

UNIVERSITÉ PAUL SABATIER - TOULOUSE III

U. F. R. DE MATHÉMATIQUES, INFORMATIQUE ET GESTION

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité :

INFORMATIQUE

Présentée par

M. Bertrand TORNIL

le 8 décembre 2006

Pour obtenir le grade de DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ TOULOUSE 3

Adaptations et Interactions gestuelles et haptiques, ciblées
utilisateurs.

Vers plus d'utilisabilité et d'accessibilité

Soutenue devant le jury composé de :

Noëlle Carbonell	Rapporteur
Jaime Lopez Krahe	Rapporteur
Dominique Archambault	Examineur
Philippe Palanque	Examineur
Florence Sedes	Examineur
Monique Truquet	Membre invité
Nadine Baptiste-Jessel	Directrice de thèse

Remerciements

Ca y est, c'est l'heure des remerciements. Pour un lecteur, cette page est tout au début de ce document. Mais pour moi, ce sont les derniers mots que je vais y ajouter, cinq années après avoir débuté l'aventure.

Je remercie tout d'abord mes rapporteurs, les professeurs Noëlle Carbonell et Jaime Lopez Krahe, pour leur patience, et leurs précieuses remarques sur mon travail. Je remercie également les autres membres du jury, Florence Sedes, Philippe Palanque et Dominique Archambault, qui ont accepté de prendre sur leurs temps pour participer à ma soutenance.

Je présente ici toute ma gratitude à Nadine Baptiste-Jessel, ma directrice de thèse, qui m'aura aidé à finalement achever cette thèse, même à 400 km de distance. Un grand merci, également au reste de l'équipe : Dany et Benoît, pour tous ces instants. Un merci tout spécial à Monique Truquet, pour sa précieuse relecture.

Cinq ans, ce sont des rencontres au sein de l'université. Machine à café et refaisage de monde avec Romain, Laurent, Cédric, Amélie, Fred... Mais aussi ouverture sur d'autres domaines de la recherche...

Cinq ans, ce sont des rencontres hors de l'université. Merci à Matthieu, Tony, Lionel, Benj, Xavier et Vincent, pour la vie toulousaine ; merci à Arnaud, Christelle, David, Hervé, Charlot, Alex, Didier, Filou, Jay, Moustique, Pipi, Vivie, et à tout ceux du berry que j'oublie...

Cinq ans, c'est trop long pour un financement classique de thèse. Aussi, j'ai été amené à travailler pour la terminer. Et ce sont des nouvelles rencontres, qui marquent, elles aussi : Seb, Greg, Corinne, Karine et Alex de WS-Interactive. Et comme cinq ans, c'est vraiment trop long, je suis déjà dans un autre cadre professionnel aujourd'hui, et je remercie déjà pour la suite Alain, Solange et Paul de UIXperts.

Cinq ans, enfin, c'est déjà une bonne tranche de vie. Il y a cinq ans, la famille, c'était surtout mon père : Merci papa... pour tout... Et depuis, il y a eu la rencontre avec ma douce et tendre Ariane, qui, cette année, a passé le plus bel examen qui soit, en donnant naissance à Sasha, notre petite louloute.

*Il était un aveugle qui cherchait son chemin,
Et prenait repères de son oreille et de sa main.
Il demandait aux passants qu'il rencontrait,
De décrire séant objets et actions qu'eux voyaient.
Mais rien n'y fit vraiment car les indices qu'il reçut,
Remplaçaient difficilement sa vue perdue.*

*Ailleurs se promenait un astronaute,
Qui voyait parfaitement et sans faute,
Il consultait sa carte, sans peine ni effort,
Et savait d'avance trouver son chemin en dehors.
Mais ses membres sans poids au gré du vent allaient
Contre sa volonté pourtant fort développée.*

*Enfin il n'eut de meilleur choix que de demander,
Au passant aveugle qu'il rencontrât,
Si ce dernier pouvait lui prêter,
le temps d'un pas,
Une main ferme et un pied assuré.
Ensemble ils découvrirent l'art de conjuguer
Ce qu'avant ils ne faisaient que regretter.*

RAMSTEIN, La métaphore de l'astronaute et de l'aveugle, 1995

Table des matières

1	INTRODUCTION	1
I	L'HOMME ET LA MACHINE : INTERACTIONS	3
2	LE SYSTÈME HAPTIQUE DE L'HOMME	5
2.1	INTRODUCTION	6
2.1.1	NOS SENS ET LA PERCEPTION DU MONDE	6
2.1.2	PREMIÈRE APPROCHE DU SYSTÈME HAPTIQUE	8
2.2	LE SYSTÈME HAPTIQUE CÔTÉ PERCEPTION: LA SOMESTHÉSIE	10
2.2.1	LA PERCEPTION TACTILE	10
2.2.2	LA PERCEPTION KINESTHÉSIQUE	12
2.2.3	EN RÉSUMÉ	13
2.3	LE SYSTÈME HAPTIQUE CÔTÉ ACTION: LE SYSTÈME MOTEUR	13
2.3.1	UN PETIT PEU DE PSYCHOPHYSIQUE	13
2.3.2	LES LOIS MATHÉMATIQUES LIÉES AU MOUVEMENT	14
2.3.2.1	LA LOI DE FITTS	15
2.3.2.2	LA LOI D'ACCOT	17

TABLE DES MATIÈRES

2.3.2.3	LA LOI DE PUISSANCE 2/3	18
2.3.2.4	LOI DE JERK MINIMAL	19
2.3.2.5	LE MODÈLE D'IMPULSION INITIALE	21
2.3.3	LE GESTE: DÉFINITIONS	22
2.4	L'EXPLORATION HAPTIQUE : QUAND L'ACTION ET LA PERCEPTION SE CONJUGENT SUR LE CANAL HAPTIQUE	23
2.4.1	GÉNÉRALITÉS	24
2.4.2	DE L'UTILISATION D'OUTILS	26
2.4.3	LES MOUVEMENTS D'EXPLORATION	27
2.5	CONCLUSION	27
3	COMMUNICATIONS HOMME-MACHINE	29
3.1	INTRODUCTION	30
3.2	LES SYSTÈMES INTERACTIFS	30
3.2.1	L'INTERACTION ET L'INTERFACE HOMME-MACHINE	32
3.2.2	QUELQUES DÉFINITIONS DE LA COMMUNICATION MULTI- MODALE	32
3.2.3	LES INTERFACES INFORMATIQUES ACTUELLES: LES INTER- FACES WIMP	33
3.3	LES MODÈLES DE L'UTILISATEUR	34
3.3.1	LE MODÈLE DU PROCESSEUR HUMAIN ET LES CARACTÉRIS- TIQUES DU CORPS HUMAIN	34
3.3.2	AUTRES MODÈLES DE L'UTILISATEUR	36
3.4	LES PÉRIPHÉRIQUES D'ENTRÉE	37
3.4.1	PETIT POINT HISTORIQUE	37
3.4.2	TAXONOMIE DES PÉRIPHÉRIQUES D'ENTRÉE	37
3.4.3	LES PERFORMANCES EN ENTRÉE DES PÉRIPHÉRIQUES DE POINTAGE	39
3.4.4	LE GESTE DANS LES SYSTÈMES INTERACTIFS	42
3.4.4.1	ENTRÉE HAPTIQUE SIMPLE	42
3.4.4.2	RECONNAISSANCE DE MARQUES ET DE TRACÉS	42

3.4.4.3	INTERACTION GESTUELLE « PURE »	44
3.5	LES PÉRIPHÉRIQUES DE SORTIE À RETOUR HAPTIQUE	44
3.5.1	HISTORIQUE	44
3.5.2	LES PÉRIPHÉRIQUES À RETOUR HAPTIQUE	46
3.5.2.1	LES PÉRIPHÉRIQUES À RETOUR DE FORCE	47
3.5.2.2	LES PÉRIPHÉRIQUES À RETOUR TACTILE	51
3.6	LES APPLICATIONS DU RETOUR HAPTIQUE	53
3.6.1	LA PERCEPTION VIA UNE INTERFACE HAPTIQUE	53
3.6.2	L'INTÉGRATION DU MODE HAPTIQUE DANS L'INTERACTION AVEC LA MACHINE	54
3.6.2.1	LE RETOUR HAPTIQUE COMME TECHNIQUE D'IN- TERACTION	54
3.6.2.2	LE RETOUR HAPTIQUE : ASPECT LOGICIEL	55
3.6.2.3	LE RETOUR HAPTIQUE : À QUOI CELA RESSEMBLE ?	56
3.6.3	QUELQUES APPLICATIONS DU RETOUR HAPTIQUE	57
3.6.3.1	LA MÉDECINE ET ET LA RÉÉDUCATION	57
3.6.3.2	LA MODÉLISATION D'OBJETS VIRTUELS	58
3.6.3.3	LE TRAVAIL COLLABORATIF	58
3.6.3.4	L'ENTRAÎNEMENT	59
3.6.3.5	LE DOMAINE ARTISTIQUE	59
3.7	CONCLUSION	61
4	PERFORMANCES DU RETOUR DE FORCE SUR LE POINTAGE	63
4.1	INTRODUCTION: AMÉLIORER LA VITESSE DE POINTAGE	63
4.2	TRAVAUX ANTÉRIEURS INTÉGRANT LE RETOUR D'EFFORT DANS UNE TÂCHE DE POINTAGE	65
4.3	PROTOCOLE DE TEST	67
4.3.1	SUJETS	67
4.3.2	MATÉRIEL	67
4.3.3	PROCÉDURE	68
4.4	RÉSULTATS ET DISCUSSION	70
4.5	CONCLUSION	73

II	HAPTIQUE ET ACCESSIBILITÉ	75
5	VERS L'ACCESSIBILITÉ	77
5.1	INTRODUCTION	78
5.2	L'INTERACTION NON-VISUELLE	78
5.2.1	DÉFINITIONS DU HANDICAP	78
5.2.2	LES CAPACITÉS SENSORIELLES CHEZ LES NON-VOYANTS	80
5.2.3	LA REPRÉSENTATION MENTALE D'UN DOCUMENT PAR UNE PERSONNE NON-VOYANTE	80
5.2.4	MODALITÉS NON-VISUELLES DISPONIBLES EN SORTIE	81
5.2.5	UTILISATION ET JUSTIFICATION DE LA MULTIMODALITÉ	81
5.3	L'ACCESSIBILITÉ : DÉFINITIONS	83
5.3.1	L'ACCESSIBILITÉ PAR TIM BERNERS-LEE, DIRECTEUR DU W3C ET INVENTEUR DU WORLD WIDE WEB	83
5.3.2	L'ACCESSIBILITÉ PAR DENIS CHÊNE, FRANCE-TÉLÉCOM R&D	83
5.3.3	LA <i>Web Accessibility Initiative</i> (WAI) DU <i>World Wide Web Consor-</i> <i>tium</i> (W3C)	84
5.3.4	AUTRES ASPECTS DE L'ACCESSIBILITÉ	85
5.3.5	ACCESSIBILITÉ: NOTRE POSITIONNEMENT	85
5.4	L'ACCESSIBILITÉ DES PERSONNES NON-VOYANTES ET MAL-VOYANTES GRÂCE À UN DISPOSITIF À RETOUR HAPTIQUE	85
5.4.1	IDENTIFIER LE CONTENU ET L'AGENCEMENT D'UN DOCU- MENT	86
5.4.2	TOUCHER UN DOCUMENT GRAPHIQUE	86
5.4.3	PERMETTRE D'APPRÉHENDER LES FORMES ET LES TEXTURES	88
5.4.4	INTERFACE GRAPHIQUE HAPTIQUEMENT AUGMENTÉE	89
5.4.5	L'ACCESSIBILITÉ À L'INTERNET, VIA LE MODE HAPTIQUE	90
5.4.6	L'ACCESSIBILITÉ DANS LE MONDE RÉEL : HOMERE	90
5.5	RECOMMANDATIONS DE CONCEPTIONS	91
5.6	CONCLUSION	92

TABLE DES MATIÈRES

6.2.4.8	CONCLUSION	116
6.2.5	VERS LES APPLICATIONS DE LA LOCALISATION RELATIVE	117
6.3	APPLICATION À LA GÉOGRAPHIE : GEOGR'HAPTIQUE	117
6.3.1	CE DONT DISPOSENT LES NON-VOYANTS POUR AVOIR ACCÈS AUX CARTES GÉOGRAPHIQUES	117
6.3.2	L'APPLICATION GÉOGR'HAPTIC	119
6.3.3	GÉOGR'HAPTIQUE EN ACTION	119
6.3.4	AU FINAL	120
6.4	APPLICATION À LA MUSIQUE : MUSIC'HAPTIC	121
6.4.1	SPATIALISATION DE L'INFORMATION MUSICALE ET APPREN- TISSAGE	121
6.4.2	LA REPRÉSENTATION DE STEEDMAN	123
6.4.3	MUSIC'HAPTIC: LE PROTOTYPE	126
6.5	CONCLUSION	128
7	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	129
7.1	DES DISPOSITIFS, DES INTERACTIONS, DE L'ACCESSIBILITÉ	129
7.2	POUR ALLER PLUS LOIN...	130
7.2.1	D'AUTRES APPLICATIONS DE LA LOCALISATION RELATIVE	130
7.2.2	D'AUTRES DISPOSITIFS : LES ÉCRANS TACTILES À RETOUR HAPTIQUE	130
7.2.2.1	MOTIVATIONS, JUSTIFICATIONS	130
7.2.2.2	RÉALISATIONS INDUSTRIELLES RÉCENTES	132
7.2.2.3	PROBLÈMES SUBSISTANTS	133
7.2.3	LE MOT DE LA FIN	133
	LISTE DES PUBLICATIONS	137
	BIBLIOGRAPHIE	141

8	ANNEXES	153
8.1	LA FEUILLE DE STYLE XSL POUR TRANSFORMER DU CML EN SVG	153
8.2	LES TECHNOLOGIES UTILISÉES	159
8.2.1	POUR LES PÉRIPHÉRIQUES À RETOUR KINESTHÉSIQUE . . .	159
8.2.2	POUR LES PÉRIPHÉRIQUES À RETOUR TACTILE	161
8.3	LE PHANTOM	162
8.4	LA <i>Web Accessibility Initiative</i> (WAI) DU <i>World Wide Web Consortium</i> (W3C)	162
8.5	ASYNCHRONOUS JAVASCRIPT AND XML : AJAX	165

TABLE DES MATIÈRES

Table des figures

2.1	STRUCTURE DE LA PEAU (EMPRUNTÉ À (REZNIK, 1997))	10
2.2	HOMOCULI SENSITIFS HUMAINS: À GAUCHE LA VUE EST INTERNE ET CALQUÉE SUR UNE COUPE DU CERVEAU; À DROITE, LES DIMEN- SIONS DES MEMBRES ET DU CORPS ONT ÉTÉ EXAGÉRÉES SELON LES CAPACITÉS SENSORIELS DE L'ENDROIT CONSIDÉRÉ	12
2.3	LE SPECTRE DE LA PERCEPTION HAPTIQUE. (ADAPTÉ DE (WALL, 2000))	13
2.4	HOMONCULUS DU SYSTÈME MOTEUR	15
2.5	L'EXPÉRIENCE DE FITTS	16
2.6	TÂCHE POUR N=2	17
2.7	TÂCHE POUR N QUELCONQUE	17
2.8	LE CHEMIN EMPRUNTÉ POUR ALLER CHERCHER UN ITEM DANS DES MENUS HIÉRARCHIQUES	18
2.9	POSITION, VITESSE, ACCÉLÉRATION ET JERK DE LA TRAJECTOIRE MINIMISANT LE JERK POUR UN GESTE DE 10CM EN 0,5SEC	20
2.10	MODÈLE D'IMPULSION INITIALE OPTIMISÉE (MEYER <i>et al.</i> , 1988)	21
2.11	SCHÉMA DE LA PERCEPTION/ACTION HAPTIQUE (D'APRÈS (WALL, 2000))	25
2.12	LES DIFFÉRENTES GÉOMÉTRIES DES PRISES DE LA MAIN	26

TABLE DES FIGURES

3.1	DÉCOMPOSITION D'UN SYSTÈME INTERACTIF	31
3.2	MODÉLISATIONS D'UN SYSTÈME INFORMATIQUE INTERACTIF. LES FLÈCHES INDIQUENT LES RELATIONS DE DÉPENDANCE DE CHAQUE MODÈLE (TIRÉ DE (BAUDEL, 1995))	31
3.3	LE MODÈLE DU PROCESSEUR HUMAIN (D'APRÈS (JACKO ET SEARS, 2002))	34
3.4	LE SYSTÈME SENSORIEL VISUEL ET SA RELATION AVEC LE SYSTÈME COGNITIF (TIRÉ ET ADAPTÉ DE (COUTAZ, 1990))	35
3.5	LE MODÈLE DE L'ACTION DE NORMAN	37
3.6	LA PREMIÈRE SOURIS DE L'HISTOIRE	38
3.7	ESPACE DE CONCEPTION DES DISPOSITIFS D'ENTRÉE (TIRÉ DE (CARD <i>et al.</i> , 1991))	39
3.8	LES PERFORMANCES DES PÉRIPHÉRIQUES DE POINTAGE SELON LA LOI D'ACCOT (TIRÉ DE (ACCOT ET ZHAI, 1999))	40
3.9	LES PERFORMANCES DE DISPOSITIFS DE POINTAGE (ADAPTÉ DE MACKENZIE <i>et al.</i> (2001))	41
3.10	LA TÂCHE DE POINTAGE DANS L'EXPÉRIENCE DE MCKENZIE	41
3.11	LES GESTES POUR L'ÉDITION GRAPHIQUE. (TIRÉ DE (KURTENBACH ET BUXTON, 1991))	43
3.12	LES GESTES POUR TRANSCRIRE LA NOTATION MUSICALE (TIRÉ DE (BUXTON, 1986))	43
3.13	L'ARGONNE	45
3.14	MOLECULAR DOCKING VIRTUAL INTERFACE OU MDVI (UNIVER- SITY OF NORTH CAROLINA)	46
3.15	LES GANTS RUTGERS MASTER II ET CYBERGRASP	47
3.16	LE SARCOS DEXTROUS ARM MASTER	48
3.17	LES DEGRÉS DE LIBERTÉ SUR UN BRAS À RETOUR DE FORCE	49
3.18	LE PHANTOM, DANS SA VERSION OMNI.	49
3.19	LE VIRTUOSE 3D, LE DELTA HAPTIC ET LE FREEDOM 6S	50
3.20	WINGMAN FORCE FEEDBACK MOUSE	50
3.21	UNE CELLULE D'AFFICHEUR TACTILE	51
3.22	UNE PLAGE BRAILLE	52

