUIRED SelectionRelachement CDATA #REQUIRED
```

```
SelectionClick CDATA #REQUIRED SynthesePhrase CDATA #REQUIRED SyntheseMot CDATA  
#REQUIRED ActivationSynthese CDATA #REQUIRED AutoTrace CDATA #REQUIRED  
Clicktemporise CDATA #REQUIRED Transparence CDATA #REQUIRED Frequence CDATA  
#REQUIRED Delai CDATA #REQUIRED>
```

Les éléments suivants sont la liste des différentes actions que peut réaliser l'utilisateur, ce qui permet d'identifier le type d'action que réalise l'utilisateur ainsi que son temps de réalisation de chacune des actions. Lors de l'installation, il est possible que l'utilisateur redimensionne l'interface, pour adapter l'interface à son écran, de plus l'identification de la taille de l'interface permet de connaître les ratios tailles des boutons de l'interface.

```
<!ELEMENT EcranTaille>
```

```
<!ATTLIST EcranTaille MaxY CDATA #REQUIRED MinY CDATA #REQUIRED MaxX CDATA  
#REQUIRED MinX CDATA #REQUIRED ratioTailleY CDATA #REQUIRED ratioTailleX CDATA  
#REQUIRED>
```

Puis nous avons 2 cas de figure :

-soit la configuration est en mode balayage, alors le seul évènement sera l'utilisation d'un contacteur.

```
<!ELEMENT Balayage>
```

```
<!ATTLIST Balayage Y CDATA #REQUIRED X CDATA #REQUIRED T CDATA #REQUIRED Couche  
CDATA #REQUIRED Touche CDATA #REQUIRED>
```

-soit l'utilisateur manipule le curseur sur l'interface, dans ce cas la première action sera de récupérer le mouvement du curseur.

```
<!ELEMENT Move>
```

```
<!ATTLIST Move Y CDATA #REQUIRED X CDATA #REQUIRED T CDATA #REQUIRED>
```

Il est nécessaire de connaître l'entrée et la sortie de l'interface, puisque sous java, les informations du curseur ne seront identifiées que sur l'interface. Il est possible d'utiliser une fonction JNI qui va appeler une fonction codée dans un autre langage qui peut récupérer ces

informations, toutefois la fonction sera dans une DLL qui sera compilée pour un système d'exploitation, ce qui peut limiter la portabilité des interfaces. C'est pour cela que nous identifions les entrées et sorties.

```
<!ELEMENT Entrer>
```

```
<!ATTLIST Entrer Y CDATA #REQUIRED X CDATA #REQUIRED T CDATA #REQUIRED>
```

```
<!ELEMENT Sortie>
```

```
<!ATTLIST Sortie Y CDATA #REQUIRED X CDATA #REQUIRED T CDATA #REQUIRED>
```

Pour affiner l'analyse de l'usage des interfaces, nous avons aussi tracé l'entrée et la sortie de tous les boutons de l'interface, en ajoutant la position et la taille des boutons, dans le cas où l'on intégrerait un goal crossing, pour ce dernier, il sera donc possible de calculer la précision par rapport au dernier mouvement.

```
<!ELEMENT EntreeTouche>
```

```
<!ATTLIST EntreeTouche T CDATA #REQUIRED PositionY CDATA #REQUIRED PositionX CDATA #REQUIRED Largeur CDATA #REQUIRED Hauteur CDATA #REQUIRED Touche CDATA #REQUIRED>
```

```
<!ELEMENT SortieTouche>
```

```
<!ATTLIST SortieTouche T CDATA #REQUIRED PositionY CDATA #REQUIRED PositionX CDATA #REQUIRED Largeur CDATA #REQUIRED Hauteur CDATA #REQUIRED Touche CDATA #REQUIRED>
```

Pour valider un bouton, les évènements de pression et de relâchement du bouton sont nécessaires. Ils contiennent en plus les éléments qui permettent de calculer la précision d'atteinte de la cible, en fonction de la position de la validation, et du centre du bouton, qui se calcule en fonction de la position et de la largeur et hauteur du bouton. De plus pour identifier la fonction, il est nécessaire de connaître la couche active lors de la validation.