3.23 (GAUCHE) : L'ADVANCED DISPLAYS FOR THE BLIND DE AB-TIM ; (DROITE) : LE DOTVIEW DE KGS	52
3.24 LE COUPLAGE DES DISPOSITIFS DE POINTAGE AVEC LE MODE TACTILE	53
3.25 INTERACTION HAPTIQUE ENTRE L'HOMME ET LA MACHINE (TIRÉ DE CASIEZ (2004))	55
3.26 LE LOGICIEL INTOUCH	58
3.27 LE SYSTÈME DAB (BAXTER <i>et al.</i> , 2001)	60
3.28 LA PLATE-FORME PHASE (LAMBERT <i>et al.</i> , 2005)	60
4.1 DIMINUTION DE LA DISTANCE ENTRE L'ICÔNE ET SES CIBLES	64
4.2 LES « CURSEURS-RÉGIONS » DE WORDEN <i>et al.</i> (1997) ; À GAUCHE : LA SÉLECTION AVEC UN CURSEUR-POINT A LIEU LORSQUE L'INTERSECTION DES DEUX SEGMENTS EST SUR LA CIBLE ; AU MILIEU : LA SÉLECTION AVEC UN CURSEUR-RÉGION A LIEU DÈS QU'UNE PARTIE DU CURSEUR INTERSECTE LA CIBLE ; À DROITE : LORSQUE PLUSIEURS CIBLES SE TROUVENT SOUS LE CURSEUR-RÉGION, C'EST LE COMPORTEMENT D'UN CURSEUR-POINT QUI EST UTILISÉ	65
4.3 VOICI LE BUREAU ENCOMBRÉ DE BENOIT...	67
4.4 DANS LA CONDITION MTDHF, L'INTENSITÉ DU RETOUR DE FORCE DÉPEND DE LA VITESSE DU POINTEUR. DANS LE CAS IDÉAL D'UNE TRAJECTOIRE MINIMISANT LE JERK (VOIR 2.3.2.4 PAGE 19), ON AURAIT LE RÉSULTAT CI-DESSUS.	69
4.5 ORIGINE ET CIBLES DU PROTOCOLE	70
4.6 TEMPS DU MOUVEMENT POUR LES 4 CONDITIONS DE RETOUR HAPTIQUE	72
5.1 EXEMPLES DE GRAPHIQUES HAPTIQUEMENT AUGMENTÉS	87
5.2 L'IMPULSE ENGINE 3000	88
5.3 LE SYSTÈME HOMERE	90
6.1 LA LOCALISATION RELATIVE	95
6.2 LA MÉTAPHORE DU LEVIER DE VITESSE	96
6.3 ILLUSTRATION DE L'EFFET UTILISÉ	97
6.4 CENTRE D'INERTIE EXTÉRIEUR À LA FORME	99

TABLE DES FIGURES

6.5	FORME CENTRÉE SUR L'ORIGINE	100
6.6	ARCHITECTURE DU SYSTÈME	101
6.7	LE MODÈLE MVC ENSEIGNANT-ÉLÈVE	102
6.8	EXEMPLES DES CONFIGURATIONS À EXPLORER ; LES HEXAGONES COLORÉS REPRÉSENTENT LES ZONES HAPTQUES À TROUVER ET ET À LOCALISER	105
6.9	LES TEMPS SELON LES DIFFÉRENTES CONDITIONS AUDIOS	106
6.10	LES MOYENNES DES TEMPS, SELON LES DIFFÉRENTES CONDITIONS AUDIOS, ET EN FONCTION DU NOMBRE DE POINTS À TROUVER	107
6.11	NOTATIONS SELON LES DIFFÉRENTES CONDITIONS AUDIOS	108
6.12	NOTATIONS, SELON LES DIFFÉRENTES CONDITIONS AUDIOS, ET EN FONCTION DU NOMBRE DE POINTS À TROUVER	109
6.13	CORRÉLATION ENTRE LE TEMPS MIS LORS DE LA TÂCHE, ET LA NOTATION. LES GRANDS SYMBOLES REPRÉSENTENT LES POSITIONS MOYENNES POUR CHACUNE DES CONDITIONS DE RETOUR AUDIO . . .	109
6.14	ILLUSTRATION DE LA PROCÉDURE, POUR 4 POINTS	112
6.15	LES MOUVEMENTS POSSIBLES POUR 4 ZONES À EXPLORER	113
6.16	ÉVOLUTION DU TEMPS DE LA TÂCHE EN FONCTION DU NOMBRE DE ZONES	115
6.17	TEMPS D'EXPLORATION ET DE MOUVEMENT, EN FONCTION DU NOMBRE DE ZONES	116
6.18	TEMPS D'EXPLORATION EN FONCTION DU NOMBRE DE ZONES	116
6.19	REPRÉSENTATION GRAPHIQUE D'UNE CARTE TACTILE. DANS CET EXEMPLE, IL S'AGIT DES DIFFÉRENTS TYPES DE FORÊTS DU CANADA	118
6.20	GÉOGR'HAPTQUE, SITUATION INITIALE	120
6.21	GÉOGR'HAPTQUE, SITUATION FINALE	120
6.22	REPRÉSENTATIONS DE LONGUET-HIGGINS (À GAUCHE) ET DE STEED- MAN (À DROITE)	122
6.23	LA REPRÉSENTATION DE STEEDMAN ET SES TROIS AXES HARMO- NIQUES	123
6.24	LA REPRÉSENTATION DE STEEDMAN, TELLE QU'ELLE EST IMPLÉ- MENTÉE	124
6.25	LES ACCORDS IMPLÉMENTÉS	125

6.26	DES FORMES DIFFÉRENTES DANS LA NOTATION MUSICALE, POUR LE MÊME ACCORD DE 7ÈME.	125
6.27	LA MÊME FORME DANS LA NOTATION MUSICALE, POUR DES ACCORDS DIFFÉRENTS: QUINTE MAJEURE À GAUCHE, ET QUINTE MINEUR À DROITE	126
6.28	SURVOL DU SYSTÈME	127
6.29	UNE NOTE ET SON RETOUR DE FORCE	127
6.30	LE RETOUR DE FORCE SUR L’AFFICHAGE HEXAGONAL, ET LA NOTATION MUSICALE, DYNAMIQUEMENT GÉNÉRÉE	128
7.1	LE PROTOTYPE BODY’HAPTIC	131
7.2	IVA-D300 (DVD/CD/MP3/WMA RECEIVER/MOBILE MULTIMEDIA STATION)	132
7.3	IMMERSION TACTILE TOUCHSCREEN	132
7.4	LE TACTAPAD : PEUT-ÊTRE LE DISPOSITIF PARFAIT ?	133
8.1	WAI, ATAG, WCAG ET UUAG	165
8.2	MODÈLE CLASSIQUE DE L’INTERACTION WEB (SYNCHRONE)	166
8.3	MODÈLE D’INTERACTION AJAX (ASYNCHRONE)	166

TABLE DES FIGURES

Liste des tableaux

2.1	CLASSIFICATION DES SENSATIONS DE SHERRINGTON (CALAS, 1998)	7
2.3	PRINCIPAUX RÉCEPTEURS TACTILES (BURDEA, 1996)	11
3.1	INVENTAIRE DES GRANDEURS MESURABLES SUR UN PÉRIPHÉRIQUE D'ENTRÉE CONTINU EN FONCTION DE LA NATURE DU DEGRÉ DE LIBERTÉ	38
3.2	CORRESPONDANCE TERMINOLOGIQUE ENTRE LA PERCEPTION ET LES PÉRIPHÉRIQUES	46
3.3	LES POSSIBILITÉS DES MOUVEMENTS D'EXPLORATION AVEC UN PÉRIPHÉRIQUE DE POINTAGE	54
4.1	PARAMÈTRES DE L'EXPÉRIENCE.	69
4.2	MOYENNES DES TEMPS DES MOUVEMENTS DANS LES 4 CONDITIONS; LES POURCENTAGES DONNENT L'ÉCART PAR RAPPORT À LA CONDITION MT	71
4.3	MODÈLES DE LA LOI DE FITTS. MT EST LE TEMPS DU MOUVEMENT(MS), ID EST L'INDICE DE DIFFICULTÉ(BITS)	72
5.2	POPULATION SOUFFRANT DE TROUBLES DANS LES ÉTATS MEMBRES DE L'UNION EUROPÉENNE (ADAPTÉ DE [TIDE 96]).	79
5.4	POPULATIONS NON ET MAL-VOYANTES EN FRANCE ET DANS LE MONDE	80

LISTE DES TABLEAUX

5.5	SENS PERCEPTIFS HUMAIN ET MÉDIAS INFORMATIQUES (ADAPTÉ DE (TRUILLET, 1999))	82
5.6	BONNES RÉPONSES DANS DIFFÉRENTES SITUATIONS MODALES	82
6.1	LES CONDITIONS EXPÉRIMENTALES	104
6.2	MOYENNES DES TEMPS (EN MS), SELON LES CONDITIONS AUDIOS (AXE HORIZONTAL) ET LE NOMBRE DE POINTS (AXE VERTICAL)	106
6.3	MOYENNES DES NOTATIONS, SUR 10, SELON LES DIFFÉRENTES CONDITIONS AUDIOS, ET EN FONCTION DU NOMBRE DE POINTS À TROUVER	108
6.5	PARAMÈTRES DE L'EXPÉRIENCE	112
6.6	TEMPS THÉORIQUES DES MOUVEMENTS MOYENS, EN FONCTION DU NOMBRE DE ZONES	114
6.8	TEMPS DE RÉACTION MINIMUM ET MAXIMUM THÉORIQUES	114
6.10	RÉSULTATS DE L'EXPÉRIENCE	114
6.11	RÉSULTATS : LES TEMPS MOYENS DE LA TÂCHE T , LES TEMPS THÉORIQUES MT , ET RT , D'OÙ PAR SOUSTRACTION LES TEMPS D'EXPLORATION MINIMUM ET MAXIMUM ET^- ET ET^+	115
8.4	LA GAMME DES PHANTOMS	163

CHAPITRE 1

Introduction

L'informatique désigne l'automatisation du traitement de l'information par un système¹.

Une partie de ces traitements est de plus en plus réalisée au sein même de nos salons, dans nos maisons ; il s'agit de l'informatique personnelle. Dans ce contexte, les traitements effectués par le système doivent généralement fournir une réponse à la personne qui utilise ce système ; personne que nous appellerons « utilisateur » dans toute la suite de ce document.

Maintenant, nous avons un système et un utilisateur. Nous pouvons à présent nous demander comment le second utilise le premier... et comment le premier répond au second. C'est cette démarche de questionnement qui sous-tend le domaine de l'interaction Homme-Machine (ou IHM, ou HCI en anglais).

Dans le sens machine-humain, l'interaction est produite par les dispositifs de sortie, tels que l'écran, ou plus indirectement, par l'imprimante. Dans le sens opposé, c'est à dire humain-machine, on se sert généralement d'un clavier et d'une souris, mais comme nous le verrons, il existe bien d'autres dispositifs permettant d'agir sur la machine. Et dans cette thèse, nous étudierons plus précisément le matériel d'interaction, basé sur le sens du toucher, et des mouvements.

Nous pourrions alors nous poser la question suivante : quels problèmes apparaissent lorsque l'utilisateur ne peut pas voir l'écran, soit à cause d'un handicap perceptif, soit

¹<http://fr.wikipedia.org/wiki/Informatique>

parce que la vue est monopolisée par une autre tâche ? Et comment un dispositif basé sur les sens du toucher et du mouvement peut-il être utilisé dans un tel contexte, que peut-il amener, et quelles en sont les limites ?

La première partie de ce document est focalisée sur l'interaction Homme-Machine mettant en œuvre le retour de force ou les sensation tactiles, et elle pose l'état de l'art. Pour commencer nous étudions dans le chapitre 2 (le premier chapitre étant cette introduction) le côté humain de ces perceptions, en nous intéressant notamment aux neurosciences. Nous parlerons au chapitre 3 des communications homme-machine proprement dites, depuis les principales définitions, jusqu'aux applications de l'interaction haptique, tout en ayant détaillé les moyens techniques d'interaction. Le quatrième chapitre de cette thèse proposera alors une utilisation du retour de force visant à améliorer les performances d'une tâche de pointage.

La deuxième partie de cette thèse traite des possibilités du retour de force en terme d'accessibilité, avec dans le chapitre 5, les principales définitions et réalisations de ce domaine. Le chapitre 6 introduit alors mes propositions : un contexte d'utilisation des dispositifs de pointage à retour de force : la localisation relative. Nous appliquerons alors cette approche à l'apprentissage de cartes géographiques, ou d'accords de musique.

Nous concluons alors, et dresserons les perspectives possibles à ces travaux.

Première partie

L'homme et la machine : interactions

CHAPITRE 2

Le système haptique de l'homme

Sommaire

2.1	INTRODUCTION	6
2.1.1	NOS SENS ET LA PERCEPTION DU MONDE	6
2.1.2	PREMIÈRE APPROCHE DU SYSTÈME HAPTIQUE	8
2.2	LE SYSTÈME HAPTIQUE CÔTÉ PERCEPTION: LA SOMESTHÉSIE	10
2.2.1	LA PERCEPTION TACTILE	10
2.2.2	LA PERCEPTION KINESTHÉSIQUE	12
2.2.3	EN RÉSUMÉ	13
2.3	LE SYSTÈME HAPTIQUE CÔTÉ ACTION: LE SYSTÈME MOTEUR	13
2.3.1	UN PETIT PEU DE PSYCHOPHYSIQUE	13
2.3.2	LES LOIS MATHÉMATIQUES LIÉES AU MOUVEMENT	14
2.3.3	LE GESTE: DÉFINITIONS	22
2.4	L'EXPLORATION HAPTIQUE : QUAND L'ACTION ET LA PERCEPTION SE CONJUGENT SUR LE CANAL HAPTIQUE	23
2.4.1	GÉNÉRALITÉS	24
2.4.2	DE L'UTILISATION D'OUTILS	26
2.4.3	LES MOUVEMENTS D'EXPLORATION	27
2.5	CONCLUSION	27

2.1 Introduction

2.1.1 Nos sens et la perception du monde

Avant d'aborder plus spécifiquement le sujet qui nous intéresse, nous allons passer en revue quelques classifications des systèmes de la perception humaine.

Il est d'usage de parler des cinq sens : la vue, l'ouïe, l'odorat, le goût et le toucher. Cette classification constitue une première approche de la perception du monde qui nous entoure ; comme nous allons le voir, la perception est bien plus complexe.

Pour commencer, j'ai choisi de citer le résultat d'une étude en psychologie (HATWELL, 1994) qui a abordé le problème de la perception des informations. Selon cette étude, ces dernières sont perçues par un sujet voyant à :

- 83 % par la vision ;
- 11% par l'audition ;
- 3,5% par l'odorat ;
- 1,5% par le toucher ;
- et 1% par le goût.

Pour autant, il faut rester prudent avec une telle approche. En effet, la perception « *peut* » être segmentée en cinq sens. Pourtant, le tableau 2.1 présente une classification des sensations. Il s'agit de la classification de Sherrington (1857-1952).

Étudions plus précisément tout ce vocabulaire...

La sensibilité intéroceptive : Elle comprend toutes les sensations qui viennent de l'estomac, de l'intestin. S'y ajoutent les sensations viscérales, ainsi que cette sensibilité générale du corps qu'on appelle la coenesthésie (sensations d'aise ou de malaise).

La sensibilité proprioceptive : Celle qui nous renseigne sur les positions, attitudes, mouvements de notre corps et de nos membres. Cette sensibilité comprend :

1. le sens kinésique ou kinesthésique : il nous renseigne sur nos mouvements proprement dits (déplacements de nos membres et de notre corps dans l'espace) ;
2. le sens statique ou vestibulaire : sens qui a son organe dans l'oreille interne et qui nous donne le sens de la verticalité, des mouvements de rotation et de translation ; il préside à l'équilibration générale du corps.

La sensibilité extéroceptive : Elle nous informe sur les objets extérieurs. Les psychologues distinguaient les sens impressionnables par contact direct et les sens qui sont impressionnables à distance.

les extérocepteurs : nous renseignent sur le monde extérieur	télécepteurs : perception à distance	récepteurs visuels
		récepteurs auditifs
		récepteurs olfactifs
	récepteurs de contact	récepteurs gustatifs
		récepteurs cutanés du toucher
les intérocepteurs : nous renseignent sur notre propre organisme	viscérocepteurs : disséminés dans les viscères	nous renseignent sur un paramètre physiologique interne (la douleur par exemple)
	propriocepteurs : regroupés (oreille interne) ou disséminés (fuseaux neuro-musculaires)	nous renseignent sur un paramètre lié au travail de relation : l'état de tension des muscles, sur la position relative des différentes parties du corps, et sur la position du corps dans l'espace

TAB. 2.1 – Classification des sensations de Sherrington (CALAS, 1998)

1. Les sens impressionnables par contact direct :

- (a) Les sensibilités cutanées : le toucher qui suppose un contact direct avec l'objet à percevoir
 - le tact,
 - les sensations thermiques,
 - la douleur.

(b) - Les sens chimiques : le goût et l'odorat liés aux fonctions de nutrition.

2. Les sens impressionnables à distance : Ces sens sont plus indépendants du milieu extérieur que ceux qui exigent le contact direct. L'ouïe et la vue apportent à l'être vivant des messages lointains qui lui permettent une adaptation anticipée de son comportement.