```
<!ELEMENT Presse>
```

```
<!ATTLIST Presse Y CDATA #REQUIRED X CDATA #REQUIRED T CDATA #REQUIRED PositionY CDATA #REQUIRED PositionX CDATA #REQUIRED Largeur CDATA #REQUIRED Hauteur CDATA #REQUIRED Couche CDATA #REQUIRED Touche CDATA #REQUIRED>
```

<!ELEMENT Realeased>

<!ATTLIST Realeased Y CDATA #REQUIRED X CDATA #REQUIRED T CDATA #REQUIRED Couche  
CDATA #REQUIRED Touche CDATA #REQUIRED>



# Annexe 7 Liste des fonctions du protocole HandiMathKey

Pendant la phase de découverte :

- $\frac{1}{2}$
- $\frac{AP}{AD} = \frac{AH}{AK} = \frac{HP}{KD}$
- $\sqrt{8-3}$
- $(\sqrt{a})^2 = a$
- $7\sqrt{5} + 9\sqrt{5}$
- $\sqrt{\frac{100}{64}}$
- $\frac{5\sqrt{2}}{\sqrt{2}}$
- $2^{40} = 2^{1+39} = 2^1 \times 2^{39} = 2 \times 2^{39}$
- $\frac{5 \times 10^2}{4 \times 10^{-4}}$

Durée de réalisation estimée pour une personne valide :

- Avec les outils Word : ~ 5 minutes
- Avec le clavier Collège : ~ 3 minutes

Pendant la phase de tests :

*Partie générale*

- $5z + 2 \leq 35$
- $4x > 32 - 4x$
- $\frac{-3}{5} \div \left(\frac{13}{8} - \frac{-8}{5}\right)$
- $A = 8 \times 10^9 + 11,6 \times 10^{-4}$
- $KA = \sqrt{DA^2 - DK^2} = \sqrt{60^2 - 11^2} = \sqrt{3479} \approx 59,0\text{cm}$
- $B = \sqrt{16} \times \sqrt{2} \times \sqrt{9} \times \sqrt{2} \times \sqrt{4} \times \sqrt{2} = 4 \times \sqrt{2} \times 3 \times \sqrt{2} \times 2 \times \sqrt{2} = 48\sqrt{2}$
- $C = (2\sqrt{6} - 5\sqrt{10})^2 = (2\sqrt{6})^2 - 2 \times 2\sqrt{6} \times 5\sqrt{10} + (5\sqrt{10})^2$

Durée de réalisation estimée pour une personne valide :

- Avec les outils Word : ~ 10 minutes
- Avec le clavier Collège : ~ 4 minutes

*Partie Géométrie*

- $\mathcal{A}_2 = \frac{3 \times 7,5}{2} = 11,25\text{m}^2$
- $\mathcal{V} = \frac{4}{3}\pi(2R)^3 = \frac{4}{3}\pi 2^3 R^3 = \frac{4}{3}\pi 8R^3$
- 
- $JN = \frac{4,4 \times 9,6}{6,1} \approx 6,924\text{cm}$
- $\widehat{BCA} \approx 6^\circ$
- $\widehat{CD} \neq \widehat{AB}$
- $[AB] \perp (CD)$
- $\overline{AB} = \overline{DC}$

Durée de réalisation estimée pour une personne valide :

- Avec les outils Word : ~ 7 minutes
- Avec le clavier Collège : ~ 3 minutes

*Partie Trigonométrie*

- $\cos \widehat{RXO} = \frac{RX}{XO}$   
 $\cos 28 = \frac{4,6}{XO}$   
 $XO = \frac{4,6}{\cos 28} \approx 5,2\text{cm}$
- $\widehat{AWH} = \sin^{-1} \left( \frac{8,6}{10,6} \right) \approx 54,2^\circ$

Durée de réalisation estimée pour une personne valide :

- Avec les outils Word : ~ 4 minutes
- Avec le clavier Collège : ~ 2 minutes

*Partie Probabilités/Statistiques*

- $p(J,R) = \frac{1}{5} \times \frac{3}{4} = \frac{3}{20}$
- $P_B(3) > p_C(3) > p_A(3)$
- $\bar{x} = \frac{9+11+13}{3} = 11$
- $Q_1 = \frac{1}{4} + 1^8 = 1,25$
- E a une probabilité de 10%

Durée de réalisation estimée pour une personne valide :

- Avec les outils Word : ~ 3 minutes
- Avec le clavier Collège : ~ 2 minutes

*Partie Fonctions*

- $E = (3x + 3)(3x - 3) + (7x - 9)(4x + 6)$   
 $E = (3x)^2 - 3^2 + 28x^2 + 42x + (-36x) + (-54)$   
 $E = 9x^2 - 9 + 28x^2 + 6x - 54$   
 $E = 37x^2 + 6x - 63$
- $(10x - 7)(1 - (10x - 6))$
- $f(x) = \frac{2x+8}{8} - \frac{3x+2}{4} = \frac{-7x+7}{2}$
- $\frac{\sqrt{525}}{5} = \frac{\sqrt{5^2 \times 21}}{5} = \frac{5\sqrt{21}}{5} = \sqrt{21}$
- $\sqrt{x_2} = 8$
- $\begin{cases} 4x - 8y = -36 (\times 2) \\ -8x + 2y = -40 (\times 1) \end{cases}$
- $f: x \rightarrow x^2 + 3$

Durée de réalisation estimée pour une personne valide :

- Avec les outils Word : ~ 11 minutes
- Avec le clavier Collège : ~ 6 minutes

**Durée de réalisation totale estimée pour une personne valide (phase de découverte + phase de tests) :**

~ 40 minutes (pour les Outils Word) + ~ 20 minutes (pour le clavier Collège) soit environ 1 heure.



# Annexe 8 Questionnaire HandiMathKey

## Questions posées oralement après chaque séquence :

### Outils de Word

Question 1 : Avez-vous trouvé que les outils de Word étaient trop imposants à l'écran (composés de trop de blocs et/ou de trop d'éléments par blocs) ?

Si oui, pourquoi ? Et quelles sont vos propositions pour y remédier ?

Question 2 : Les touches de navigation (les 2 flèches "Annuler" et "Rétablir") sont-elles bien placées ?

Si non, pourquoi ? Et où les placeriez-vous ?

Question 3 : Souhaiteriez-vous modifier l'agencement de certains blocs ?

Si oui, pourquoi ? Et quelles sont les modifications que vous proposeriez ?

Question 4 : Souhaiteriez-vous modifier l'agencement de certaines touches dans chacun des blocs ?

Si oui, pourquoi ? Et quelles sont les modifications que vous proposeriez ?

Question 5 : Proposeriez-vous une autre représentation pour certaines touches ?

Si oui, quelle représentation donneriez-vous à quelle touche ?

Question 6 : Avez-vous d'autres suggestions ou remarques à proposer sur les outils Word (représentation des touches, choix des couleurs, de l'agencement, technique d'interaction, etc.) ?

### Clavier Virtuel

Question 1 : Avez-vous trouvé que le clavier était trop imposant à l'écran (composé de trop de blocs et/ou de trop d'éléments par blocs) ?

Si oui, pourquoi ? Et quelles sont vos propositions pour y remédier ?

Question 2 : La représentation des quatre flèches de navigation est-elle affordante ?

Si non, pourquoi ? Et comment les représenteriez-vous ?

Question 3 : Les touches de navigation (les 4 flèches et « Fin ») sont-elles bien placées ?

Si non, pourquoi ? Et où les placeriez-vous ?

Question 4 : Souhaiteriez-vous modifier l'agencement de certains blocs ?

Si oui, pourquoi ? Et quelles sont les modifications que vous proposeriez ?

Question 5 : Souhaiteriez-vous modifier l'agencement de certaines touches dans chacun des blocs ?

Si oui, pourquoi ? Et quelles sont les modifications que vous proposeriez ?

Question 6 : Proposeriez-vous une autre représentation pour certaines touches ?

Si oui, quelle représentation donneriez-vous à quelle touche ?

Question 7 : Avez-vous d'autres suggestions ou remarques à proposer pour le clavier mathématique (représentation des touches, choix des couleurs, de l'agencement, technique d'interaction, etc.) ?

### **Questions posées oralement à la fin des séquences 1 et 2 :**

Question 1 : Y a-t-il des représentations ou des symboles qui vous sont inconnus (hors touches de navigation) ?

Si oui, lesquels ?

Question 2 : L'agencement des touches et des fonctions de outils de Word est-il convenable ?

Justifiez votre réponse.

Question 3 : Si vous aviez le choix, quel système de saisie préféreriez-vous utiliser ?

Donnez vos raisons.

## Annexe 9 Résultats de l'étude sur les personnes valides pour HandiMathKey

Le choix de Wilcoxon s'est fait pour uniformiser les tests statistiques, de plus ce test, reste significatif, qu'il y ait ou non une normalité sur les données. Pour le temps avec HMK, sur l'exercice de probabilité, les données sont non-significatives avec une p-value = 0.03015. Pour le nombre d'actions pour Word, la trigonométrie avec une p-value = 0.004138, la probabilité avec une p-value = 0.02167, les fonctionnalités avec une p-value = 0.02984, pour HMK, le général avec une p-value = 0.003654, la géométrie avec une p-value = 0.001337, la trigonométrie avec une p-value = 0.01435, la probabilité avec une p-value = 0.001619, les fonctionnalités avec une p-value = 0.004924, toutes ces valeurs ne sont pas normales. Il en est de même pour la distance par clic pour Word, la probabilité avec une p-value = 0.002752, pour HMK, la trigonométrie avec une p-value = 0.0005845,

**Tableau 36 : Tests statistiques sur la Distance**

Ecart Significativité		Wilcoxon	
Général	**	W = 29, p-value = 0.01209	
Géométrie	**	W = 29, p-value = 0.01209	
Trigonométrie	*	W = 41, p-value = 0.07802	
Probabilité	X	W = 67, p-value = 0.7987	
Fonction	X	W = 81, p-value = 0.6297	
Apprentissage Significativité sur Handi			
Général	X	W = 19, p-value = 0.9372	
Géométrie	X	W = 15, p-value = 0.6991	
Trigonométrie	X	W = 21, p-value = 0.6991	