Pour BERTHOZ (1997), « la perception n'est pas seulement une interprétation des messages sensoriels. Elle est également contrainte par l'action, simulation interne de l'action, jugement et prise de décision et anticipation des conséquences de l'action : il y a filtrage des informations données par les sens en fonction de ses projets propres. Un très grand nombre de mouvements exigent une anticipation ou une extrapolation fondée sur une estimation utilisant les expériences antérieures (rôle de la mémoire). »

Tout ceci nous donne une vision peu évidente de la perception. Et il n'est pas question ici d'aborder le côté philosophique de la question.

«

Percevoir, c'est se rendre quelque chose de présent à l'aide du corps »
(Merleau-Ponty)

Pour finir cette partie d'introduction, précisons que toutes les connaissances qui se rapportent au corps, évoluent en fonction des avancées de la compréhension des mécanismes mis en œuvre.

Nous allons tenter, dans ce qui suit, de définir la terminologie utilisée lorsqu'il est question d'interaction haptique.

2.1.2 Première approche du système haptique

« Our knowledge of touch consists of only fragmentary concepts and findings, some dealing with basic functional properties (e.g., cutaneous sensitivity, limits of kinaesthetic space perception) and others with capabilities of the systems as a whole (e.g., the identification of three-dimensional objects) »

LOOMIS ET LEDERMAN (1986), cité par COLWELL (2001)

Tout d'abord, un petit peu d'étymologie. Le mot « haptique » vient du grec *haptestai* signifiant « toucher », et est originalement synonyme au sens tactile.

D'après APPELLE (1991), ce serait le psychologue REVESZ (1950) qui aurait le premier utilisé le terme « haptique » pour désigner le système « tactilo-kinesthésique » de la main, c'est à dire la synthèse

1. des perceptions des systèmes sensoriels de la main
2. et des mouvements d'exploration de la main.

Plus tard, pour LOOMIS ET LEDERMAN (1986), la perception haptique était celle qui impliquait les sens cutanés et kinesthésiques pour transmettre l'information sur un objet ou sur un évènement. Ils n'ont cependant pas restreint cette définition à la main. La sensation de la texture de la nourriture dans la bouche apparaît donc comme une partie de la perception haptique, au sens de Loomis et Lederman.

Une autre définition est celle de GIBSON (1966) (toujours cité par APPELLE (1991)). Pour lui, la pression, la force, la stimulation de la peau, l'activité des muscles, des articulations et des tendons étaient mises en œuvre lors de la manipulation d'objets. Pour Gibson, le système haptique inclue plusieurs sous-systèmes :

- Le toucher cutané : une stimulation de la peau sans mouvements des muscles ou des articulations.
- Le toucher haptique : une stimulation de la peau avec des mouvements des articulations.
- Le toucher dynamique : une stimulation de la peau avec des mouvements des articulations et des muscles.
- Le toucher orienté : une stimulation de la peau avec une stimulation vestibulaire ¹.

APPELLE (1991) a très justement noté que la prolifération des termes et des définitions liés à la perception haptique, indique que la compréhension dans ce domaine n'en est toujours qu'à ces débuts. Il est également fréquent de trouver des définitions contradictoires entre plusieurs recueils.

Dans ce chapitre et dans la suite de cette thèse, nous retiendrons la définition actuellement admise, à savoir :

le terme « haptique » se réfère à la combinaison :

1. du système perceptif lié au toucher et à la kinesthésie (que nous allons voir dans la section suivante),
2. et des mouvements d'exploration (qui vont être traités au 2.3 page 13)

¹relatif notamment au sens de l'équilibre

2.2 Le système haptique côté perception : la somesthésie

La somesthésie est liée à l'ensemble des sensibilités cutanées et internes. Elle est composé par :

- **le sens tactile** : il est relayé par les récepteurs sensoriels situés sous l'épiderme, et dont on relève la plus grande densité dans la main. Ces récepteurs relaient « le contact initial avec l'environnement », et permettent d'en appréhender la géométrie détaillée de la surface, la rugosité, la température (toujours de surface).
- **le sens kinesthésique** : du grec *kinêsin* signifiant « se mouvoir » et *aisthêsis* signifiant « sensation », il se réfère à « la kinesthésie, la sensation interne du mouvement des parties du corps assurée par le sens musculaire (sensibilité profonde des muscles) et par les excitations de l'oreille interne » [Le Petit Robert]. Ce sens permet de connaître l'effort que font nos muscles par exemple lorsque nous soulevons (poids) ou lorsque nous poussons (résistance) un objet.

2.2.1 La perception tactile

Les récepteurs physiologiques de la perception tactile se trouvent dans la peau (figure 2.1). La bande passante du sens tactile (c'est à dire la fréquence à laquelle les stimuli tactiles sont perçus) est de 0 à 400 Hz (SHIMOGA, 1992). Elle peut cependant monter à des très hautes fréquences situées entre 5000 à 10000 Hz dans le cas de la reconnaissance de textures à très petits détails.

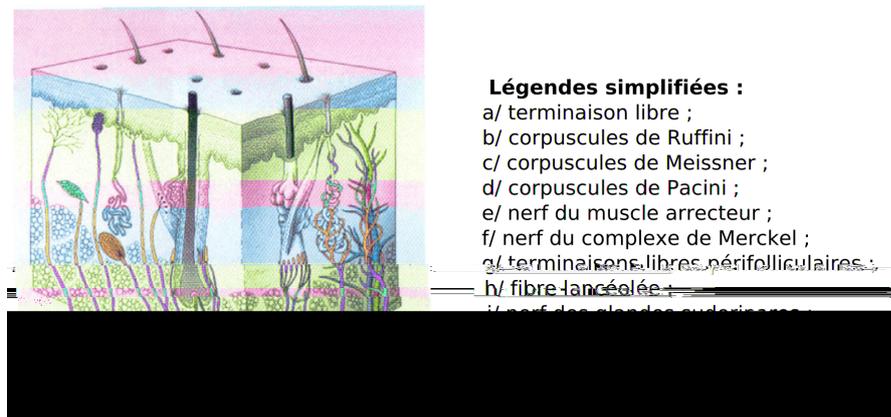


FIG. 2.1 – Structure de la peau (emprunté à (REZNIK, 1997))

Nous pouvons distinguer 3 natures de récepteurs tactiles :

- les thermorécepteurs : liés aux sensations de chaud et de froid ;

- les nocirécepteurs : liés à la sensation de douleur ;
- les mécanorécepteurs : liés à la discrimination tactile.

On distingue 4 types de mécanorécepteurs (CHOLEWIAK ET COLLINS, 1991), (KALAWSKY, 1993), (SEOW, 1995) ; Il sont présentés dans le tableau 2.3.

Type de récepteur	Taux d'adaptation	Fréquences des stimuli	Zone réceptrice	Fonction	Sensibilité à la température
Disques de Merkel	Lent	0-10 Hz	Petite, Bien définie	Pression localisée	oui
Corpuscules de Ruffini	Lent	0-10 Hz	Grande, Indéfinie	Pression, Étirement de la peau	oui, si \geq 100Hz
Corpuscules de Meissner	Rapide	20-50 Hz	Petite, Bien définie	Tact, vitesse	non
Corpuscules de Pacini	Rapide	100-300 Hz	Grande, Indéfinie	Vibration, accélération	oui

TAB. 2.3 – Principaux récepteurs tactiles (BURDEA, 1996)

Tous ces récepteurs sont donc situés dans la peau, mais dans des concentrations différentes selon les endroits du corps.

On désigne par *homoncule* ou *homonculus* la représentation de notre propre corps à l'intérieur de notre cerveau. Mais comme les différentes parties de notre corps n'ont pas toutes la même importance pour notre cerveau, certaines prennent beaucoup de place et d'autres très peu. Par exemple, nos mains qui sont très utiles et capables de manipuler de très petits objets prennent beaucoup plus de place que nos jambes.

La perception sensitive donnée au niveau de la peau peut être ainsi représentée grâce à un homonculus (figure 2.2).

Historiquement, c'est grâce au compas de Weber, formé de deux pointes sèches, qu'en 1835 il a été possible de déterminer l'acuité tactile individuelle comme étant la plus petite distance entre deux contacts simultanés perçus comme distincts. Les premiers homonculi ont été tracés à cette époque. Des études plus récentes ont montré des seuils de précision sur le sens tactile :

- Discrimination entre deux points de contact avec la peau : de 1 à 2,5mm.
- Seuil de détection d'une force : 63mg
- Seuil de perception d'un déplacement statique : 11,2 μ m

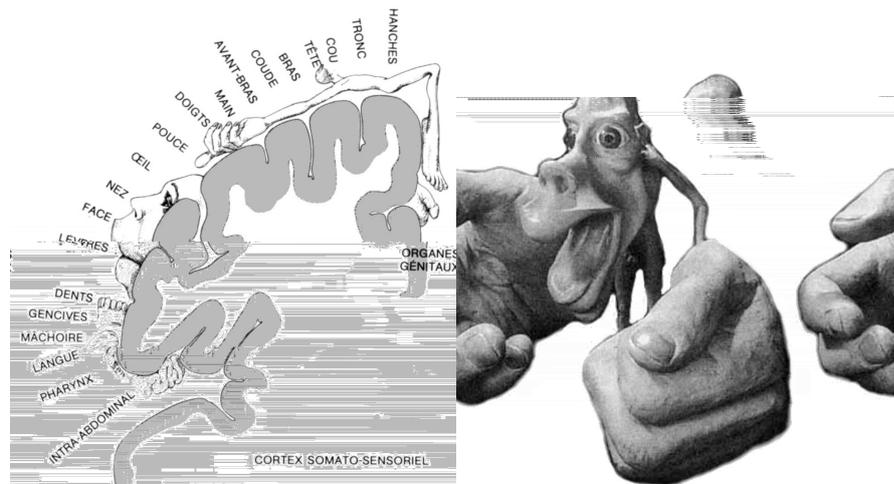


FIG. 2.2 – Homoculi sensitifs humains : à gauche la vue est interne et calquée sur une coupe du cerveau ; à droite, les dimensions des membres et du corps ont été exagérées selon les capacités sensorielles de l'endroit considéré

2.2.2 La perception kinesthésique

Le sens kinesthésique intègre les informations sur les positions, les mouvements et les forces appliqués sur ou par le corps. Il est relayé par des récepteurs situés dans les tendons musculaires au niveau des articulations, ainsi que dans l'oreille interne. La bande passante de ces récepteurs est plus basse que ceux de la perception tactile soit de 20 à 30 Hz. Enfin, il s'appuie sur une utilisation de l'effet de mémoire des gestes.

La perception kinesthésique est composée par :

- **Le sens proprioceptif** : relatif aux stimuli se produisant dans l'organisme. Il fournit l'information liée à la position du corps, et est basé sur les récepteurs situés dans les tendons entre les muscles et les os, dans l'oreille interne, et sur les impulsions du système nerveux par effet de mémoire. C'est précisément ce sens qui nous donne la capacité de connaître la configuration de notre corps dans l'espace sans avoir à le regarder.
- **le sens extéroceptif** : relatif aux stimuli issus de phénomènes extérieurs au corps humain. Par exemple, appréhender le poids, la forme ou la raideur d'un objet que l'on est en train de manipuler.

Remarques :

1. on trouve parfois dans la littérature la perception « tactilo-proprio-kinesthésique » pour désigner la perception haptique.

2. Nous considérerons par la suite, comme souvent dans la littérature, que le sens kinesthésique englobe le sens proprioceptif. En effet, d'après le Larousse, la proprioception « se dit de la sensibilité du système nerveux aux informations sur les postures et les mouvements, venant des muscles et des articulations ». Les trois domaines liés à la proprioception sont les sensibilités à la position dans l'espace, au mouvement du corps et aux forces exercées sur les muscles. Les deux premiers domaines correspondent au sens kinesthésique (FUCHS ET MOREAU, 2003).

2.2.3 En résumé

La perception des signaux spatiaux dépend de la fréquence du signal. La distinction entre "forme" et "texture" est liée aux caractéristiques des sens kinesthésiques et tactiles. La figure 2.3 illustre la notion de perception haptique, en terme de fréquence des stimuli.

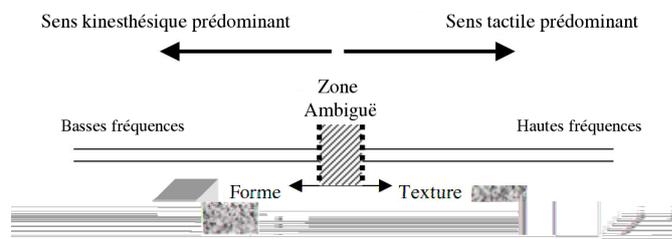


FIG. 2.3 – Le spectre de la perception haptique. (adapté de (WALL, 2000))

2.3 Le système haptique côté action : le système moteur

Nous allons maintenant présenter l'autre côté du système haptique tel que nous le considérons. La partie 2.2 concernait le sous-système perceptif. Ici, c'est donc le sous-système moteur qui va nous intéresser.

Et pour tenter de garder une cohérence lors de la présentation d'un système très complexe, nous allons découper le discours en plusieurs parties, depuis les définitions psychophysiques de bas-niveau, en remontant les abstractions, vers les définitions de l'aboutissement de l'exécution du système moteur : le mouvement, puis le geste.

2.3.1 Un petit peu de psychophysique

Petit rappel de la définition du système haptique : il s'agit de la combinaison

1. du système perceptif lié au toucher et à la kinesthésie (vu en 2.2),
2. et des mouvements d'exploration.

Cette combinaison confère au système haptique une propriété unique : un même système nous permet de connaître notre environnement (sous-système perceptif de la kinesthésie et du toucher), et d'agir sur lui (les mouvements d'exploration).

L'objet de cette partie est de donner quelques notions sur le sens du mouvement, lui-même lié au système moteur.

Le système moteur permet de contrôler la position du corps ainsi que les forces à mettre en jeu lors de l'interaction avec le monde extérieur.

Pour le définir un peu plus précisément, les bandes passantes relatives au système moteur vont suivre. La bande passante d'un système est la vitesse à laquelle nous répondons aux stimuli par une action. Elle s'exprime en Hertz (Hz), car nous parlons ici de fréquence ; pour obtenir le temps de réaction, il faut prendre l'inverse.

Pour le système moteur, la bande passante oscille selon les situations entre 1 et 10 Hz (CASIEZ, 2004) :

- réponse à des signaux déstabilisant : entre 1 et 2 Hz (0,5 à 1s)
- réponse à des signaux périodiques : entre 2 et 5 Hz (0,2 à 0,5s)
- réponse à des trajectoires apprises : 5 Hz (0,2s)
- réponse de type réflexe : 10 Hz (0,1s)

Pour donner un ordre d'idée sur l'intensité des forces mises en œuvre, elles sont de l'ordre de 44N au niveau des articulations des doigts et de 102N au niveau de l'épaule pour un homme.

De manière similaire à ce que l'on a pour la perception tactile, il a été possible de tracer un homonculus sur le système moteur humain (figure 2.4mot}).

Toujours de manière parallèle à ce que l'on a observé pour la perception tactile, il faudra tenir compte des capacités physiologiques du système moteur lors de la conception de méthodes d'interaction haptique, et lors du choix et de la position d'utilisation des périphériques.

Notre discours va à présent s'élever d'un cran, en terme d'abstraction du système moteur : après la psychophysique, nous abordons le concept de mouvement, au travers de ses modélisations mathématiques.

2.3.2 Les lois mathématiques liées au mouvement

La conséquence extérieure de la mise en action du système moteur, c'est le mouvement. Il n'est pas question ici de traiter en profondeur du mouvement, car il faudrait une thèse entière.

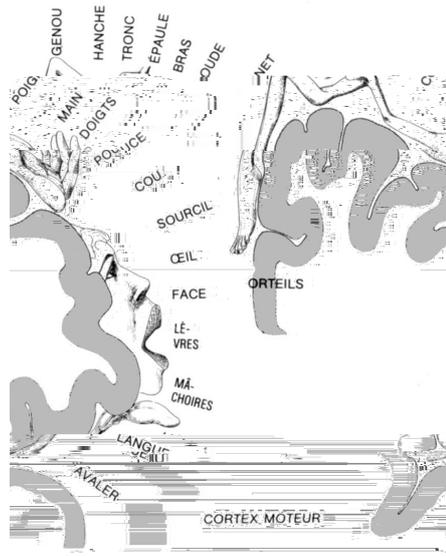


FIG. 2.4 – Homonculus du système moteur

Nous survolons ici quelques lois mathématiques qui tendent à modéliser le mouvement. La loi de Fitts donne ainsi le temps nécessaire pour un geste de pointage ; la loi d'Accot précise le temps lorsque la tâche est plus spécifiquement un suivi de trajectoires ; la loi de puissance $2/3$ et la loi de jerk minimal tendent à modéliser les trajectoires des gestes. Enfin, le modèle d'impulsion initiale modélise plus spécifiquement le geste de pointage.

2.3.2.1 La loi de Fitts

En 1954, Fitts a empiriquement développé un prédicteur quantitatif donnant le temps nécessaire pour effectuer une tâche de type “ acquisition et pointage d'une cible ” (FITTS, 1954). Il a présenté le rapport suivant, connu sous le nom de loi de Fitts.

Le temps du mouvement MT requis pour sélectionner une cible de taille W situé à une distance A est :

$$MT = a + b \log_2(2A/W) \quad (2.1)$$

où a et b sont des constantes déterminées empiriquement. Le logarithme $\log_2(2A/W)$ représente l'indice de difficulté (ID) de la tâche et est exprimé en bits (sa base est 2). Plus élevée est la valeur de ID et plus difficile est la tâche. Si MT est exprimé en seconde, la constante a sera exprimée en seconde et b en seconde/bit. L'inverse de b (soit $1/b$) est l'indice de performance (IP) et est exprimé en bit/seconde.

La figure 2.5 illustre l'expérience qui a permis à Fitts d'établir sa loi. La tâche que devaient accomplir les sujets était la suivante. Initialement, la main est placée à l'origine du mouvement ; alors, le sujet doit aller le plus vite possible toucher une cible distante de A cm et large de W cm.