Probabilité	X	W = 13, p-value = 0.4848	
Fonction	X	W = 17, p-value = 0.9372	
Apprentissage Significativité sur Word			
Général	X	W = 14, p-value = 0.5887	
Géométrie	X	W = 12, p-value = 0.3939	
Trigonométrie	X	W = 18, p-value = 1	
Probabilité	X	W = 16, p-value = 0.8182	
Fonction	X	W = 17, p-value = 0.9372	

**Tableau 37 : Tests statistiques sur la distance par clic**

Ecart Significativité		Wilcoxon
Général	***	W = 14, p-value = 0.0003713
Géométrie	*	W = 38, p-value = 0.05186
Trigonométr	***	W = 14, p-value = 0.0003713
Probabilité	***	W = 27, p-value = 0.008293
Fonction	***	W = 16, p-value = 0.000656

**Tableau 38 : Table de corrélation et de p-value sur la distance par clic et par session**

Word	Correlation					n= 12	P-value				
	[,1]	[,2]	[,3]	[,4]	[,5]		[,1]	[,2]	[,3]	[,4]	[,5]
	[1,]	1.00	0.88	0.76	0.48	0.75	[1,]	0.0002	0.0041	0.1110	0.0047
	[2,]	0.88	1.00	0.80	0.70	0.85	[2,]	0.0002	0.0020	0.0113	0.0005
	[3,]	0.76	0.80	1.00	0.68	0.59	[3,]	0.0041	0.0020	0.0157	0.0431
	[4,]	0.48	0.70	0.68	1.00	0.47	[4,]	0.1110	0.0113	0.0157	0.1267
	[5,]	0.75	0.85	0.59	0.47	1.00	[5,]	0.0047	0.0005	0.0431	0.1267
Handy	Correlation					n= 12	P-value				
	[,1]	[,2]	[,3]	[,4]	[,5]		[,1]	[,2]	[,3]	[,4]	[,5]
	[1,]	1.00	0.92	0.88	0.89	0.91	[1,]	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000
	[2,]	0.92	1.00	0.75	0.83	0.92	[2,]	0.0000	0.0052	0.0009	0.0000
	[3,]	0.88	0.75	1.00	0.83	0.77	[3,]	0.0001	0.0052	0.0008	0.0035
	[4,]	0.89	0.83	0.83	1.00	0.89	[4,]	0.0000	0.0009	0.0008	0.0000
	[5,]	0.91	0.92	0.77	0.89	1.00	[5,]	0.0000	0.0000	0.0035	0.0000

**Tableau 39 : Tests statistiques sur le nombre d'actions**

Ecart Significativité		Wilcoxon
Général	***	W = 10, p-value = 0.0003831
Géométrie	***	W = 16, p-value = 0.001351
Trigonométr	***	W = 5.5, p-value = 0.0001373
Probabilité	***	W = 18, p-value = 0.002005
Fonction	***	W = 20, p-value = 0.00183
Apprentissage Significativité sur Handy		
Général	X	W = 16, p-value = 0.8099
Géométrie	X	W = 16, p-value = 0.8182
Trigonométr	X	W = 18, p-value = 1
Probabilité	X	W = 16.5, p-value = 0.8726
Fonction	X	W = 21, p-value = 0.6991
Apprentissage Significativité sur Word		
Général	X	W = 11, p-value = 0.3095
Géométrie	X	W = 12.5, p-value = 0.4225
Trigonométr	X	W = 10, p-value = 0.2403
Probabilité	X	W = 11, p-value = 0.3095
Fonction	X	W = 10, p-value = 0.2403

Tableau 40 : Tests statistiques sur le temps par session

Ecart Significativité		Wilcoxon		
Général	***	W = 19, p-value = 0.001433		
Géométrie	***	W = 13, p-value = 0.0002744		
Trigonométrie	***	W = 22, p-value = 0.002914		
Probabilité	**	W = 34, p-value = 0.02842		
Fonction	**	W = 35, p-value = 0.03324		
Apprentissage Significativité sur Handi				
Général	X	W = 16, p-value = 0.8182		
Géométrie	X	W = 16, p-value = 0.8182		
Trigonométrie	X	W = 19, p-value = 0.9372		
Probabilité	X	W = 16, p-value = 0.8182		
Fonction	X	W = 20, p-value = 0.8182		
Apprentissage Significativité sur Word				
Général	X	W = 13, p-value = 0.4848		
Géométrie	X	W = 13, p-value = 0.4848		
Trigonométrie	X	W = 16, p-value = 0.8182		
Probabilité	X	W = 13, p-value = 0.4848		
Fonction	X	W = 8, p-value = 0.132		



## Annexe 10 Les concurrents du système

### CECI

**Accessman avec Pictocom** a pour ambition d'améliorer l'accessibilité, il s'agit d'une solution qui allie périphérique et dispositifs qui permettent le pointage avec des interfaces de communication, de contrôle d'ordinateur et de domotique (Figure 158).



Figure 158 : Accessman avec Pictocom emprunté sur le site [www.access-man.com](http://www.access-man.com)

**Avantages :** L'interface est pourvue d'une interaction complète avec le pointage, les interactions tactiles, les commandes vocales, les commandes gestuelles et les systèmes de balayage. Le tout est complété avec Head pilote qui permet de contrôler un ordinateur sans contact, avec uniquement les mouvements de la tête de la personne. Head pilote fonctionne avec une analyse des images qui interprète ensuite les mouvements de la tête pour l'interaction. Un autre avantage est la configuration depuis l'application en dynamique. La personne n'a pas besoin d'une tierce personne pour modifier sa configuration. De plus l'application précédente Civikey est adaptée avec l'usage de Pictocom, ce qui permet à accessman de récupérer les avantages de celui-ci. De plus l'interface est aussi personnalisable, elle permet de choisir les fonctionnalités que la personne souhaite utiliser.

**inconvénients** : Le principal inconvénient est que le contrôle de la domotique se limite à des fonctions infrarouges **Control Omni** se présente sous forme d'un boîtier qui intègre un Smartphone, l'utilisation se fait par écran tactile, par défilement avec un contacteur ou avec un joystick. Il permet l'émission d'infrarouge et de radio.



Figure 159 : Control Omni emprunté au site [www.cree.fr](http://www.cree.fr)

**Avantages** : Il permet la communication avec ses proches, et contrôle l'environnement avec ses émetteurs. Il possède un éditeur pour créer ses différents menus qu'il affiche sur l'écran tactile. Il possède les fonctionnalités du téléphone qui est intégré. Il possède des boutons d'alarme pour avertir les proches.

**Inconvénients** : Il s'agit d'une application fermée qui se limite au téléphone qui est intégré. Il n'est donc pas multiplateforme.

**Housemate Control** : permet de contrôler son environnement via un téléphone ou une tablette sous Android.



Figure 160 : Housemate Control emprunté au site [www.domodep.com](http://www.domodep.com)

**Avantages :** Muni d'un boîtier D-Box, il permet par infrarouge et radio le contrôle de l'environnement. Il se branche sous Android, il permet le contrôle de l'ordinateur par contacteurs, voix, souffle, clicks automatiques. Il intègre un lecteur par synthèse vocale. Il est personnalisable pour les différentes fonctionnalités.

**Inconvénients :** L'application est fournie avec un ensemble d'outils. Le nombre trop important d'outils de base n'en fait pas un outil générique pour les besoins des personnes.

**James4** permet de contrôler l'environnement et permet d'utiliser toutes les fonctionnalités d'un appareil de communication.



Figure 161 : James4 (emprunté au site [www.domodep.com](http://www.domodep.com))

**Avantages :** James4 intègre l'ensemble des technologies sans fil, Infrarouge, RFID, WLAN, GSM, GPS et Bluetooth. Il possède plusieurs interfaces. Et est accessible par voix, écran tactile, contacteur et joystick. Les fonctionnalités sont multiples avec le multimédia, la domotique, la sécurité, agenda, communication et réseaux sociaux. Il possède des capacités d'adaptation à la personne et à ses besoins. L'application est configurable.

**Inconvénients :** James4 est limité au Smartphone.

**EDiTH** [Souhir Ghedira 2009] est une plateforme dont l'objectif est d'apporter de l'autonomie aux personnes en situation de handicap en tenant compte des capacités cognitive et des ressources motrices encore valides, en apportant confort et faible fatigue. Les personnes atteintes d'un handicap moteur important, tétraplégique ou avec des handicaps évolutifs, (ex : sclérose latérale amyotrophique) sont les utilisateurs cibles d'EDiTH.

**Avantages :** L'interface a été créée en fonction des besoins des personnes, l'analyse des besoins est empirique. Le but est d'améliorer leurs quotidiens en agissant sur l'environnement physique et social. Les activités principales sont la communication et le contrôle de l'environnement, mais il est aussi possible de lire, ou de regarder des photos au travers d'une application créée spécifiquement pour EDiTH.

EDiTH fonctionne sous la forme d'une interface par menu accessible par balayage (Figure 162). Dans les configurations le balayage est configurable sur sa vitesse, mais EDiTH possède aussi un algorithme qui analyse l'interaction de la personne, pour prédire son état de fatigue. L'algorithme se base sur le moment d'utilisation du contacteur par rapport au moment où le bouton est devenu sélectionnable. Et en fonction de l'état de fatigue il accélérera ou non le balayage en ajoutant ou retirant 5% du temps à la valeur de vitesse du balayage ; l'objectif étant de diminuer le nombre d'erreurs dans l'interaction.