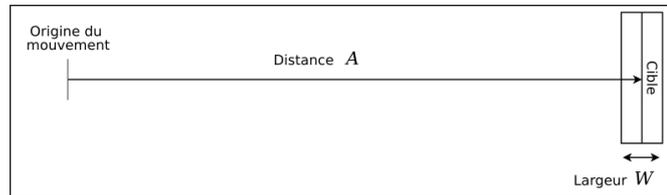


FIG. 2.5 – L'expérience de Fitts

La formulation originale de la loi de Fitts (équation 2.1) s'avère cependant inexacte pour les faibles valeurs de l' ID (< 3 bits), montrant une courbure de MT au dessus de la droite de régression linéaire. Une autre formulation, proposée en 1960 par Welford (WELFORD, 1960), permet de corriger cet effet :

$$MT = a + b \log_2(A/W + 0.5) \quad (2.2)$$

Enfin, en 1992, MacKenzie (MACKENZIE, 1992) a également proposé sa propre formulation :

$$MT = a + b \log_2(A/W + 1) \quad (2.3)$$

Ces différentes équations ne diffèrent que par la formulation de l' ID . L'équation (2.3), connue comme formulation de Shannon, est préférée pour les raisons suivantes (MACKENZIE, 1992) :

- elle s'ajuste un peu mieux aux observations,
- elle imite exactement le théorème de Shannon, sous-jacent à la loi de Fitts, et
- elle donne toujours un nombre positif pour l'indice de difficulté de la tâche.

Enfin, on peut citer quelques extensions à la loi de Fitts. En effet, cette loi ne concerne que les gestes allant d'un point à un autre en une seule fois. Mathématiquement, on peut déduire la formulation pour un geste effectué en deux parties (figure 2.6),

auxquels cas, la formulation de l'indice de difficulté ID sera :

$$ID_2 = 2 \log_2 \left(\frac{A}{2W} + 1 \right)$$

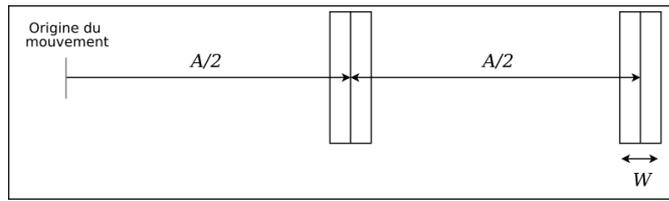


FIG. 2.6 – Tâche pour n=2

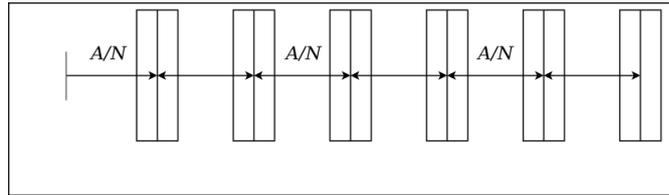


FIG. 2.7 – Tâche pour n quelconque

et pour n parties (figure 2.7) :

où on aura :

$$ID_N = N \log_2 \left(\frac{A}{NW} + 1 \right)$$

2.3.2.2 La loi d'Accot

La loi d'Accot ou *steering law* (ACCOT ET ZHAI, 1997) est beaucoup plus récente, et est utilisée pour les mouvements de suivis de chemin. L'application typique de cette loi est l'estimation du temps de sélection d'un item dans un menu déroulant à plusieurs niveaux (figure 2.8).

La loi s'exprime ainsi :

$$T_c = a + b \int_C \frac{ds}{W(s)} \quad (2.4)$$

où T est le temps moyen pour suivre le chemin, C est le chemin paramétré par s , $W(s)$ est la largeur du chemin à l'abscisse curviligne s , et a et b sont des constantes empiriques. Dans le cas général, le chemin est complexe, avec une largeur $W(s)$ variable.

Des chemins plus simples permettent des simplifications mathématiques. Par exemple, si le chemin est un tunnel droit avec une largeur W constante, l'équation (2.4) devient :

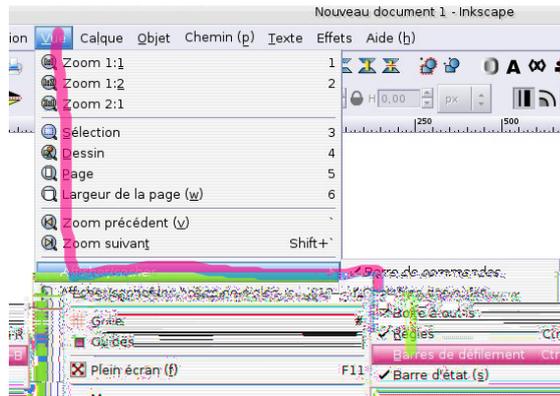


FIG. 2.8 – Le chemin emprunté pour aller chercher un item dans des menus hiérarchiques

$$T = a + b \frac{A}{W}$$

où A est la longueur du chemin. On peut observer une certaine similarité avec la loi de Fitts.

Il est également possible de dériver les deux côtés de l'équation (2.4) selon la variable s , et obtenir la formulation locale, ou instantanée de la loi :

$$\frac{ds}{dT} = \frac{W(s)}{b}$$

qui dit que la vitesse instantanée est proportionnelle à la largeur du tunnel. Ceci paraît logique si l'on considère l'analogie avec la conduite d'une voiture sur une route : plus la route est large, plus on peut ² conduire vite, même s'il y a des virages.

2.3.2.3 La loi de puissance 2/3

Tout tracé curviligne peut être décomposé en parties dont chacune possède un rayon de courbure propre et est dessinée à une certaine vitesse tangentielle. L'analyse des mouvements d'écriture et de dessin a montré que la vitesse augmentait dans les parties les moins courbées de la trace et diminuait dans les parties les plus courbées. Malgré la variété de possibilités de moduler la vitesse d'exécution d'une lettre ou d'un trait, tous respectent une règle simple liant la vitesse tangentielle et le rayon de courbure de

²même si l'on ne doit pas, ceci restant une expérience de pensée

la trace suivant une loi de puissance de $2/3$ (LACQUANTINI ET VIVIANI, 1983). Cette covariation a donné lieu à une modélisation mathématique, telle que :

$$V(t) = kR(t)^\beta$$

où V est la vitesse tangentielle, R le rayon de courbure et k une constante appelée gain de vitesse.

En d'autres mots, « quand on tourne beaucoup, on va moins vite ». On retrouve ici la même affirmation que la loi d'Accot (voir page 17). Il s'agit des mêmes phénomènes.

Il a été montré que la valeur de l'exposant β était constante et fixée à une valeur de $1/3$. La force de cette relation a été de montrer que la valeur de cet exposant β pouvait être retrouvée dans des conditions variées d'exécution (par exemple, différentes amplitudes du mouvement ; voir (VIVIANI ET FLASH, 1995)). Ces auteurs ont alors postulé que cet invariant reflétait la planification et la programmation du mouvement en référence à une représentation

2.3.2.4 Loi de jerk minimal

Connaissant le point de départ d'un geste, le point d'arrivée, et la durée du geste, quelle est l'équation du geste ? Comment s'assurer que ce geste minimisera les efforts déployés (au moins au niveau de la trajectoire, de l'évolution de la vitesse) ?

La loi de jerk minimal a été proposée par FLASH ET HOGAN (1985). Elle tend à exprimer mathématiquement la trajectoire de la main (ou de tout autre extrémité du corps) la plus « douce » possible.

Pour ce faire, les auteurs ont montré que la « douceur » d'une trajectoire pouvait d'exprimer en fonction du jerk, c'est à dire la dérivée de l'accélération, ou encore la dérivée 3^{ème} de la position.

Si on note $x(t)$ la position d'un système, alors le jerk de ce système sera :

$$\ddot{\ddot{x}}(t) = \frac{d^3x(t)}{dt^3}$$

La trajectoire optimale (au sens de la « douceur ») doit alors minimiser le carré du jerk tout au long de la trajectoire. Mathématiquement, il s'agit de minimiser la grandeur :

$$H(x(t)) = \frac{1}{2} \int_{t=0}^T \ddot{\ddot{x}}^2 dt$$

où T est la durée de la trajectoire.

Après un calcul de variation, il s'ensuit que la trajectoire minimisant le jerk et allant d'un point $x = x_i$ à un point $x = x_f$ en $t = d$ sec aura pour équation :

$$x(t) = x_i + (x_f - x_i) \left(10 \left(\frac{t}{d} \right)^3 - 15 \left(\frac{t}{d} \right)^4 + 6 \left(\frac{t}{d} \right)^5 \right) \quad (2.5)$$

Par exemple, la trajectoire pour une geste de 10cm durant 0,5sec sera :

$$x(t) = 800t^3 - 2400t^4 + 1920t^5, \quad 0 \leq t \leq 0,5 \text{sec}$$

La figure 2.9 trace cette fonction, ainsi que ses trois premières dérivées : vitesse, accélération et jerk. La forme en cloche de la courbe de la vitesse $\dot{x}(t)$ est typique du principe de minimisation du jerk.

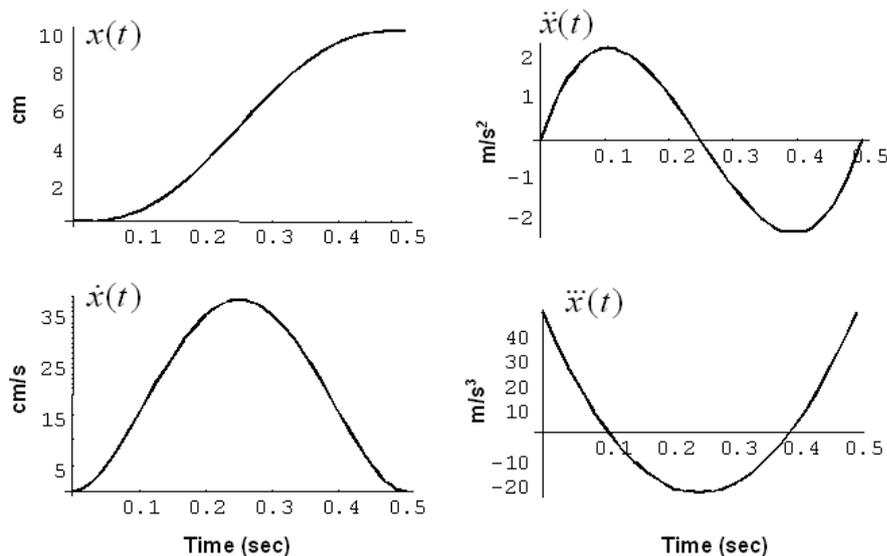


FIG. 2.9 – Position, vitesse, accélération et jerk de la trajectoire minimisant le jerk pour un geste de 10cm en 0,5sec

FLASH ET HOGAN (1985) ont prouvé qu'en deux dimensions ou plus, l'équation (2.5) décrit la trajectoire assurant le jerk minimum pour chaque dimension. Par exemple, pour un mouvement en deux dimensions, la fonction à minimiser sera :

$$H(\underline{x}(t)) = \frac{1}{2} \int_{t=0}^T (\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2) dt$$

et la trajectoire en deux dimensions aura pour équation :

$$\underline{x}(t) = \begin{bmatrix} x(t) = x_i + (x_f - x_i) \left(10 \left(\frac{t}{d}\right)^3 - 15 \left(\frac{t}{d}\right)^4 + 6 \left(\frac{t}{d}\right)^5 \right) \\ y(t) = y_i + (y_f - y_i) \left(10 \left(\frac{t}{d}\right)^3 - 15 \left(\frac{t}{d}\right)^4 + 6 \left(\frac{t}{d}\right)^5 \right) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

L'équation (2.6) implique qu'une trajectoire minimisant le jerk en deux dimensions sera toujours un segment de droite.

2.3.2.5 Le modèle d'impulsion initiale

Le modèle le plus satisfaisant quant à la modélisation des gestes, et notamment les gestes de pointages, a été proposé par MEYER *et al.* (1988). C'est le modèle d'impulsion initiale. D'une manière algorithmique, le processus d'une tâche d'acquisition s'exprime ainsi :

1. Un mouvement initial est effectué pour atteindre la cible ;
2. Tant que le mouvement n'atteint pas la cible, faire
 - (a) refaire un mouvement pour atteindre la cible

Le processus continue jusqu'à ce que la cible soit atteinte. L'objectif de la tâche étant d'atteindre la cible le plus vite possible, dans le cas idéal, le sujet touche la cible en un seul mouvement. Dans la réalité, cependant, la précision d'un tel geste sera très faible.

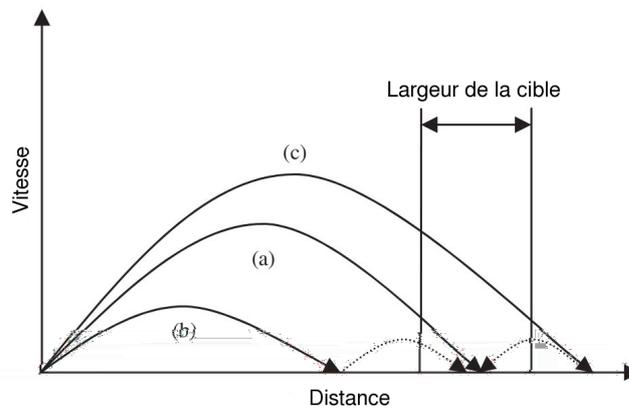


FIG. 2.10 – modèle d'impulsion initiale optimisée (MEYER *et al.*, 1988)

Il a été montré (MEYER *et al.*, 1988; ROSENBAUM, 1991) que la déviation standard S entre la fin du premier mouvement et la cible augmentait avec la distance D et diminuait avec la durée du mouvement T , selon la loi :

$$S = k \left(\frac{D}{T} \right)$$

où k est une constante.

Ceci signifie qu'un mouvement sur une longue distance, exécuté pendant un court laps de temps, est possible, mais aura une déviation standard élevée, soit une faible probabilité d'atteindre la cible. De manière similaire, une série de petits mouvements lents atteindrait très certainement la cible, mais le temps total serait extrêmement long.

La solution mathématique au problème consiste à jouer sur D et T de manière à minimiser le temps total (ROSENBAUM, 1991). Dans les faits, le mouvement « optimal » consiste en un premier mouvement de grande amplitude et rapide, qui nous amène aussi proche que raisonnablement possible de la cible ; suivi par un ou plusieurs petits gestes correctifs, et plus lents, qui se trouvent être dans les possibilités du système de contrôle moteur.

Nous en terminons ici pour les aspects mathématiques du mouvement, et nous allons reprendre notre ascension des niveaux d'abstraction du système moteur : nous allons parler des gestes.

2.3.3 Le geste : définitions

Geste : Mouvement du corps (principalement des mains, des bras et de la tête) volontaires ou non, révélant un état psychologique, ou visant à exécuter quelque chose.

LE PETIT ROBERT - 2001

L'ACROE (Association pour la Création et la Recherche sur les Outils d'Expression) s'est intéressée au geste en le segmentant de la manière suivante :

1. Caractérisation quantitative de l'activité gestuelle :

Geste digital (Poignet fixe) : c'est le geste du sculpteur, du pianiste, du violoniste, du dentiste. Il se caractérise par de petits déplacements (3 cm), des précisions élevées (2 mm, 10 mN), des forces élevées (80 N) ;

Geste de transport local (Coude fixe) : c'est le geste de positionnement de proximité par déplacement de l'avant bras sur environ 30 cm avec des précisions en force et en position assez faibles (0,5 cm, 10 N) ;

Geste de déplacement large (Épaule fixe, ou hanche fixe ou libre) : c'est un geste d'approche de faible précision (5 cm, 100 N) par déplacement du bras ou du corps à partir de 60 cm.

2. Caractérisation qualitative et fonctionnelle de l'activité gestuelle (CADOZ, 1994) :

une fonction épistémique : le geste sert à connaître (un matériau, une surface, ...) et est relative au retour tactile ou haptique (activation du sens tactilo-kinesthésique) ;

une fonction ergotique : le geste sert à déplacer, modifier, construire des objets matériels ; Le geste est lié à la manipulation directe du monde physique ;

une fonction sémiotique : le geste sert à faire connaître : désigner, communiquer ; le geste véhicule une information (qui peut résulter de l'expérience culturelle).

La fonction sémiotique du geste a vu ses caractéristiques précisées par McNeill (MC-NEILL, 1992). Ainsi, un geste sémiotique peut être :

Iconique : le geste est parallèle à un discours concret ;

Métaphorique : le geste est parallèle à un discours abstrait ;

Déictique : c'est un geste de pointage ou de sélection ; ces gestes ont reçu beaucoup d'attention car ils correspondent aux principales tâches sur les systèmes interactifs actuels.

bâton : le geste est un battement rythmique.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à la fonction épistémique de l'activité gestuelle, ainsi qu'à la fonction déictique. En effet, la première est relative au retour haptique, et la deuxième aux gestes de pointage.
--

2.4 L'exploration haptique : quand l'action et la perception se conjuguent sur le canal haptique

Dans cette partie, nous allons nous intéresser à la fusion des capacités de perception et d'action du système haptique. Dans la littérature, il est alors souvent question d'exploration haptique, ou encore de processus exploratoires.

2.4.1 Généralités

Le processus d'exploration haptique met en œuvre plusieurs sous-processus distincts.

Petit exemple : pour déterminer la dureté d'un objet, nous pouvons appliquer une force normale à sa surface, ou bien malaxer l'objet dans la paume de la main si sa taille le permet. Une telle procédure provoquerait un flux d'informations supplémentaires, concernant la température, les capacités de conduction calorifique de l'objet, ainsi que la texture en surface de l'objet, précisément là où la pression a été effectuée. De plus, si l'information obtenue est jugée insuffisante (pour la reconnaissance de l'objet, ou bien pour l'accomplissement d'une tâche), d'autres processus d'exploration peuvent être lancés.

Les sous systèmes concernés par une tâche d'exploration haptique sont :

- le système cognitif,
- les fonctions de prise de décisions,
- le système moteur,
- et les sensations psychophysiques issues de l'interaction avec les objets.