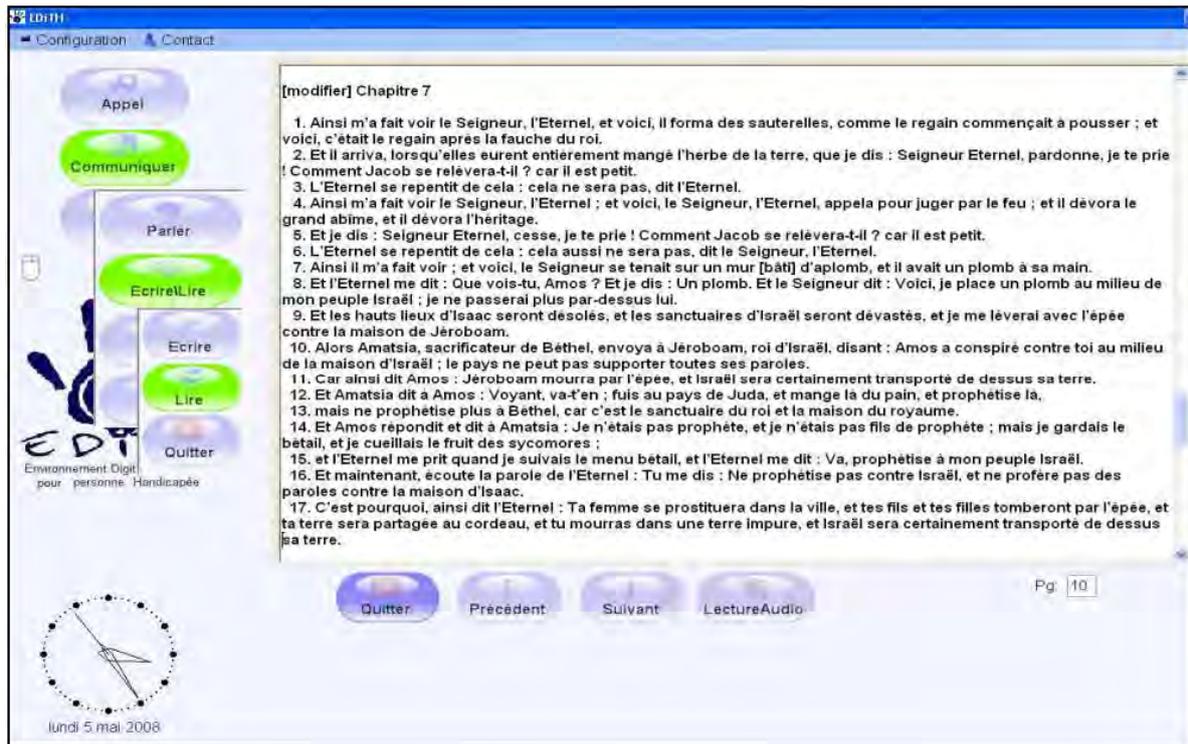


Figure 162 : EDITH Interface pour lire du texte emprunté à la thèse de Souhir Ghedira 2009

**Autonomia** [C.E. Steriadis et P. Constantinou, 2003] (Figure 163) est une plateforme qui augmente la capacité d'interaction des personnes tétraplégiques au travers d'un simple contacteur.

**Avantages :** Autonomia est basé sur une recherche d'une interface optimisée pour le balayage. Un travail a été effectué sur les différents modes de balayage (ligne-colonne, région, diagonal) avec ou sans outils de prédiction afin d'optimiser le temps d'interaction avec les claviers ou interface, Autonomia permet de communiquer entre plusieurs fenêtres de l'application, pour l'écriture, la réalisation de macro de mise en page, le contrôle de la domotique et aussi une application pour la téléphonie.

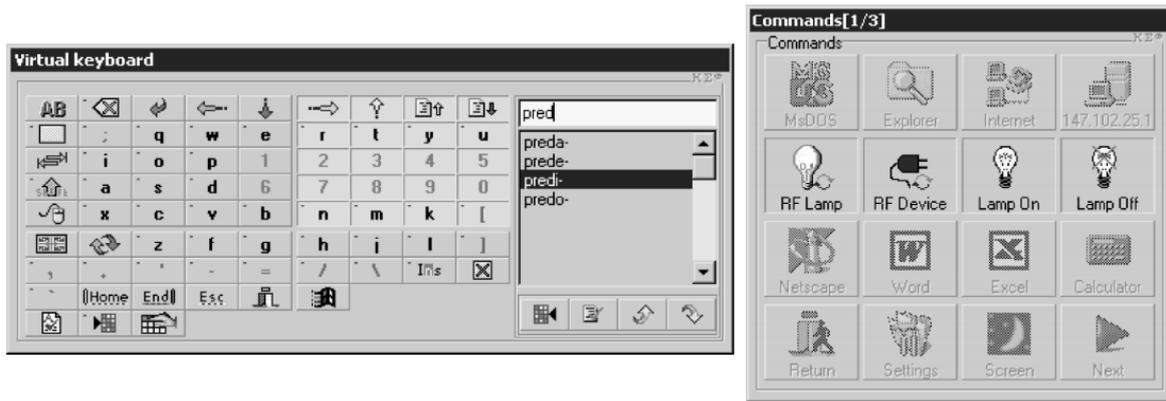


Figure 163 : Autonomia, Fenêtre écriture et domotique, emprunté à C.E. Steriadis et P. Constantinou, 2003

**Inconvénients** : la plateforme ne permet, pas d'ajouter de nouvelles fonctionnalités, et le temps de balayage se retrouve augmenté par les activités que l'utilisateur ne souhaite pas utiliser.

# Annexe 11 Questionnaire de satisfaction de Matthieu

Questionnaire sur les personnes qui ont fait l'expression des besoins pour la conception d'un clavier virtuel avec la plateforme SoKeyTo

Le clavier répond à vos besoins fonctionnels :

Pas du tout	Peu	Moyennement	Assez	Totalement
			X	

Les paramètres de configuration de la technique d'interaction vous permettent de le configurer à votre situation de handicap :

Pas du tout	Peu	Moyennement	Assez	Totalement
	X			

L'option de transparence est utile dans la visualisation de l'écran :

Pas utile du tout	Pas utile	Utile	Assez utile	Très utile
		X		

Le clavier est utile dans la réalisation de la tâche :

Pas utile du tout	Pas utile	Utile	Assez utile	Très utile
		X		

Le clavier est efficient dans la réalisation de la tâche (efficace à utiliser) :

Pas du tout	Peu	Moyennement	Assez	Totalement
			X	

Le clavier est facile à utiliser :

Pas facile du tout	Pas facile	Facile	Assez facile	Très facile
	X			

Le clavier est (facile à se rappeler) :

Pas intuitif du tout	Peu intuitif	Moyennement intuitif	Assez intuitif	Totalement intuitif
		X		

L'utilisation est :

Pas fatigante du tout	Peu fatigante	Moyennement fatigante	Assez fatigante	Totalement fatigante
	X			

L'apprentissage du clavier virtuel est :

Pas facile du tout	Pas facile	Facile	Assez facile	Très facile
		X		

Le clavier virtuel vous paraît :

Pas attrayant du tout	Peu attrayant	Moyennement attrayant	Assez attrayant	Totalement attrayant
			X	

Le clavier me permet de faire plusieurs activités différentes :

Pas du tout	Peu	Moyennement	Assez	Totalement
			X	

La configuration visuelle des touches est :

Pas utile du tout	Pas utile	Utile	Assez utile	Très utile
		X		

La restitution vocale des touches est significative :

Pas du tout	Peu	Moyennement	Assez	Totalement
		X		

La restitution vocale des touches est temporellement adaptée :

Pas du tout	Peu	Moyennement	Assez	Totalement
	X			

L'utilisation de ce clavier vous invite à formuler la demande d'un autre clavier pour un autre objectif :

Pas du tout	Peu	Moyennement	Assez	Totalement
X				

Vous êtes prêt(e) à demander une conception de clavier pour vous-même :

Oui

Non

En Attente

Si oui, pourquoi ?

Oui à partir du moment où le clavier fonctionnera pour Matthieu

.....  
 .....

Vous êtes prêt(e) à recommander ce clavier à un ami :

Oui

Non

Si oui, pourquoi ?

Idem

précédente

.....  
 .....