LOOMIS ET LEDERMAN (1986) et LEDERMAN *et al.* (1987) ont proposé que le système haptique pourrait être composée de deux sous systèmes. Le système sensoriel, et le système moteur. Selon leur interprétation, le système moteur sert à augmenter les performances du système sensoriel, en optimisant l'efficacité de l'exploration haptique des objets. Dans cette vision des phénomènes, il est possible de concevoir le processus haptique comme la mise en œuvre de fonctions haptiques de haut niveau (fonctions cognitives), et de fonctions haptiques de bas niveau (fonctions psychophysiques). Les fonctions haptiques de haut niveau seraient amenées à diriger les fonctions haptiques de bas niveau ; mais pas uniquement.

exemple : si l'on décide d'aller extraire une information de surface d'un objet, cela aura pour conséquences l'exécution d'une procédure exploratoire (optimale pour cette information), qui se manifestera par une série de mouvements de la main. L'interaction entre la surface de l'objet et la peau lancera la stimulation des sens haptiques, provoquant la perception de l'information recherchée, et par conséquent, un modèle mental concernant la nature la surface de l'objet, se forme.

Une telle opération « de haut en bas » se produit quand un observateur est dirigé vers la recherche d'une information particulière d'un objet. Cependant, l'exploration haptique peut être dirigée « de bas en haut ». Dans l'exemple précédent, et suivant les informations perceptuelles induites par l'exploration, l'opérateur peut être conduit à explorer plus loin pour trouver d'autres informations, qu'il ne cherchait pas nécessairement au départ.

Ainsi, la stimulation des mécanorécepteurs provoque une réponse neurale qui dicte l'exploration suivante. C'est la « boucle comportementale » (TAYLOR *et al.*, 1973).

La figure 2.11 illustre les boucles de rétroaction se produisant lors de l'exploration haptique. Dans la littérature, l'ensemble de ses boucles, ramené à la dualité de fonctionnement du système (« de haut en bas » / « de bas en haut ») a mené aux notions du contact « actif » et « passif ». Ainsi, pendant le contact actif, un opérateur exécute l'exploration haptique sans contrainte, déplaçant la main en contact avec un objet. Réciproquement, pendant le contact passif, la main de l'explorateur demeure stationnaire, alors que l'objet est déplacé en contact avec la peau.

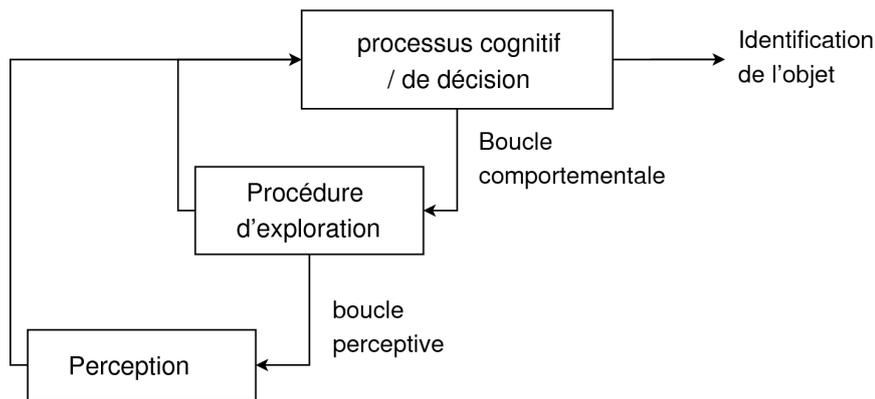


FIG. 2.11 – Schéma de la perception/action haptique (d'après (WALL, 2000))

Initialement, ces concepts étaient mutuellement exclusifs (Gibson, 1962). Pourtant, LEDERMAN ET TAYLOR (1972) ont proposé que les concepts d'actif et de passif ne constituaient pas nécessairement une dichotomie, mais que le processus de contact pourrait être considéré comme ayant un certain degré de « passivité ». Ce degré dépendrait du niveau de contrôle qu'a l'opérateur sur le processus de contact.

Pour terminer, FAINETEAU *et al.* (2003) ont mené des expériences quant à la perception des distances avec le sens haptique. Les résultats de ces expériences peuvent se résumer de la manière suivante :

1. Les courtes distances sont généralement sur-estimées, et les longues distances sont sous-estimées.
2. La mémoire des distances est plus volatile que la mémoire des positions.
3. La reproduction d'un mouvement actif, en terme de distance et de position, est plus exacte que pour un mouvement passif (c'est à dire aidé par un dispositif).

2.4.2 De l'utilisation d'outils

L'outil est très souvent le lien entre l'humain et la tâche.

On peut citer quelques exemples du triplet « Opérateur-Outil-Tâche » pour les métiers :

- Le couturier - l'aiguille - la couture,
- le chirurgien - le scalpel - l'incision,
- ou encore, le chirurgien - le forceps laparoscopique, la laparoscopie...

et d'autres exemples pour des tâches à base technologiques. On oublie ici la spécificité de l'opérateur : on obtient des couples « Outil-Tâche » :

- Tournevis - Vis,
- Ciseaux - Découper...

CUTKOSKY ET HOWE (1990) ont proposé une taxonomie des prises d'outils avec la main, selon deux axes (figure 2.12).

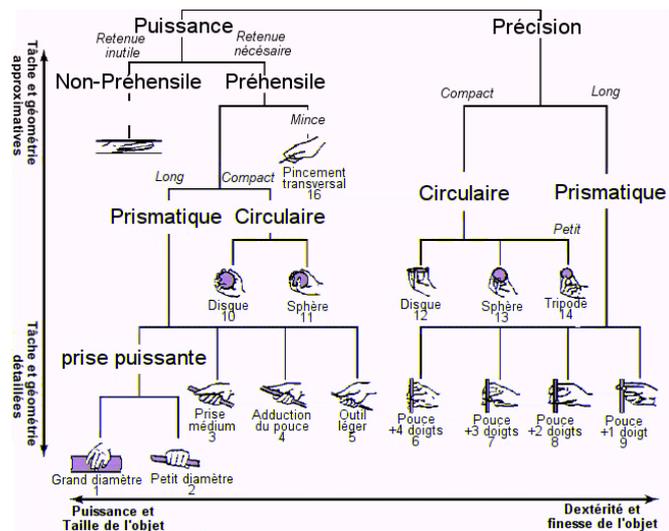


FIG. 2.12 – Les différentes géométries des prises de la main

Les implications psychologiques de l'utilisation d'outils sur les processus d'exploration haptique à l'aide d'outils (le contact à distance ou *remote contact*) ont récemment été le centre de beaucoup d'intérêt. En effet, il semble qu'il y ait équivalence entre les sensations produites lors de l'utilisation d'un outil, et celles ressenties à l'aide de dispositifs à retour de force (voir 3.6.1 page 53).

2.4.3 Les mouvements d'exploration

LEDERMAN *et al.* (1987) ont identifié les différents modèles des mouvements d'exploration haptique. Dans la liste qui suit, sont indiqués entre parenthèse les propriétés associées à chaque mouvement d'exploration :

Le mouvement latéral (textures) : Typiquement, les doigts frottent dans les deux sens une petite zone. Des surfaces intérieures sont explorées, plutôt que des bordures.

La pression (conformité) : Une force ou un couple est appliqué à l'objet, ce dernier étant stabilisé.

Le contact statique (température, étirements) : L'objet est soutenu, tandis qu'une main se repose passivement sur lui.

Le maintient (poids) : L'objet est soulevé et maintenu dans la main, sans chercher à le serrer. Il s'agit typiquement d'un effort du bras ou du poignet.

L'enveloppement (forme, volume global) : La main assure le plus de contacts possibles avec l'objet. Les doigts, la paume sont mis à contribution.

Le suivi de contours (forme, volume exact) : Le mouvement est continu et non-répétitif sur un bord de l'objet. Une main peut maintenir l'objet en place.

Les résultats expérimentaux ont indiqué que dans une tâche libre d'exploration, le mouvement de la main dépendait de la caractéristique recherchée.

2.5 Conclusion

Il s'agissait, dans ce chapitre, de se familiariser avec la très riche terminologie liée au geste et à la perception haptique.

Nous avons également relevé quelques propriétés psychophysiques qui nous intéresseront par la suite, comme le fait que nous avons une meilleure mémoire des positions et une meilleure reproduction d'un mouvement actif. Il nous apparaît également important de souligner la dualité du système haptique : nous avons un système perpétuel (l'information va du monde extérieur vers nous) intimement lié au système moteur (l'information part de nous, et va vers l'extérieur).

Dans le chapitre suivant, le monde extérieur sera une machine ou un ordinateur : on parle alors d'interaction homme-machine, ou de communications homme-machine.



CHAPITRE 3

Communications Homme-Machine

Sommaire

3.1	INTRODUCTION	30
3.2	LES SYSTÈMES INTERACTIFS	30
3.2.1	L'INTERACTION ET L'INTERFACE HOMME-MACHINE . . .	32
3.2.2	QUELQUES DÉFINITIONS DE LA COMMUNICATION MULTI-MODALE	32
3.2.3	LES INTERFACES INFORMATIQUES ACTUELLES: LES INTERFACES WIMP	33
3.3	LES MODÈLES DE L'UTILISATEUR	34
3.3.1	LE MODÈLE DU PROCESSEUR HUMAIN ET LES CARACTÉRISTIQUES DU CORPS HUMAIN	34
3.3.2	AUTRES MODÈLES DE L'UTILISATEUR	36
3.4	LES PÉRIPH'	

3.6	LES APPLICATIONS DU RETOUR HAPTIQUE	53
3.6.1	LA PERCEPTION VIA UNE INTERFACE HAPTIQUE	53
3.6.2	L'INTÉGRATION DU MODE HAPTIQUE DANS L'INTERAC- TION AVEC LA MACHINE	54
3.6.3	QUELQUES APPLICATIONS DU RETOUR HAPTIQUE	57
3.7	CONCLUSION	61

3.1 Introduction

Maintenant que nous avons passé en revue les définitions et concepts propres à l'humain, en matière de perceptions et d'actions basées sur les sensations haptiques, nous allons étendre dans ce chapitre, notre étude à la machine : nous allons donc glisser vers le domaine de l'interaction Homme-Machine, ou IHM.

Pour commencer, seront posées les principales définitions du domaine de l'IHM. La section suivante présentera les modélisations de l'utilisateur, dans un système interactif. Dans les deux parties suivantes, nous présenterons les moyens techniques d'interaction, basée sur la sensation haptique, d'abord dans le sens humain-machine (en entrée du système), puis dans le sens machine-humain (en sortie, donc).

Nous terminerons ce chapitre en présentant l'intégration du mode haptique au sein des systèmes interactifs, puis les applications existantes, mettant en œuvre cette interaction haptique.

3.2 les systèmes interactifs

Un système interactif est une application informatique qui prend en compte, au cours de son exécution, d'informations communiquées par le ou les utilisateurs du système, et qui produit, au cours de son exécution, une représentation perceptible de son état interne (BEAUDOUIN-LAFON, 1997).

Un système interactif est généralement composé de deux parties : l'interface utilisateur et le noyau fonctionnel (figure 3.1). L'interface utilisateur est constituée des éléments logiciels et matériels qui sont mis en œuvre lors de la capture des entrées de l'utilisateur et lors de la restitution des sorties du système. Le noyau fonctionnel représente le système de traitement et de stockage de l'information.

Il est possible de modéliser un système interactif suivant plusieurs points de vue, selon que l'on s'intéresse au domaine de l'application, à l'architecture logicielle ou

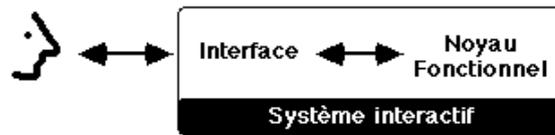


FIG. 3.1 – Décomposition d'un système interactif

aux aspects ergonomiques et cognitifs entrant en jeu dans l'utilisation du système. La figure 3.2 reflète différentes approches que l'on peut avoir d'un système

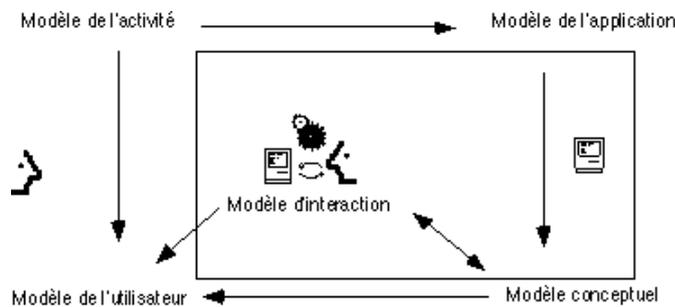


FIG. 3.2 – Modélisations d'un système informatique interactif. Les flèches indiquent les relations de dépendance de chaque modèle (tiré de (BAUDEL, 1995))

Chacun des modèles présentés correspond à une vue que peut se former un observateur en fonction de son rôle dans l'élaboration.

- Le commanditaire du système est principalement préoccupé par l'activité (ou la tâche) que le système aidera à effectuer.
- Le concepteur de l'application a pour objectif de spécifier un système logiciel correspondant au modèle de l'activité.
- Le concepteur de l'interface propose une représentation des objets et des méthodes d'interaction efficaces et compréhensibles pour l'utilisateur, en fonction de l'application (modèle conceptuel) et du système informatique utilisé (modèle d'interaction).
- Enfin, l'utilisateur utilise un système en fonction de ses connaissances du domaine (activité) et du système (modèle d'interaction et modèle conceptuel de l'application).

Posons maintenant la terminologie de ce domaine.

3.2.1 L'Interaction et l'Interface Homme-Machine

L'interaction homme-machine désigne l'ensemble des phénomènes physiques et cognitifs qui interviennent dans la réalisation de tâches avec le concours de l'ordinateur.

L'interface homme-machine désigne un assemblage de composants logiciels et matériels qui permet l'accomplissement de tâches avec le concours de l'ordinateur.

Les composantes de l'interaction homme-machine sont :

1. L'utilisateur
2. accomplit une tâche
3. dans un contexte particulier
4. en utilisant un système informatique.

3.2.2 Quelques définitions de la communication multimodale

Les définitions qui font référence sont le fait de (COUTAZ ET CAELEN, 1991).

Mode de communication : D'après le petit robert, un mode est une norme particulière sous laquelle se présente un fait, s'accomplit une action. En grammaire, le mode est un trait dénotant la manière dont le locuteur présente le procès (on dit plus couramment action). Du point de vue système, un mode représente l'état dans lequel le système se trouve à un moment donné. Un mode fait référence aux cinq sens de l'être humain : le toucher, l'ouïe, la vue, l'odorat, le goût (réception d'information), et aux différents moyens d'expression humains : le geste, la parole (émission d'information). Il définit la nature des informations servant pour la communication (mode visuel, mode sonore, mode gestuel etc.) .

Modalités : Une modalité est une forme concrète particulière d'un mode de communication. Par exemple, le bruit, la musique, la parole sont des modalités du mode sonore.

Média : Dans la vie courante, un média désigne un support d'information (journal, disque audio...). En informatique, un média peut également être un support (vidéodisque, CD-ROM...), mais actuellement, par extension, il désigne le dispositif physique qui acquiert ou qui diffuse l'information : un écran vidéo, un système de synthèse de parole... Dans un sens large, les médias désignent les différents périphériques d'ordinateur (plutôt non conventionnels) qui permettent la communication, en entrée comme en sortie.

Communication multimodale : une communication est dite multimodale si elle fait intervenir plusieurs modes de communications dans les échanges d'information. Cependant, en informatique, ce qualificatif s'applique également pour les communications ne faisant intervenir qu'un seul mode mais avec plusieurs modalités.

Système multimodal : théoriquement, un système informatique multimodal est un système capable d'intégrer plusieurs modes de communication. Cependant, on désigne également par ce nom tout système capable d'intégrer plusieurs modalités de communication (même s'il n'intègre qu'un seul mode).

Multimodalité : le terme de multimodalité fait référence à l'usage de plusieurs modalités pour la réalisation d'une même tâche.

Multimédia : un système informatique multimédia est un système capable d'acquérir et/ou de restituer, par l'intermédiaire des médias, des informations de natures et/ou de formes différentes (parole, musique, image vidéo, etc.).

Ces trois notions sont dépendantes les unes des autres. En effet, à un mode correspond un ensemble de modalités et à une modalité est rattaché un ensemble de média permettant son expression.

Exemple : La modalité « Vibration » s'exprime par exemple sur le médium « Vibreur » et fait appel au mode « Tactile ».

3.2.3 Les interfaces informatiques actuelles : les interfaces WIMP

Dans le champs de recherche de l'Interaction Homme-Machine (IHM), l'acronyme WIMP signifie *Windows, Icons, Menus, Pointing* pour fenêtres, icônes, menus et pointage. Il s'agit des interfaces graphiques que nous utilisons le plus souvent devant un ordinateur. Les interfaces WIMP ont été imaginées et développées au Xerox PARC en 1973 et ont été popularisée avec le Macintosh en 1984.

En anglais populaire, le terme « WIMP » est couramment utilisé pour insulter les personnes qui manquent de force et/ou de courage. Cet usage était courant avant l'arrivée des interfaces graphiques. Maintenant, il arrive que « WIMP » soit utilisé d'une manière dénigrante, en particulier par les personnes qui préfèrent les interfaces traditionnelles comme les interfaces à ligne de commande.

On parle enfin d'interface POST-WIMP pour les interfaces qui se basent sur d'autres paradigmes d'interaction (VAN DAM, 1997).

3.3 Les modèles de l'utilisateur

3.3.1 Le modèle du processeur humain et les caractéristiques du corps humain

Dans leur modèle, « The Model Human Processor », S. Card, T. Moran et A. Newell représentent l'individu comme un système de traitement d'informations régi par des règles (CARD *et al.*, 1983). Le processeur humain comprend trois sous-systèmes interdépendants : les systèmes sensoriel, moteur et cognitif. Chacun d'eux dispose d'une mémoire et d'un processeur dont les performances se caractérisent à l'aide de paramètres (figure 3.3).

Pour une mémoire, les paramètres essentiels sont :

- μ (ou m), la capacité : le nombre d'éléments d'information mémorisés ;
- δ (ou d), la persistance : temps au bout duquel la probabilité de retrouver un élément d'information est inférieure à 0,5 ;
- κ (ou k), le type d'information mémorisée (physique, symbolique, etc.).

Pour un processeur, le paramètre important est

- τ (ou t), le cycle de base qui inclut le cycle d'accès à sa mémoire locale.