Vous êtes prêt(e) à demander une conception de clavier pour un ami :

Oui

Non

Si oui, pourquoi ?

Idem

précédente

.....  
.....  
.....

Vous avez le sentiment de gagner en autonomie dans l'utilisation de ce clavier :

Pas du tout	Peu	Moyennement	Assez	Totalement
	X			

Il y a d'autres fonctionnalités que vous aimeriez voir apparaître dans votre clavier :

Oui

Non

Si oui, lesquelles ?

Trop tôt pour le dire

# Annexe 12 Présentation de l'ensemble des itérations du système CECI pour le participant 1

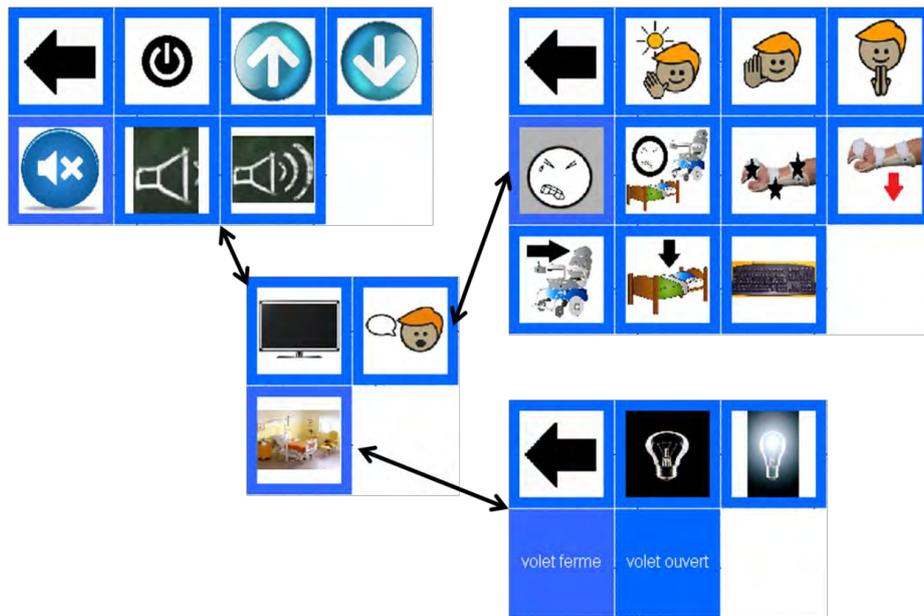


Figure 164 : Version 1 de l'interface du participant 1

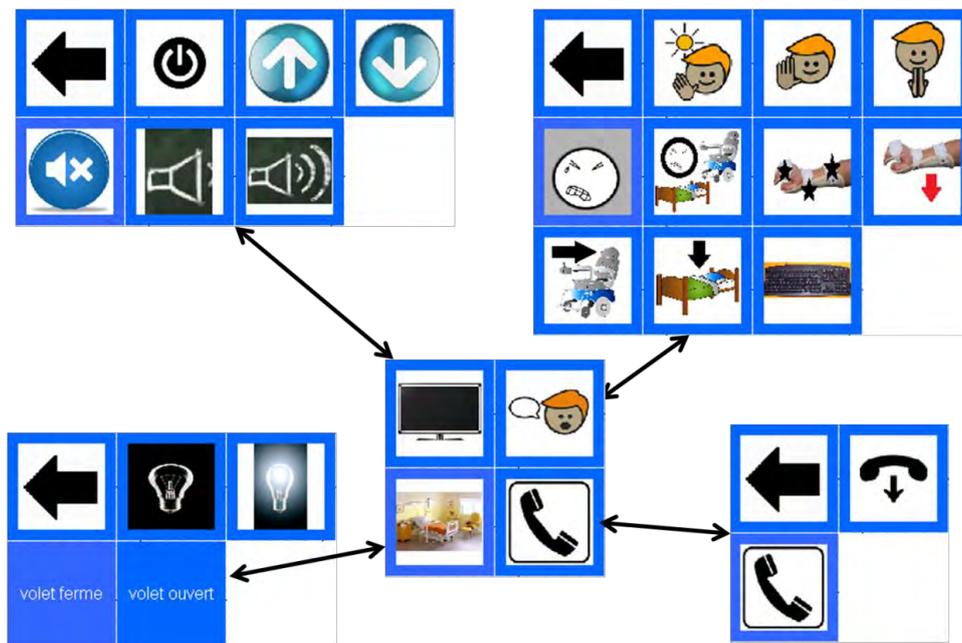


Figure 165 : Version 2 de l'interface du participant 1

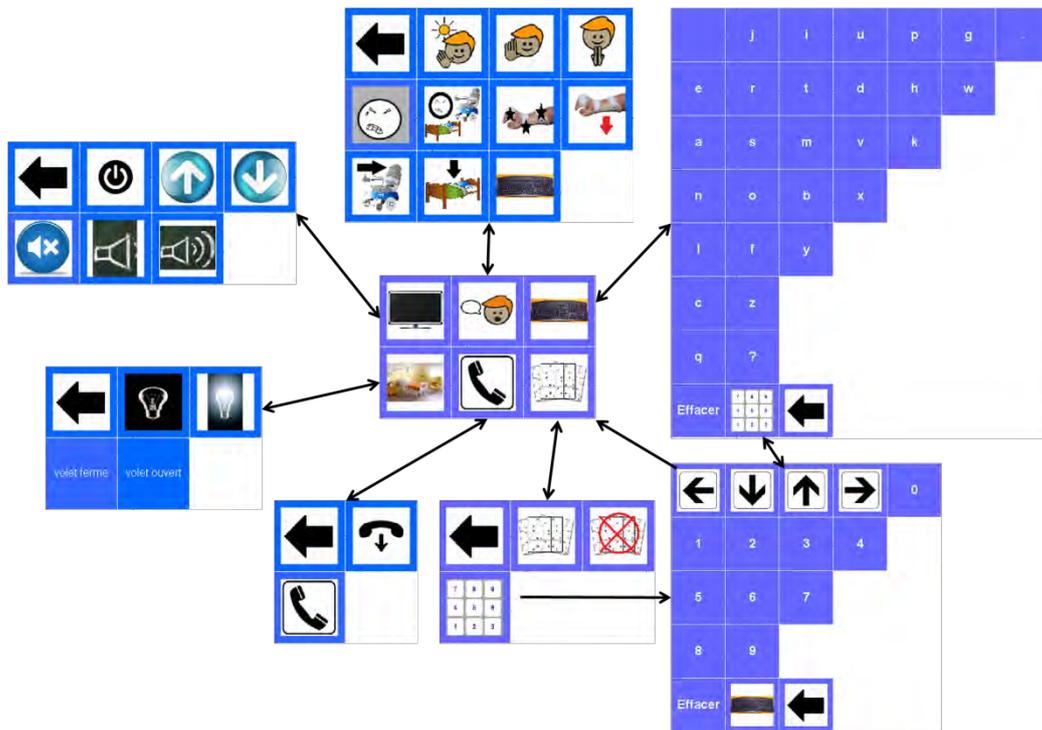


Figure 166 : Version 3 de l'interface du participant 1

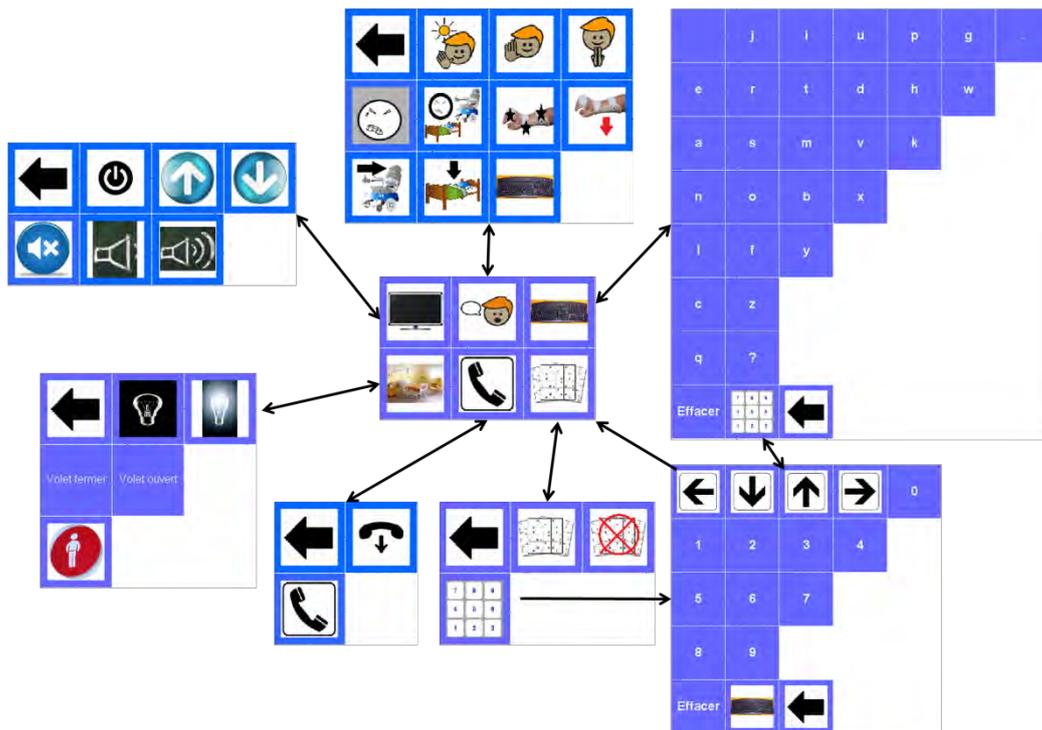


Figure 167 : Version 4 de l'interface du participant 1

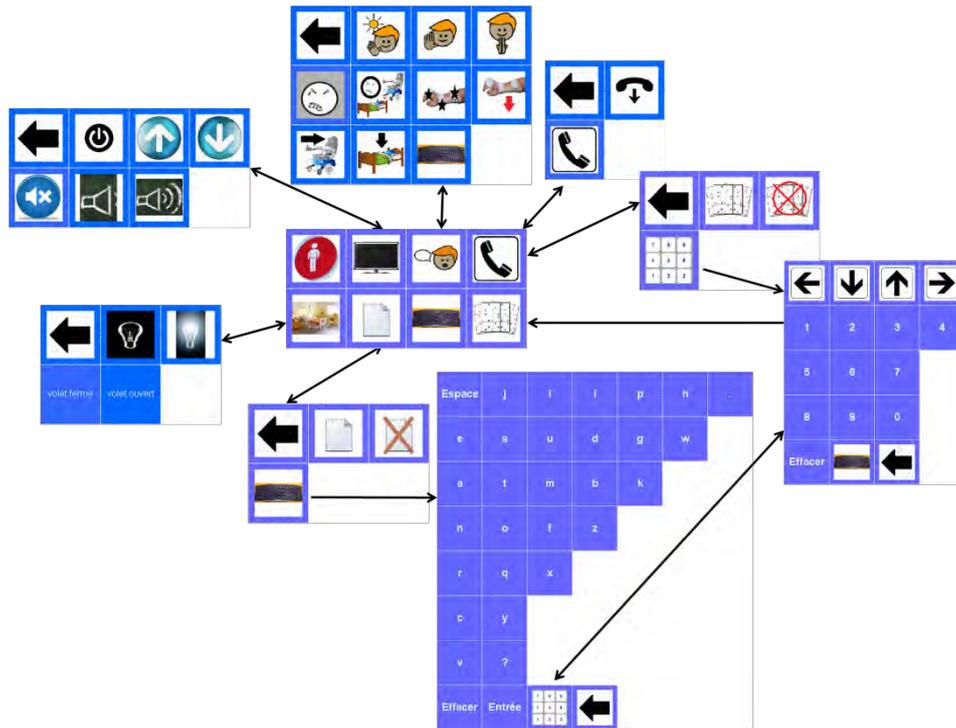


Figure 168 : Version 5 de l'interface du participant 1

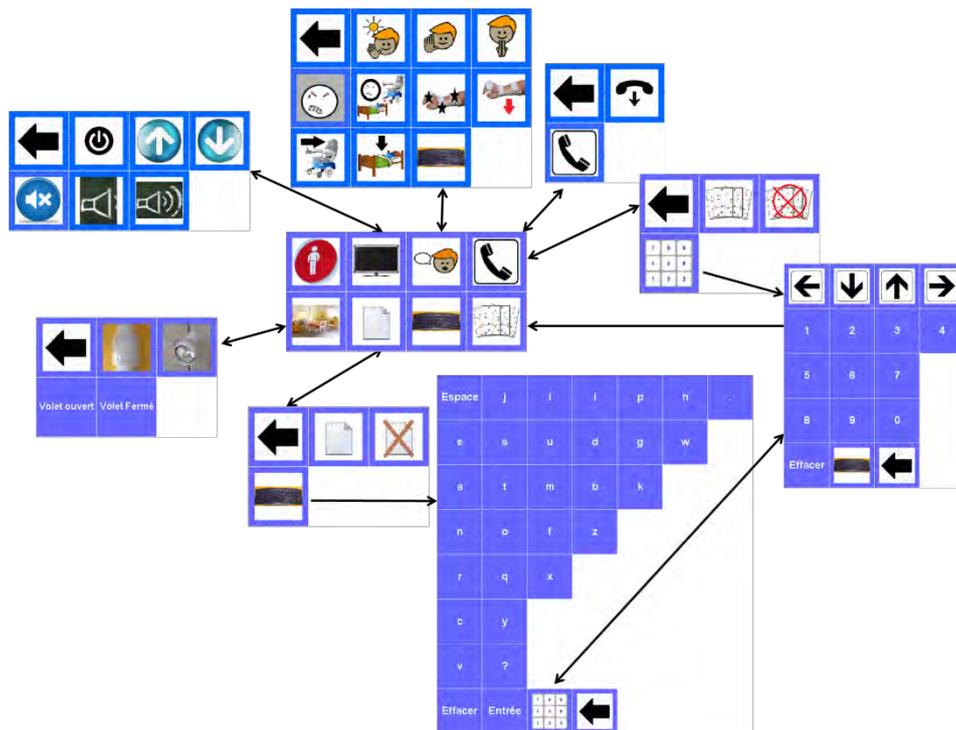


Figure 169 : Version 6 de l'interface du participant 1

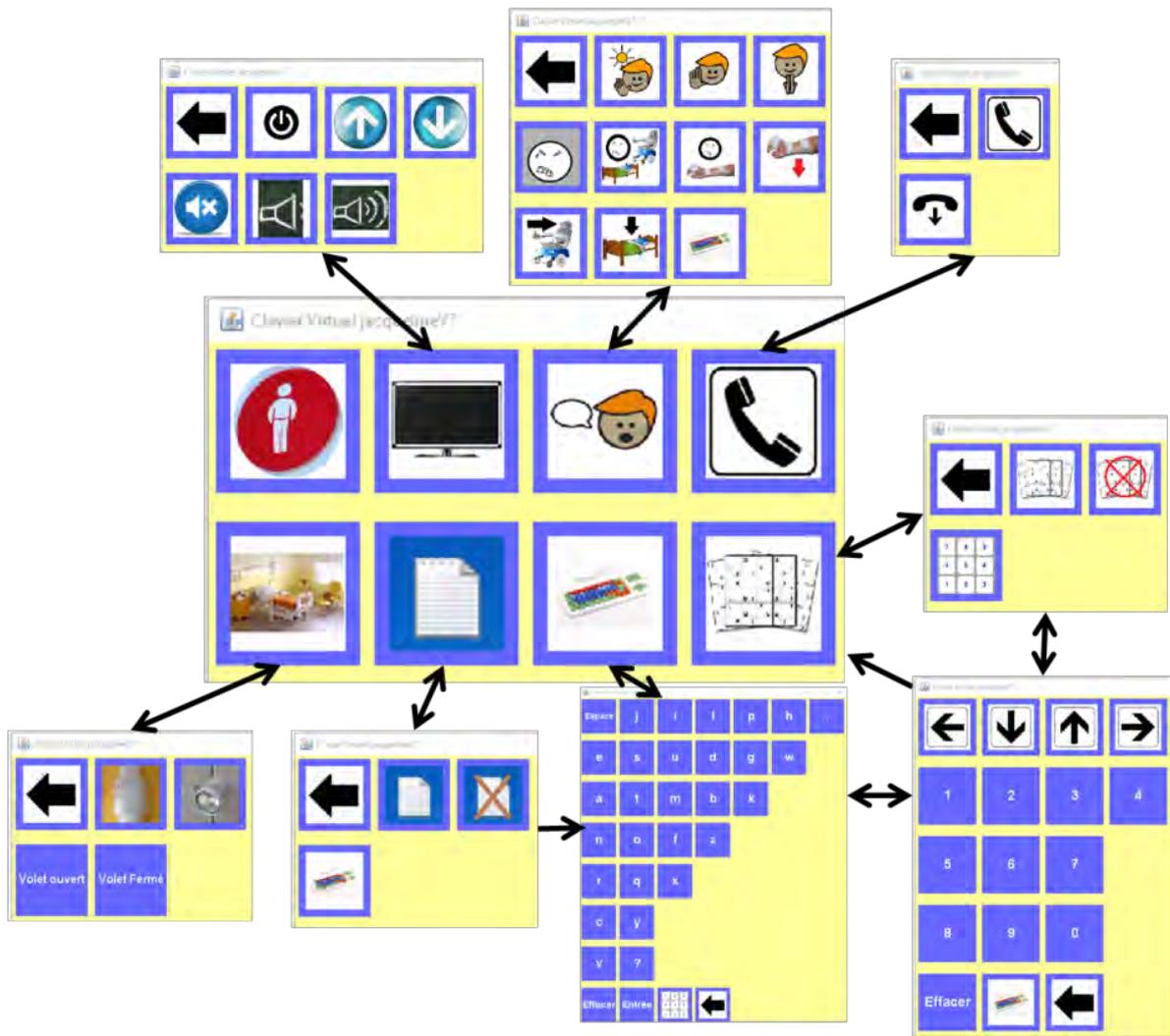


Figure 170 : Version 7 de l'interface du participant 1

# Annexe 13 Participant 2 et 3 du projet CECI

## 1. Participant 2 à la Clinique de l'Ourcq

Le Participant 2 est une personne qui a eu un AVC hémorragique et que l'on peut considérer comme une personne LIS (Locked-In Syndrom). Elle a une bonne motricité de la main droite et des deux membres inférieurs. Elle a une restriction du champ visuel côté gauche. Pour la communication elle utilise une flexion de la main droite pour signifier un « oui » et un mouvement de la droite vers la gauche pour un « non ». Il s'agit d'une personne motivée et volontaire.

Ses besoins, formulés par son entourage sont: 1) d'écouter de la musique en particulier Johnny Halliday et Sylvie Vartan ; 2) d'accéder à des documents en lecture tel que l'actualité, la presse people et la mode ; 3) de visionner des documents sur les lévriers ; 4) En cas d'urgence, avoir un bouton d'appel malade ; 5) contrôle de l'environnement, avec la commande des lumières et des volets ; 6) des messages vocaux préenregistrés.

A partir de cette expression de besoins, avec la plateforme SoKeyTo nous avons créé une interface avec pour menu principal un bouton d'appel malade, un menu pour accéder à des documentaires pour les lévriers, un menu pour la musique et un dernier pour pouvoir discuter avec des messages préenregistrés.

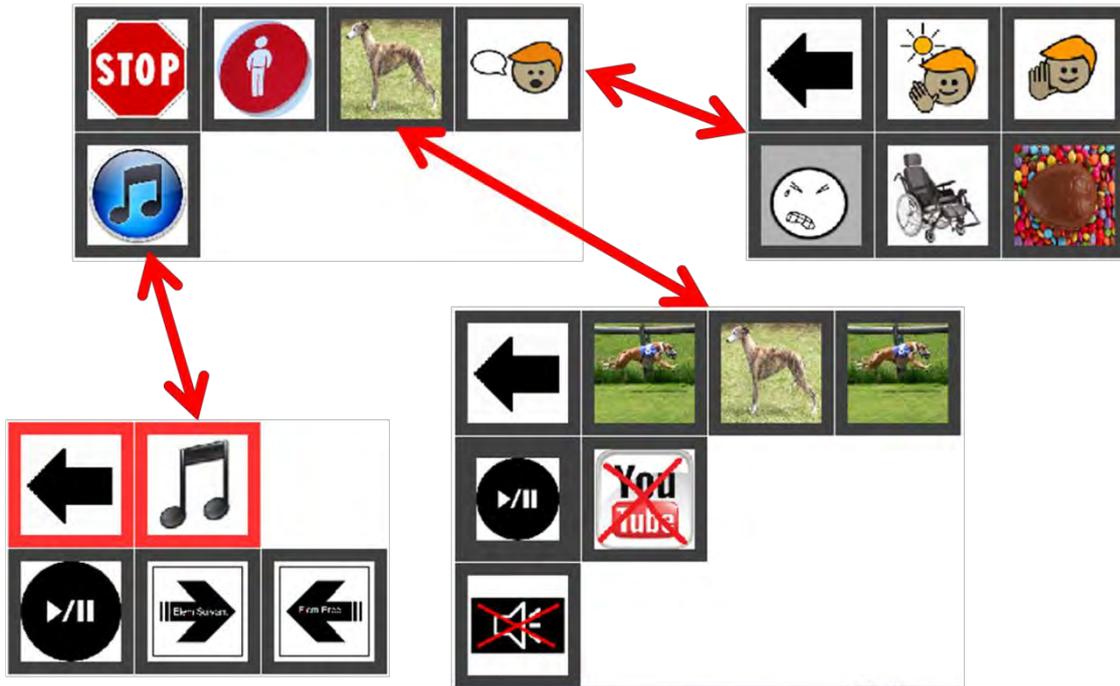


Figure 171 : interface du participant 2 de CECI

Une deuxième version a été générée avec en plus une échelle de la douleur pour pouvoir indiquer l'intensité de la douleur. Pour accéder à ce menu il est nécessaire d'aller dans communication et de choisir le bouton douleur.

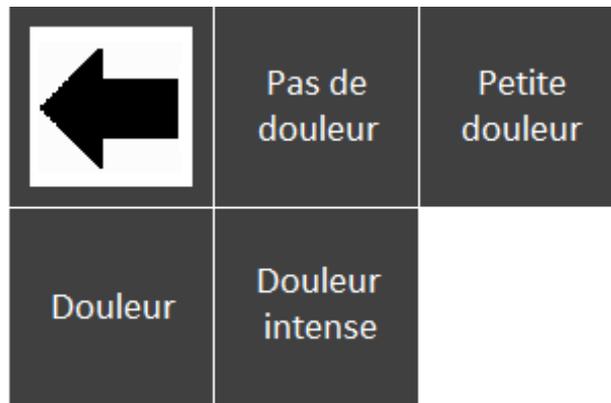


Figure 172 : Echelle de douleur pour le participant 2

## 2. Participant 3 à la Clinique de l'Ourcq

Le participant 3 est atteint d'un Traumatisme Crânien. Il possède une motricité fine aux niveaux des membres supérieurs. Pour la communication il utilise les yeux, la tête ou les

membres supérieurs. Il peut être difficile de recueillir les besoins de par un caractère qui induit une absence de réponse lorsqu'il n'a pas envie de discuter.

Toutefois les préférences de cette personne sont le football, la musique, la famille. Il souhaiterait pouvoir recevoir des appels téléphoniques et pouvoir contrôler son environnement. Après mûre réflexion la demande d'accès au téléphone a été supprimée par le participant.

A partir des besoins nous avons créé une interface avec pour menu principal, un menu d'accès aux chaînes de télévision par internet, un menu d'accès à la radio par internet, des raccourcis vidéo pour ses vidéos favorites, un menu d'accès à des messages préenregistrés, et pour finir 2 boutons d'accès direct à des prises électriques contrôlées par radio.

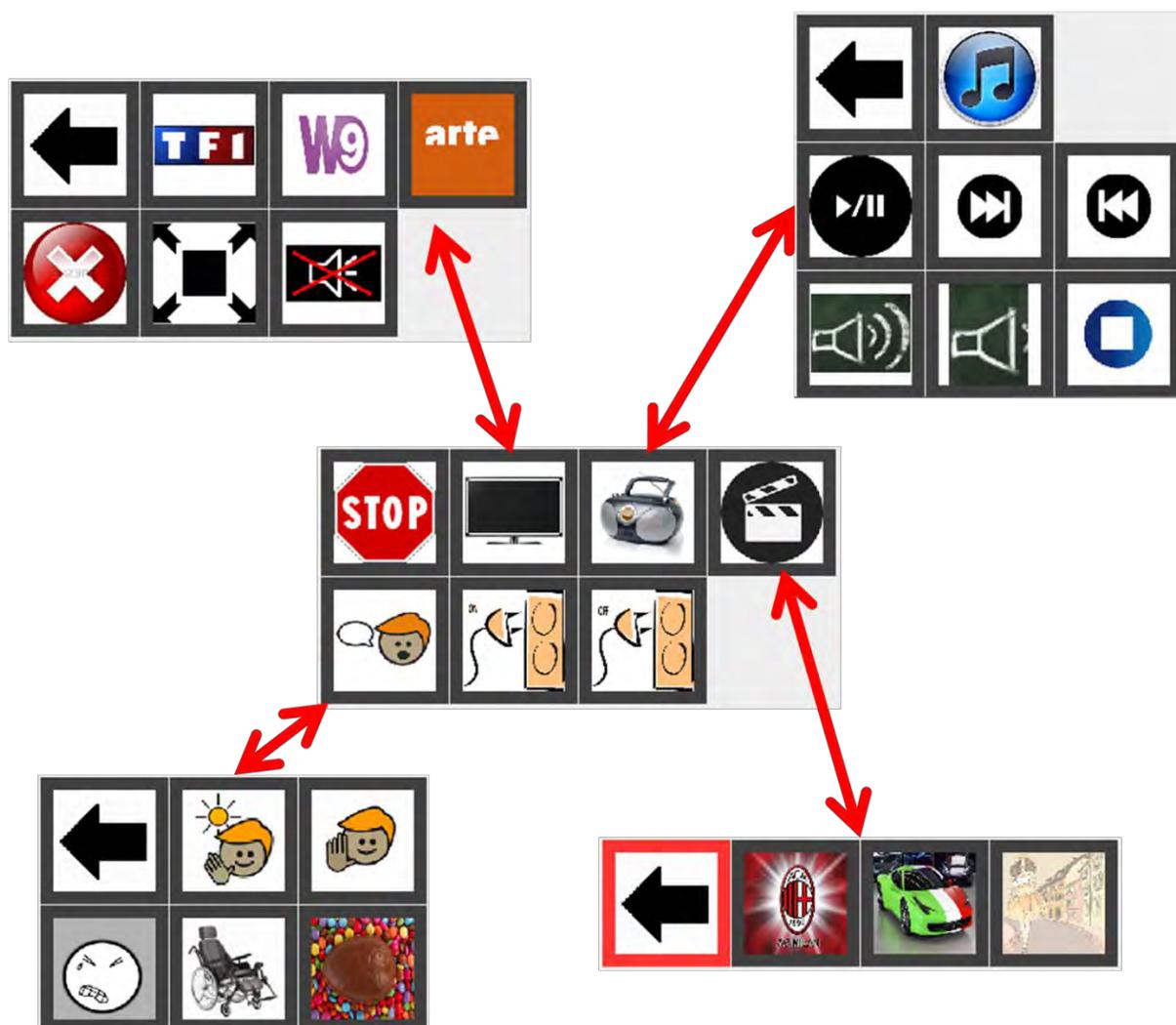


Figure 173 : interface du participant 3 de CECI



# **Apport d'une conception centrée utilisateur adaptée selon les besoins des personnes en situation de handicap**

Directeur de thèse : Palanque Philippe

Lieu de soutenance : Université Paul Sabatier, IRIT, Toulouse 3

Date de soutenance : 3 mai 2017

Les personnes en situation de handicap moteur des membres supérieurs ont besoin de système de suppléance pour leur autonomie. Cependant 1/3 de ces aides de compensation sont abandonnées car pas encore suffisamment centrées sur les besoins et les aptitudes de l'utilisateur. La problématique centrale de cette thèse concerne la mise en œuvre d'une méthode de conception centrée utilisateur, adaptée en fonction de la population d'études (personnes en situation de handicap ayant des troubles neuro-moteurs langagiers) pour la conception de trois aides de compensation. La première concerne la commande d'un bras robotique de préhension JACO pour laquelle la conception centrée utilisateur classique a été appliquée. Celle-ci est adaptée pour les personnes pouvant s'exprimer oralement mais qu'en est-il lorsque ces personnes ne peuvent participer directement ou bien ont besoin de leurs aidants pour exprimer leurs besoins ou répondre aux questionnaires? Une alternative est de recueillir les besoins par l'intermédiaire d'experts. Nous montrerons comment la méthode de conception centrée utilisateur a été adaptée pour la conception du système HandiMathKey pour la saisie de formules Mathématiques. Notre dernière adaptation est d'utiliser l'écosystème de la personne comme médiateur pour communiquer et un profil utilisateur. Cette méthode a permis de concevoir l'interface de communication intégrée et de contrôle d'environnement nommée CECI. Nous décrirons également comment la plateforme SoKeyTo permet le prototypage des aides de compensation. Pour chacune des aides de compensation, nous rapporterons les évaluations réalisées et nous discuterons la manière dont la méthode de conception a été adaptée.

Mots-clefs : Informatique, Méthode de conception centrée utilisateur, Handicap Moteur, Interaction Homme-Machine, Evaluation.

# **User centered design's input for adaptation disable people's need**

People with motor impairment of the upper limbs need an assistive technology for their autonomy. However, 1/3 of these assistive technologies are abandoned because they are not yet sufficiently focused on the needs and abilities of the user. The central problem of this thesis concerns the implementation of a user-centered design method adapted to the study population (persons with disabilities with neuro-motor language impairments) for the design of three applications. The first concerns the control of a robot arm JACO for which the classic user centered design has been applied. This is appropriate for people who can speak orally, but what if they cannot participate directly or need their caregivers to express their needs or answer questionnaires? An alternative is to gather needs through experts. We will show how the user centered design method has been adapted for the design of the HandiMathKey system for entering mathematical formulas. Our last adaptation is to use the person's ecosystem as a mediator to communicate and a user profile. This method allowed to design the integrated communication and environmental control interface named CECI. We will also describe how the SoKeyTo platform allows prototyping of assistive technologies. For each of the assistive technologies, we will report the assessments made and discuss how the design method has been adapted.

Keys words : Computer science, User-centered design method, Motor Impairment, Computer Human Interaction, Evaluation.

Discipline administrative : Informatique

Laboratoire : IRIT, Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3), Adresse : 118 Route de Narbonne, F-31062 TOULOUSE CEDEX 9