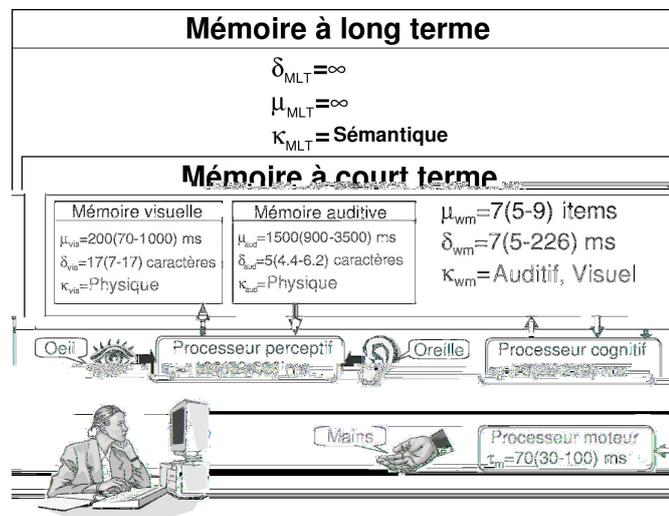


FIG. 3.3 – Le modèle du processeur humain (d'après (JACKO ET SEARS, 2002))

Ce modèle nous donne un certain nombre d'informations sur la mémoire à court terme :

- nous mémorisons 7 items (± 2 selon l'individu, la fatigue...);
- nous regroupons les mnèmes (ie les unités d'information) par motifs visuels, acoustiques, perpétuels ;
- lors d'une recherche d'information, celle-ci a lieu de manière séquentielle ;
- enfin, l'oubli de la mémoire à court terme est de l'ordre de 15 à 30 secondes.

Et ceci peut se retrouver dans une conception des interfaces de systèmes interactifs :

- limiter les items de menus à 7
- établir des liens entre éléments (couleurs, format, emplacements) pour faciliter le filtrage cognitif
- écrire des messages concis
- ne pas présenter d'informations inutiles

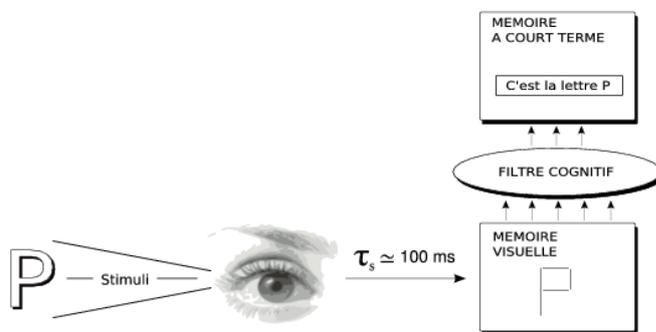


FIG. 3.4 – Le système sensoriel visuel et sa relation avec le système cognitif (tiré et adapté de (COUTAZ, 1990))

Par rapport au système moteur Outre le modèle de l'homonculus déterminé expérimentalement, le modèle du processeur humain propose une mesure quantitative des performances motrices humaines en fonction des organes considérés. Il est ainsi possible de déterminer les principales zones fonctionnelles de l'être humain par ordre d'importance et d'utilité dans l'interaction(extrait de (BAUDEL, 1995)) :

- *la main dominante, constituée des 5 doigts et de la paume, présente 23 degrés de liberté (sans les poignets). Ces degrés ne sont bien sûr pas interdépendants. La main et les doigts sont les organes les plus utilisés et vraisemblablement les plus utiles à l'interaction.[...](STURMAN, 1992)*
- *la main non dominante, identique à la main dominante, mais ayant un contrôle moteur moins précis.*
- *les lèvres et langue, les muscles faciaux présentent un grand nombre de degrés de liberté utilisés de façon très subtile dans la communication humaine. Ces degrés*

de liberté sont cependant difficilement exploitables : ils sont déjà utilisés pour la communication vocale, leur emploi est fortement stéréotypé, dépendante du milieu socioculturel et sont difficile à interpréter. [...]

- les poignets et bras (coude) : Le poignet est lié à la main et ne peut être utilisé indépendamment de celle-ci lorsqu'elle est déjà mise à contribution. Certaines machines-outils utilisent le coude comme moyen d'actionnement d'interrupteurs.*
- les pieds : Que ce soit en position assise ou debout, le pied est assez précisément contrôlable et peut être utilisé [...] (pédalier de l'orgue [...] contrôle du volume ou du vibrato sur un harmonium ou un orgue électronique, accélérateur d'une voiture...). De nombreux outils et instruments utilisent des pédaliers et des pédales à course pour remédier à l'occupation des membres supérieurs par d'autres contrôles. De plus, le pied peut être utilisé lorsque la force requise pour actionner un effecteur doit être assez importante.*
- les jambes : Les jambes ne peuvent être facilement utilisées lorsque le pied est mis à contribution. Certaines machines outils utilisent cependant des interrupteurs activés par le genou.*
- le tronc présente autant de degrés de liberté qu'il y a de vertèbres et de côtes, mais ces dimensions sont assurément difficiles à utiliser activement dans l'interaction avec un ordinateur. Tout au plus une mesure de l'état général de relâchement du corps peut-il indiquer une fatigue de l'utilisateur et une baisse de son attention.*

3.3.2 Autres modèles de l'utilisateur

GOMS (*Goal, Operator, Method, Selection*) (CARD *et al.*, 1983) se contente de modéliser le comportement observable de l'utilisateur (approche béhavioriste) et ne cherche pas à décrire les états mentaux et les traitements internes (approche cognitive).

KeyStroke (CARD *et al.*, 1983) est une version simplifiée de GOMS. Il permet de prédire le temps d'exécution de cette tâche par un utilisateur expert. On suppose que la méthode est unique, on ne prend pas en compte l'opération de choix s'il y a plusieurs méthodes candidates pour le même but.

La théorie de l'action NORMAN (1988) est une approche cognitive de la modélisation de l'utilisateur : l'individu élabore un modèle conceptuel du système informatique. Le comportement est conditionné par l'environnement et par la représentation interne que l'utilisateur se fait du système. La figure 3.5 illustre ce modèle de l'action. Le point fort de cette approche est qu'elle permet d'expliquer les réussites, difficultés et erreurs de l'utilisateur.

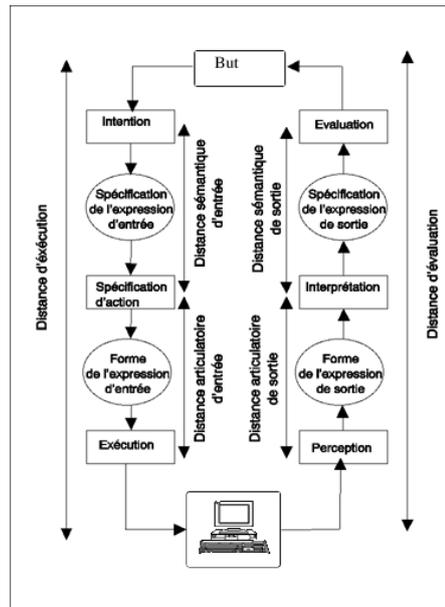


FIG. 3.5 – Le modèle de l'action de Norman

3.4 Les périphériques d'entrée

3.4.1 Petit point historique

Pour manipuler un point dans l'espace virtuel de la mémoire de l'ordinateur, nous avons besoin d'un dispositif dit de pointage. Le plus commun de ces dispositifs, c'est la souris. La figure 3.6 montre la première souris de l'histoire, créée par Douglas Engelbart et William English en 1964.

3.4.2 Taxonomie des périphériques d'entrée

Comment classer les différents périphériques qui ont été imaginés pour interagir avec l'ordinateur ?

Certains périphériques sont conçus pour un mode d'utilisation reposant sur un changement d'états discrets : par exemple, une touche est enfoncée ou non ; ou encore, la position d'un capteur est une valeur entière comprise entre 1 et 10. Ce sont les périphériques à états discrets. Le clavier en est l'exemple type.

D'autres périphériques, comme la souris, sont dénommés à entrée continue. Ils produisent un échantillonnage, ou une trace du geste réalisé pour actionner le périphérique.

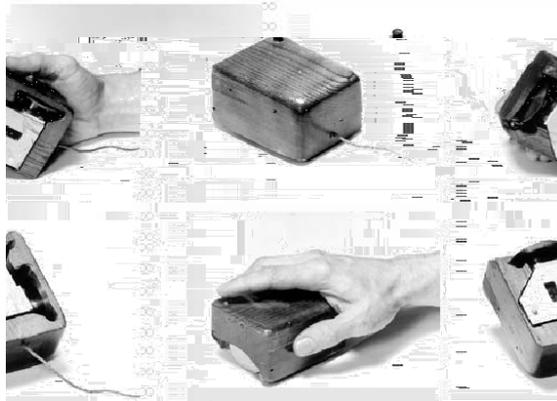


FIG. 3.6 – La première souris de l’histoire

Les premières classifications des périphériques d’entrée sont le fait de Foley, Wallace et Chan (FOLEY *et al.*, 1984) et de Buxton (BUXTON, 1983). Foley et ses collègues se sont basés sur les tâches graphiques que chaque périphérique est capable de réaliser. Buxton a classifié les périphériques d’entrée selon leurs propriétés physiques et leur nombre de degrés de libertés. Finalement, Card et ses collègues (CARD *et al.*, 1991) ont repris la classification de Buxton et l’ont étendue à l’ensemble des périphériques à degrés de liberté continus et discrets. Dans un premier temps, le tableau 3.1 récapitule les grandeurs que l’on utilise pour classer les périphériques à retour d’effort, selon la nature des degrés de liberté.

		Degrés de liberté	
		Linéaire	Rotatif
Position	absolue	Position P	angle R
	relative	mouvement δP	delta angle δR
Force	absolue	Force F	couple T
	relative	delta Force δF	delta couple δT

TAB. 3.1 – Inventaire des grandeurs mesurables sur un périphérique d’entrée continu en fonction de la nature du degré de liberté

Le modèle de CARD *et al.* (1991) se propose de placer les périphériques d’entrée dans un espace permettant de les comparer. Le nombre de dimensions de cet espace n’est pas fixé. Tout critère de comparaison entre deux dispositifs peut en fournir une. Les dimensions les plus importantes sont le nombre et le type des degrés de liberté des dispositifs d’entrée considérés. Le tableau suivant est constitué de 5 axes :

- dispositif de translation ou de rotation.

- dimension de l'espace (x, y, z ou lacet, tangage et roulis) captée.
- déplacement absolu ou relatif.
- capteur de mouvement ou de force.
- résolution (entre 1 bit et l'infini).

La figure 3.7 reprend la taxonomie de CARD *et al.* (1991), ainsi que celle de chacun de ses prédécesseurs.

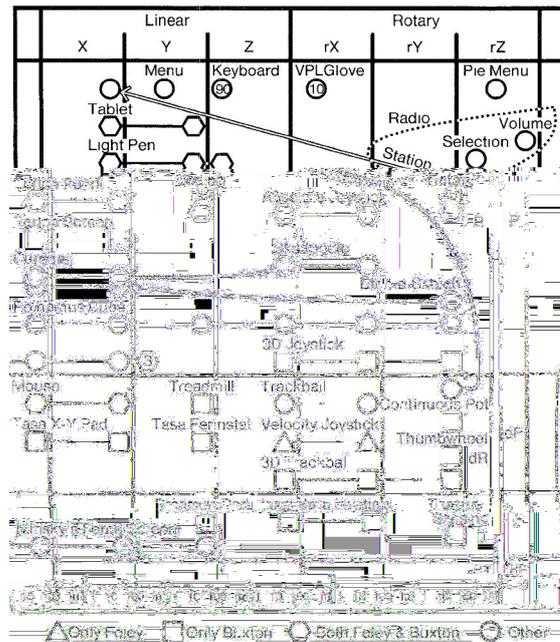


FIG. 3.7 – Espace de conception des dispositifs d'entrée (tiré de (CARD *et al.*, 1991))

3.4.3 Les performances en entrée des périphériques de pointage

Pour évaluer les performances des dispositifs de pointage, les recherches ont souvent utilisé la loi de Fitts (voir page 15). La figure 3.8 page suivante montre les performances de différents dispositifs de pointage selon la loi d'Accot (voir page 17).

Comment lire ce graphique ? L'axe horizontal indique l'indice de difficulté de la tâche. Comme il s'agit de la loi d'Accot, l'indice de difficulté est relatif ici à la largeur de la trajectoire à suivre, et à sa rectilinéarité (est-elle très courbée ou non).

L'axe vertical indique le temps du mouvement (en ms).

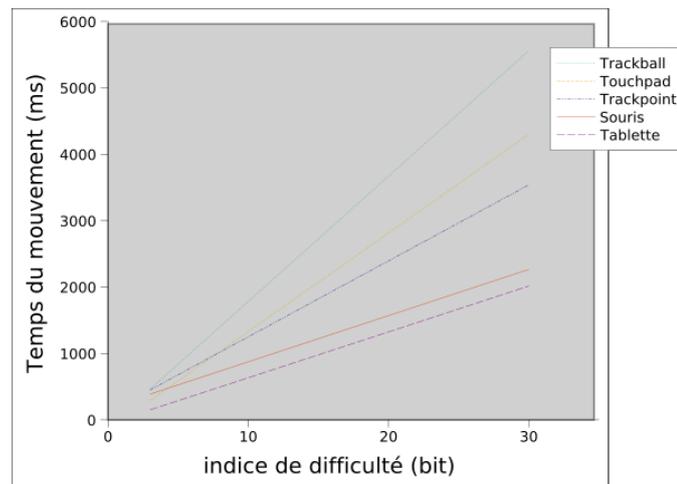


FIG. 3.8 – Les performances des périphériques de pointage selon la loi d'Accot (tiré de (ACCOT ET ZHAI, 1999))

Donc, plus le segment de droite est « bas » sur ce graphique, plus le dispositif correspondant est efficace dans une tâche de suivi de trajectoire.

La souris apparaît comme un des périphériques les plus performants, avec la tablette graphique. Ensuite, le trackpoint (le petit joystick disponible sur certains portables pour manipuler le pointeur), le touchpad (le petit écran tactile des ordinateurs portables) et le trackball, sont beaucoup moins performants.

Une autre étude (MACKENZIE *et al.*, 2001) confirme ce résultat (figure 3.9).

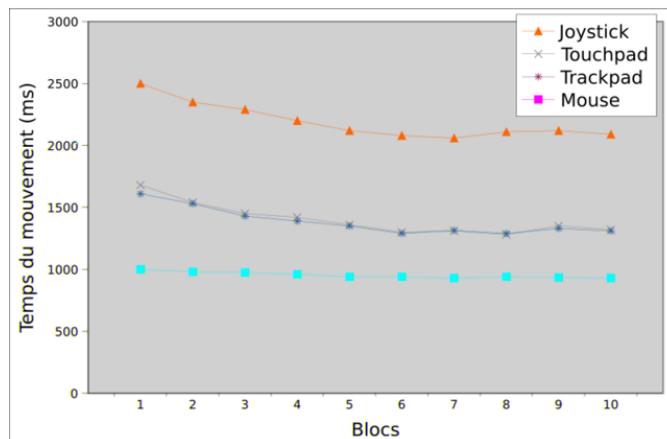


FIG. 3.9 – Les performances de dispositifs de pointage (adapté de MACKENZIE *et al.* (2001))

La tâche effectuée et l'interprétation de ce graphique Les sujets devaient aller pointer le plus vite possible, différentes cibles placées sur un cercle. La figure 3.10 précise l'ordre des mouvements à réaliser.

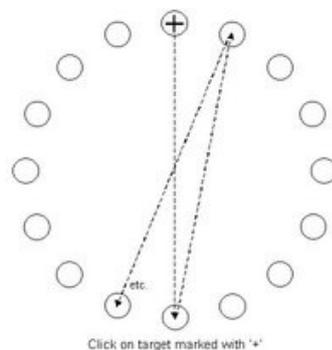


FIG. 3.10 – La tâche de pointage dans l'expérience de McKenzie

Sur le graphique de la figure 3.9, on retrouve bien le fait que la souris est bien plus efficace que les autres dispositifs de pointage. Il y a également un effet d'apprentissage qui apparaît (le temps du mouvement diminue au fur et à mesure de l'expérience), mais ce n'est pas le sujet de notre discussion.

Enfin, d'un point de vue ergonomique, ZHAI *et al.* (1996) a démontré que les périphériques d'entrée manipulés avec les doigts, obtiennent de meilleures performances

lors d'une tâche de pointage, que les dispositifs qui nécessitent la mise en action du poignet et/ou du coude et/ou de l'épaule.

Ceci doit nous amener à inciter les utilisateurs à se placer dans une position leur permettant d'utiliser la précision de leurs doigts, avec le bras le plus reposé possible
--

3.4.4 Le geste dans les systèmes interactifs

BAUDEL (1995) a relevé trois paradigmes d'utilisation du canal haptique en entrée dans les systèmes interactifs. Il a défini l'entrée « haptique » comme « tout mode d'interaction faisant intervenir les divers modes d'action liés aux sens haptiques ». Ce que nous pouvons considérer comme « le geste vers la machine ».

3.4.4.1 Entrée haptique simple

BAUDEL (1995) parle d'entrée haptique simple lorsque la sémantique d'une action est entièrement décrite par des changements d'état discrets du dispositif.

Par exemple, pour tracer un rectangle avec une souris, le bouton enfoncé fournit une première position d'ancrage, le relâchement une deuxième. Ces deux positions suffisent à elles seules à fournir les paramètres de création du rectangle ; la façon avec laquelle l'utilisateur déplace la souris n'a pas d'incidence sur la signification engendrée par le geste.

3.4.4.2 Reconnaissance de marques et de tracés

On appelle reconnaissance de marques et de tracés, la prise en compte de la trajectoire réalisée avec le dispositif de pointage.

Dans l'exemple du rectangle, on peut imaginer une autre façon de faire : avec la souris, on peut tracer directement les 4 côtés du rectangle. Le système se chargera de paralléliser les tracés forcément approximatifs, en fonction de ce qu'il a reconnu.

Cette technique possède un autre avantage : il n'y a plus de déclaration d'intention. Dans notre exemple, il n'est plus nécessaire de choisir l'outil « dessine un rectangle » puis de le tracer ; on peut dessiner directement.

La reconnaissance de marques, ou de tracés, permet d'enrichir la sémantique des actions élémentaires de l'utilisateur.

Ce type d'interaction est déjà utilisé dans quelques applications. Par exemple, le navigateur internet Opera, dispose d'une reconnaissance de marques. Par exemple, un geste avec la souris vers la gauche, tout en maintenant le bouton du milieu enfoncé, rechargera la page précédente.

Dans un éditeur d'objets en deux dimensions, KURTENBACH ET BUXTON (1991) ont utilisé toute une variété de gestes qui simplifiaient la sélection, l'effacement, le déplacement ou la duplication d'un objet ou d'un groupe d'objets. La figure 3.11 présente ces gestes. Par exemple, effacer un objet est réalisé en barrant cet objet (a) ; effacer un groupe d'objets consiste en dessinant une zone autour de ces objets puis en terminant le tracé à l'intérieur de cette zone (b) ; le déplacement d'objets commence comme l'effacement de groupe, mais le tracé se termine à l'extérieur du tracé, à l'endroit où l'on souhaite déplacer ce groupe (c) ; enfin, le geste de copie (d) consiste en un geste circulaire autour des objets à sélectionner, terminé par un « c ».

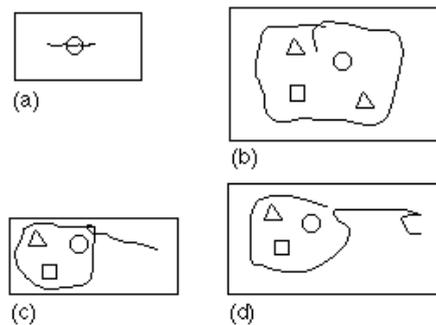


FIG. 3.11 – Les gestes pour l'édition graphique. (tiré de (KURTENBACH ET BUXTON, 1991))

Pour les artistes, l'entrée gestuelle peut faciliter l'interaction créative. BUXTON (1986) a montré un simple ensemble de gestes pour transcrire la notation musicale. Comme montré sur la figure , les formes des notes les plus communes (en haut de la figure) trouvent un équivalent dans l'ensemble des gestes à réaliser (sous chaque note).

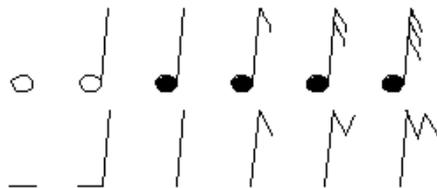


FIG. 3.12 – Les gestes pour transcrire la notation musicale (tiré de (BUXTON, 1986))

3.4.4.3 Interaction gestuelle « pure »

Toujours pour BAUDEL (1995), la reconnaissance de tracés reste limité à reconnaître l'échantillonnage de la trajectoire d'un point dans le plan (ou l'espace). Le geste effectif réalisé par l'utilisateur n'est toujours pas pris en compte. Par exemple, la machine ne distinguera pas si le geste a été effectué de la droite ou de la main gauche.

Pour accentuer la compréhension du geste par la machine, les dispositifs de pointage deviennent clairement insuffisants. Il s'agit alors d'utiliser des gants, ou un système de vision par caméra ; on parlera respectivement de dispositif intrusif, et non-intrusif : en effet, dans le cas des gants, on doit porter un périphérique, tandis qu'avec la caméra, on agit librement.

Une dernière classe d'interaction peut venir s'ajouter. Il s'agit des systèmes de prise en compte des gestes inconscients. En effet, une partie des gestes sont de nature inconsciente, et peuvent néanmoins contenir du sens. On parle alors de dispositifs de suivi du regard, et toujours de vision par caméra.

3.5 Les périphériques de sortie à retour haptique

3.5.1 Historique

La télé-robotique est le domaine technologique qui a nécessité la création de périphériques à retour de force. Le schéma classique est le couple « Maître-esclave ». Sheridan (SHERIDAN, 1992) a défini le système télé-opérateur Maître-esclave comme suit :

Un télé-opérateur Maître-esclave est constitué de 2 sous-parties :

- Le dispositif maître, généralement un dispositif mécanique plus ou moins anthropomorphique et autorisant de multiples degrés de liberté, actionné directement par l'opérateur humain ;
- Le dispositif esclave, isomorphique au maître, la plupart du temps équipé d'une main robotisée ou d'un outil spécialisé .

Le retour haptique (uniquement kinesthésique aux débuts ; on voit apparaître de plus en plus l'ajout du retour tactile) permet une immersion beaucoup plus efficace. L'opérateur a de plus en plus l'impression de manipuler directement l'outil que manipule le périphérique esclave distant.

Nous pouvons considérer que le premier périphérique à retour de force vient du monde de la télé-robotique : en 1952, Groetz et Thompson de l'Argonne National Laboratory (GOERTZ, 1952) créent l'Argonne (voir la figure 3.13), un système de



FIG. 3.13 – L'argonne

télémanipulation « maître-esclave » permettant à un humain de diriger un bras robotisé dans un milieu hautement dangereux (centrale nucléaire, espace, fonds sous-marins).

Par la suite, d'autres périphériques ont été conçus pour la télé-robotique, mais il ne s'agit ici que de simuler à distance une interaction physique qui a lieu dans le monde réel. En 1965, sous l'impulsion de Ivan Sutherland, Fred Brooks Jr. et ses collègues de l'université Chapel Hill de Caroline du Nord, se sont lancés dans le projet GROPE, visant à atteindre une simulation en temps réel pour la manipulation tridimensionnelle de molécules virtuelles, en ayant le retour des forces moléculaires. C'est plus de 20 ans plus tard que Brooks et ses collègues ont pu atteindre leur but initial (voir figure 5.6), grâce à la montée en puissance des ordinateurs (BROOKS *et al.*, 1990).

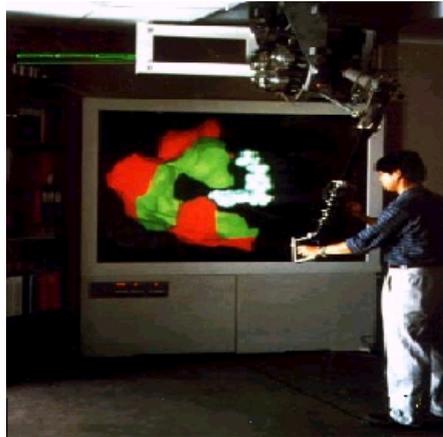


FIG. 3.14 – Molecular Docking Virtual Interface ou MDVI (University of North Carolina)

Enfin, vers la fin des années 70, est apparu le premier prototype de périphérique effectuant le retour tactile d'une simulation graphique : le « Sandpaper system » développé au MIT (MINSKY, 1995). Il s'agit d'un joystick offrant 2 degrés de liberté et rendant à la fois le retour de force et le retour tactile. Ainsi, il était possible de faire bouger un curseur au-dessus de divers échantillons de papiers virtuels et de sentir leurs textures. Cependant, par rapport aux périphériques de télé-robotique, on note une perte de liberté, puisque l'utilisateur doit garder une main sur le joystick. En retour, les dispositifs pouvaient embarquer des outils et mécaniques lourds, puisqu'ils sont posés sur leur support (en général, le bureau).

3.5.2 Les périphériques à retour haptique

Sans prétendre à l'exhaustivité, nous allons présenter quelques périphériques à retour haptique. Précisons tout d'abord la terminologie employée (tableau 3.2).

Perception	Périphérique
Kinesthésique	à retour de force / d'effort
Tactile	à retour tactile

TAB. 3.2 – Correspondance terminologique entre la perception et les périphériques

On peut noter une différence fondamentale entre les deux retours haptiques : le retour de force peut s'opposer à un mouvement volontaire de l'utilisateur, jusqu'à l'empê-

cher (s'il est suffisamment fort) ; le retour tactile ne le peut pas (BURDEA *et al.*, 1992)

3.5.2.1 Les périphériques à retour de force

Nous pouvons distinguer deux grandes familles de périphériques à retour de force (CASIEZ, 2004) :

les périphériques à base non fixe (*man based*) : ce sont les périphériques portés par l'utilisateur, de type gant ou exosquelette.

les périphériques à base fixe (*ground based* ou *desk based*) : ils regroupent les périphériques de type bras, stylos (*probe*), manches ou souris

Nous allons maintenant voir les principaux dispositifs utilisés dans la recherche sur l'interaction haptique.

3.5.2.1.1 Les gants Les gants doivent saisir les mouvements complexes de la main. Ils autorisent en général un grand nombre de degrés de liberté. En effet chaque doigt dispose de 4 degrés de liberté, auxquels il faut ajouter les mouvements de la paume et parfois du poignet. Le retour d'effort permet de ressentir la rigidité de l'objet mais ne permet pas de ressentir son poids.

Nous pouvons citer le Rutgers Master II qui est basé sur les travaux de (BURDEA *et al.*, 1992), et le CyberGrasp commercialisé par la société Immersion IMMERSION CORPORATION. Ces deux dispositifs se distinguent par l'emplacement de la structure mécanique. Ainsi, la structure est intérieure à la paume de la main pour le Rutgers Master II, ce qui empêche l'utilisateur de fermer totalement la main (figure 3.15).



FIG. 3.15 – Les gants Rutgers Master II et CyberGrasp

3.5.2.1.2 Les bras maîtres Les bras maîtres sont principalement utilisés dans les applications de télé-opérations. Sur la figure 3.16 apparaît le Dextrous Arm Master créé par SARCOS, l'une des entreprises pionnières dans le domaine. Ces systèmes, placés soit sur une table ou sur le sol, sont capables de fournir des forces puissantes à l'utilisateur. Ils sont également utilisés dans les applications de réalité virtuelle.

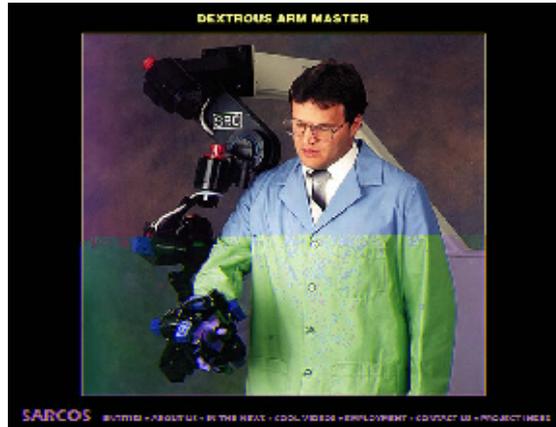


FIG. 3.16 – Le SARCOS Dextrous Arm Master

3.5.2.1.3 Les « stylos » à retour de force Ce sont des périphériques proposant au minimum trois degrés de liberté en entrée (le déplacement du stylet dans l'espace), mais le plus souvent six ; et 3 degrés de liberté en sortie (c'est à dire sur le retour de force), et parfois six. La figure 3.17 illustre les différentes possibilités en terme de degrés de liberté.

Le périphérique le plus utilisé dans les laboratoires est le PHANTOM (figure 3.18), créé et commercialisé par Sensable Inc.

Son maniement s'effectue grâce un stylet situé à l'extrémité du périphérique ou en insérant le bout de son doigt dans un dé. Il est alors possible, grâce à une excellente résolution spatiale de ressentir les sensations que l'on aurait à toucher un mur lisse, un coin pointu, une sphère caoutchouteuse ou encore une surface texturée.

Nous pouvons citer le Virtuouse 3D, le Delta Haptic et le Freedom 6S (figure 3.19), également utilisés dans les laboratoires.

Précisons que les périphériques de type PHANTOM sont à la 3D ce que la souris à la 2D : des **périphériques de pointage** : seul un point est déplacé dans l'espace.

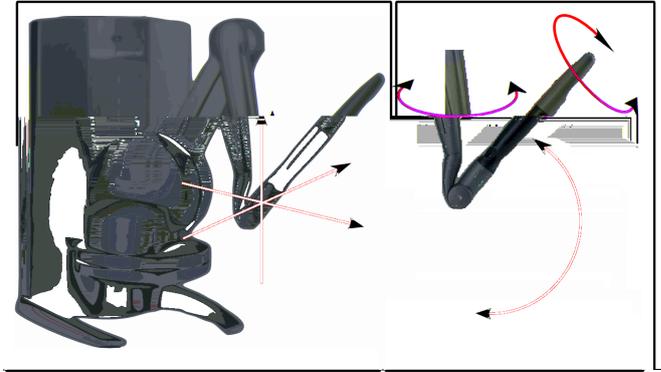


FIG. 3.17 – Les degrés de liberté sur un bras à retour de force



FIG. 3.18 – le PHANTOM, dans sa version omni.



FIG. 3.19 – Le Virtuose 3D, le Delta Haptic et le Freedom 6S

3.5.2.1.4 Les souris à retour de force Les souris à retour de force sont des dispositifs à deux degrés de liberté. Nous pouvons citer la Wingman Force Feedback Mouse (figure 3.20), conçue par Immersion, et commercialisée par Logitech.



FIG. 3.20 – Wingman Force Feedback Mouse

La souris proprement dite est solidaire de son socle. De fait, la surface de travail de cette souris est très réduite : 1,9 cm par 2,5 cm. Enfin, la souris peut générer des forces pouvant atteindre 1N.

La souris Wingman force Feedback a originalement été conçue pour les jeux vidéos, mais ses possibilités et son faible coût l'ont rendue populaire dans les recherches sur l'accessibilité auprès des personnes non-voyantes (YU *et al.*, 2001; GARDNER ET BULATOV, 2001; TORNIL ET BAPTISTE-JESSEL, 2004)).

3.5.2.2 Les périphériques à retour tactile

Les dispositifs tactiles sont bien entendu basés sur les perceptions tactiles. On se référera à la page 10 pour un survol de ce système perceptif. Nous pouvons par exemple rappeler, que la perception tactile est le fait de trois classes de récepteurs : les thermorécepteurs, les nocirécepteurs et les mécanorécepteurs. Du côté de la machine, ce sont surtout des dispositifs répondant aux mécanorécepteurs, et donc à nos capacités de discrimination tactile, qui ont été conçus. On peut pourtant citer les travaux du Dr Suichi Ino, de l'université d'Hokkaido, qui cherche à créer un système de rendu de la température. Le Temperature Display, par exemple autorise un intervalle de température allant de 10°C à 60°C à une précision de 0.1°C pour un dispositif ne pesant que 30 grammes.

Pour le reste, donc, les dispositifs sont surtout axés sur la discrimination tactile. Et la principale approche pour rendre un élément tactile est celle visible sur la figure 3.21. On peut y voir une cellule d'affichage tactile. Cette cellule est composée de petits picots capables de monter ou descendre sur leur axe. Il est ainsi possible de dessiner des petits motifs en relief.

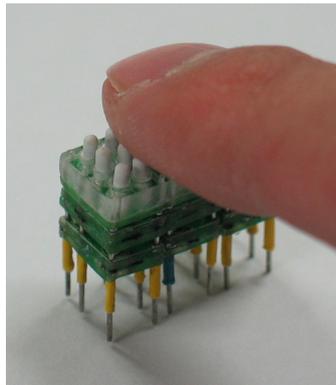


FIG. 3.21 – Une cellule d'afficheur tactile

Les afficheurs brailles (figure 3.22) utilisent ces cellules. Comme un caractère braille est composé de 8 points (pour le braille informatique), une cellule est composée de 8 picots. Il s'agit ensuite d'accoler un certain nombre de cellules (selon les modèles, de 20 à plus de 80 cellules) pour afficher plusieurs caractères brailles, et donc, un mot, une phrase.



FIG. 3.22 – Une plage braille

Toujours dans la même approche, les sociétés ABTIM¹ et KGS² ont équipé de cellules des surfaces plus grande. Il ont ainsi réalisé des systèmes capables de reproduire des dessins en relief (figure 3.23).



FIG. 3.23 – (gauche) : l'ADVANCED DISPLAYS for the BLIND de ABTIM ; (droite) : le DotView de KGS

Pour terminer cette partie, nous pouvons évoquer une autre classe de périphériques, qui exploite les capacités tactiles en sortie (de l'ordinateur vers l'humain), et les capacités kinesthésiques en entrée (de l'humain vers la machine). Il s'agit souvent d'adapter une cellule braille sur un dispositif de pointage (LECOLINET ET MOURET, 2005). D'autres exemples sont visibles sur la figure 3.24.

¹<http://www.abtim.com>

²<http://www.kgs-america.com/dvs.htm>



FIG. 3.24 – Le couplage des dispositifs de pointage avec le mode tactile

3.6 Les applications du retour haptique

3.6.1 La perception via une interface haptique

D'un point de vue général, il s'avère que les dispositifs actuels limiteront les procédures d'exploration haptique. L'utilisateur est en effet obligé d'adopter des stratégies afin d'extraire les propriétés des objets. Et ceci est particulièrement notable sur les dispositifs nécessitant la manipulation d'un activateur comme le manche du joystick ou le stylet du PHANTOM (JANSSON ET K., 1999). De plus, la technologie même est un facteur limitant : WALL (2000) a ainsi montré que les moteurs du PHANTOM étaient inadéquats pour générer des textures très fines nécessitant des hautes fréquences.

En se référant aux procédures d'exploration haptique proposées par LEDERMAN *et al.* (1987) (voir page 27), WALL (2000) a dressé le tableau 3.3, qui montre les possibilités et les impossibilités, lorsque l'on manipule un dispositif de pointage. Finalement, LEDERMAN ET KLATSKY (2004) ont également montré que la rigidité du stylet limitait également la perception (par rapport à un stylet flexible).

Pour l'anecdote, JANSSON (2000) a suggéré qu'« obtenir une information par l'intermédiaire d'un affichage haptique tel que le PHANTOM, était semblable à obtenir de l'information d'un écran d'ordinateur en déplaçant sur celui-ci une feuille de papier percée d'un simple petit trou ».

Concernant la mémorisation, JANSSON ET K. (1999) ont montré qu'une phase, même très courte, d'initiation à l'utilisation d'un dispositif comme le PHANTOM, permettait une nette amélioration des performances.

Mouvements d'exploration	Possibilité avec un dispositif de pointage
Le mouvement latéral (textures)	Possible, bien que les caractéristiques des textures varient temporellement (vibration) et non pas spatialement
La pression	Possible
Le contact statique	Possible, bien qu'il n'y ait pas de retour de température, ou de forces distribuées pour générer des étirements
Le maintient	Possible en attachant l'objet simulé à la place de l'activateur
L'enveloppement	Non possible en l'absence de plusieurs points de contact
Le suivi de contours	Possible, mais très difficile du fait d'une zone de contact réduite à un point

TAB. 3.3 – Les possibilités des mouvements d'exploration avec un périphérique de pointage

Comme nous allons maintenant le voir, les applications utilisant de tels dispositifs, malgré leurs défauts, se multiplient dans de nombreux domaines.

3.6.2 L'intégration du mode haptique dans l'interaction avec la machine

Le système haptique humain a un rôle important à jouer dans l'interaction homme-machine. **A l'inverse des systèmes visuels et auditifs, le sens haptique est capable à la fois de percevoir et d'agir sur l'environnement** et est une partie importante de la plupart des activités humaines. La figure 3.25 illustre la double boucle d'interaction liée au système haptique : l'homme et la machine agissent et perçoivent sur le mode haptique, en même temps. Les schémas de fonctionnement pour l'homme et pour la machine sont très similaires : il y a dans les deux cas une boucle action-réaction entre le monde extérieur, et le système de décision ; c'est à l'intersection des deux boucles que se situe l'interaction.

Dans cette partie, nous allons passer en revue quelques applications concrètes basées sur le mode haptique. On pourra revenir à la page 44 pour un historique sur les débuts du retour de force. On rappelle qu'initialement, c'est en télé-robotique que les dispositifs à retour de force sont apparus.

3.6.2.1 Le retour haptique comme technique d'interaction

MILLER ET ZELEZNIK (1999) ont identifié 4 utilisations possibles du retour haptique :

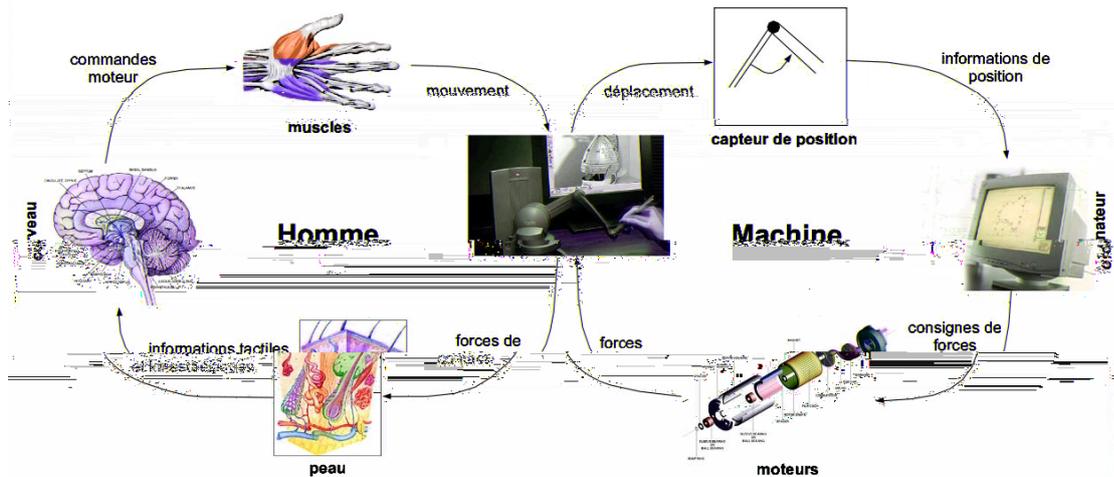


FIG. 3.25 – Interaction haptique entre l’homme et la machine (tiré de CASIEZ (2004))

1. « *Anticipation* » (Anticipation) : force résistante annonçant l’imminence d’un événement.
2. « *Indication* » (Suivi) : force donnant l’indication qu’une action est en cours.
3. « *Follow-through* » (Accomplissement) : force donnant l’indication à l’utilisateur qu’un événement s’est produit.
4. « *Guidance* » (Guidage) : guidage/contrainte du geste de l’utilisateur.

3.6.2.2 Le retour haptique : aspect logiciel

Afin de manipuler les dispositifs, les fabricants ont mis à la disposition des programmeurs, des bibliothèques de programmation spécialisées.

Immersion Corporation™, le fabricant de la souris Wingman Force Feedback Mouse™, propose ainsi l’Immersion Touchsense SDK. Cette bibliothèque permet de piloter tout un ensemble de périphériques (souris, joysticks, volants et manettes de jeux) chez de nombreux constructeurs (Microsoft™, Logitech™, Genius™, ThrustMaster™, Saitek™, Gravis™). De plus, une des particularités de ce SDK (*Software Development Kit*) est qu’il dispose d’un plugin pour les navigateurs Web. Ainsi, il est possible d’augmenter une page Web, avec des retours de force. Les navigateurs supportés sont Microsoft™ Internet Explorer et Netscape™. Une version pour les navigateurs basés sur le moteur Gecko (Mozilla™, Firefox) existe, mais est encore en phase de développement.

Sensible™, le concepteur des PHANTOMS, propose plusieurs bibliothèques de programmation : Le Ghost SDK, et les HDAPI et HLAPI. Le Ghost SDK est basé

sur un moteur de rendu du toucher, à partir d'une scène 3D. Par exemple, il dispose d'un lecteur de fichiers VRML (Virtual Reality Markup Language : langage de description de scènes 3D), et l'on peut très rapidement « toucher » les objets de la scène, avec un PHANTOM. Cependant, il peut être intéressant de se passer d'une base tridimensionnelle pour générer des effets. Ainsi, SensableTMa proposé les bibliothèques HDAPI et HLAPI (pour *Haptic Device API* et *Haptic Library API*). La bibliothèque HDAPI permet un contrôle direct des paramètres de fonctionnement du périphérique : les positions, orientations et vitesses des différents éléments du dispositif, l'accès aux systèmes de coordonnées internes des moteurs, les températures des moteurs... Comparé au Ghost SDK, le HDAPI autorise beaucoup plus de liberté et de précision lors de la création des effets. Il peut cependant s'avérer fastidieux de créer des effets à partir d'autant de paramètres. C'est pour cette raison que SensableTMa conçu le HLAPI. Il s'agit d'une bibliothèque intermédiaire entre les deux autres. À l'instar du GHOST SDK, on part d'une scène 3D, mais cette fois, la scène est décrite en OpenGL. Ceci permet un contrôle encore très précis.

Nous pouvons également citer le H3D API de SenseGraphics³. C'est une bibliothèque de programmation haptique open-source (licence GPL dans un cadre de recherche), basée sur le format de fichier X3D (il s'agit du format de description de formes 3D, basé sur XML ; c'est le successeur du VRML). Pour le moment, cette bibliothèque ne supporte que les PHANTOMs.

3.6.2.3 Le retour haptique : à quoi cela ressemble ?

Jusqu'ici, nous avons discuté de périphériques à retour de force, mais nous n'avons pas dit en quoi consistait le retour de force. La partie précédente a présenté quelques bibliothèques de programmation qui permettent de concevoir des effets de retour de force, effets dont nous allons maintenant présenter les grandes familles (en notant bien, que les bibliothèques de programmation permettent de combiner ces différents effets).

Le contact ponctuel : il s'agit de l'effet le plus classique, mais aussi le plus étudié.

L'idée est de générer une force dans un dispositif à retour de force, pendant qu'on le manipule, de manière à simuler le contact avec un objet du monde virtuel, comme s'il existait. Par exemple, avec un périphérique type PHANTOM, imaginons que la manipulation du stylet amène le curseur au contact d'une forme virtuelle ; à cet instant, les moteurs du PHANTOM se durcissent afin de limiter les mouvements de l'utilisateur selon certaines directions. On aura alors l'illusion de rentrer en contact avec un objet physique.

³<http://www.sensegraphics.se>

Le cloisonnement : Il s'agit de définir une zone (souvent rectangulaire ou elliptique), qui aura une frontière entièrement paramétrable. Cet effet possède alors une notion d'intérieur et d'extérieur. On peut par exemple donner la possibilité ou non, au pointeur de rentrer ou de sortir de la zone. Il peut s'agir également de définir une zone d'attraction, qui attirera le curseur en son centre lorsqu'il passe à une certaine distance.

Les effets dynamiques : Ce sont des effets dont les paramètres évoluent dynamiquement selon les propriétés du geste de l'utilisateur. Par exemple, une certaine friction peut être simulée, en fonction de la vitesse instantanée, ou du rayon de courbure. Autre exemple, le périphérique peut « empêcher » l'utilisateur des changements de direction trop brusques : on simule ainsi l'inertie du déplacement d'un objet lourd.

Les effets de texture : Ces effets permettent de simuler des textures. Celles-ci peuvent être synthétisées grâce à un certain nombre de paramètres (fréquence, amplitude, directions...), ou bien simulée depuis une image réelle de façon similaire à ce que réalise une bump-map en image de synthèse, c'est à dire une image où l'intensité d'une nuance (du noir au blanc par exemple) code l'altitude ou la profondeur.

3.6.3 Quelques applications du retour haptique

3.6.3.1 La médecine et la rééducation

Depuis le début des années 90, la médecine est devenue un champ d'application du retour haptique. Plusieurs pratiques peuvent nécessiter l'utilisation de dispositifs à retour de force.

La palpation des tissus : Elle correspond à la première étape d'une consultation : le diagnostic. Et la forme la plus traditionnelle de diagnostic est la palpation des organes et des tissus du patient. En 1994, LANGRANA *et al.* (1994) ont pour la première fois utilisé un périphérique à retour haptique, le Rutgers Master (voir page 47), pour palper un genou virtuel. Depuis, les outils ont évolué, et les applications de télé-diagnostic se généralisent.

La télé-chirurgie : La télé-chirurgie est un des grands axes de la recherche sur les périphériques haptiques. Le praticien peut ainsi intervenir au cours d'une opération alors qu'il ne se trouve pas sur place.

La rééducation : Cette approche de l'utilisation des dispositifs à retour de force est très intéressante. En général, les dispositifs de rééducation utilisent des périphériques sortis de leurs contextes habituels d'utilisation. REINKENSMEYER *et al.* (2000) ont par exemple utilisé un joystick à retour de force tel qu'on peut en trouver dans

le commerce, pour réduire l'acuité motrice d'un patient ayant subi un accident cérébral.

3.6.3.2 La modélisation d'objets virtuels

Un logiciel de modélisation tridimensionnelle nommé FreeForm⁴, a été présenté par Sensable Technologies Inc. Ce système se base sur une métaphore du sculpteur : l'utilisateur se sert du PHANTOM pour sculpter une pierre virtuelle présentée à l'écran, et rendue par un retour de force.

De manière similaire, InTouch (GREGORY *et al.*, 2000) est un logiciel de modélisation 3D. Il permet également le dessin sur un volume (figure 3.26).

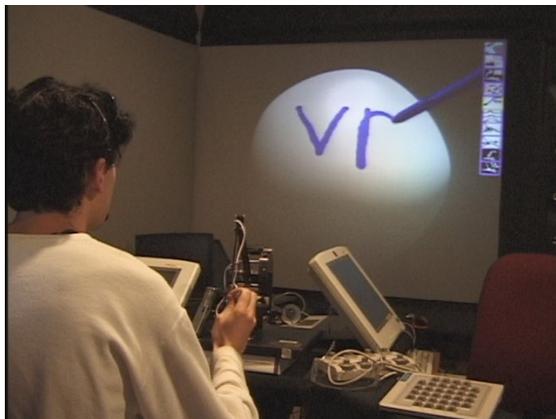


FIG. 3.26 – Le logiciel inTouch

3.6.3.3 Le travail collaboratif

L'utilisation du mode haptique dans une collaboration en environnement virtuel, peut permettre une amélioration, notamment de la conscience que l'on doit avoir de travailler avec quelqu'un (BASDOGAN *et al.*, 2000).

SALLNÄS ET ZHAI (2003) ont montré également une diminution du taux d'erreur lors d'une tâche de pointage collaboratif lorsqu'un retour haptique était rendu (pour des temps identiques avec ou sans retour haptique).

On peut noter qu'il s'agit d'une classe d'application qui nécessite des recherches pluridisciplinaires : rendus haptiques, bien sûr, mais aussi réseaux et traitement du signal. Par exemple, lorsque la collaboration se fait via un réseau, il faut anticiper, afin

⁴<http://www.sensable.com/products/3ddesign/concept/index.asp>

d'atténuer le délai temporel qu'il peut y avoir entre les deux machines. BELGHIT (2002) a ainsi utilisé une forme modifiée du LPC (Linear Prediction Coding) pour améliorer l'ergonomie du télégeste.

3.6.3.4 L'entraînement

Un des intérêts du retour haptique est qu'il peut simuler l'utilisation d'outils du monde réel. C'est donc tout naturellement que des simulateurs, ou des plate-formes d'entraînement, ont pu être conçues.

WILLIAMS *et al.* (2004) ont par exemple mis au point un système d'entraînement au diagnostic du mal de dos. Leurs recherches les ont amené à créer un moyen de playback haptique. Le playback haptique consiste à enregistrer les mouvements réalisés par une personne, puis de les refaire exécuter par le dispositif haptique (dans ce cas, il s'agit du PHANTOM). De cette manière, les étudiants pouvaient suivre les mouvements d'un expert, avant de réaliser leur propre exercice. On peut quasiment parler de retour de geste, de la part de la machine.

Le centre lavallois de ressources technologiques⁵ a proposé le système VTT (*Virtual Technical Trainer*) qui est un simulateur de machine outils. Ce simulateur a comme raison d'être l'actuelle utilisation quasi systématique de machines à commandes numériques. Or ces dernières ont pour particularité d'introduire une distance à la matière telle que l'apprenant perd toute notion des contraintes mécaniques dans les tâches réalisées par les machines d'usinage.

3.6.3.5 Le domaine artistique

Le retour de force a souvent été utilisé dans les domaines artistiques. Comme dans la partie précédente, cela peut consister en la simulation d'un instrument réel, comme pour le projet dAb (figure 3.27) : le dispositif utilisé est un PHANTOM, et il s'agit d'imiter les sensations que l'on a lors du maniement de pinces.

Dans une approche très différente, le projet PHASE (Plate-forme Haptique d'Application Sonore pour l'Eveil Musical (figure 3.28)) propose un moyen de création complètement nouveau. Le retour haptique est utilisé pour faire sentir les éléments d'un monde virtuel que l'on rencontre pendant l'exploration de celui-ci.

⁵CLARTE : <http://www.clarte.asso.fr/>



FIG. 3.27 – Le système dAb (BAXTER *et al.*, 2001)

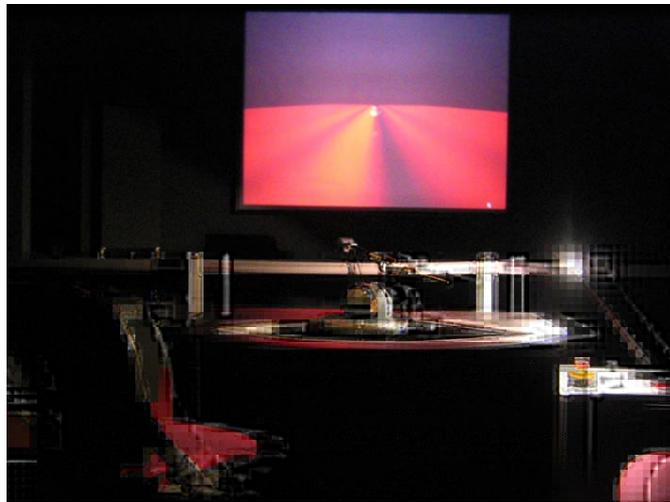


FIG. 3.28 – La Plate-forme PHASE (LAMBERT *et al.*, 2005)

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons parcouru quelques aspects de l'interaction homme-machine, en orientant notre discours vers le potentiel, les utilisations et les défauts, des interactions basées sur le mode haptique. Une dernière utilisation reste cependant à détailler : il s'agit de l'aide aux personnes non-voyantes, mais tout ceci sera étudié et défini dans le chapitre 5.

Pour le moment, nous avons vu que le retour haptique était une possibilité d'amélioration de l'immersion dans un monde virtuel, un outil d'entraînement, ou encore un nouveau moyen d'expression artistique.

Nous allons maintenant nous rappeler qu'à l'origine, le retour de force a été utilisé dans le but d'améliorer les performances motrices humaines dans les environnements virtuels et télé-robotiques (ROSENBERG, 1994; SHERIDAN, 1992). Aussi, nous allons étudier cet aspect sur un simple bureau virtuel, dans un schéma d'interaction WIMP, où l'action gestuelle principale, est le geste de pointage. En effet, sur les systèmes informatiques courant (Windows, Mac OS, Linux), la l'interaction est basée sur les mouvements de la souris et les cibles à cliquer (boutons, menus, fenêtres). Aussi, un des axes de recherches phare dans le domaine de l'IHM, consiste à essayer d'améliorer les gestes de pointages, c'est à dire, réduire le temps d'acquisition d'une cible à l'aide d'un dispositif de pointage.

CHAPITRE 4

Performances du retour de force sur le pointage

Sommaire

4.1	INTRODUCTION: AMÉLIORER LA VITESSE DE POINTAGE	63
4.2	TRAVAUX ANTÉRIEURS INTÉGRANT LE RETOUR D'EFFORT DANS UNE TÂCHE DE POINTAGE	65
4.3	PROTOCOLE DE TEST	67
4.3.1	SUJETS	67
4.3.2	MATÉRIEL	67
4.3.3	PROCÉDURE	68
4.4	RÉSULTATS ET DISCUSSION	70
4.5	CONCLUSION	73

4.1 Introduction : améliorer la vitesse de pointage

Du fait des interfaces WIMP (*Windows, Icons, Menu, Pointing Devices*), une grande partie de l'interaction avec les ordinateurs est actuellement effectuée à l'aide de la souris. La tâche typique est :

1. repérage de la cible
2. déplacement de la souris au dessus de la cible

3. clic sur la cible

La cible pouvant être une icône, un élément d'un menu, une partie d'une fenêtre.

Les moyens quantitatifs avec lesquels nous pouvons évaluer les performances motrices humaines lors d'une tâche d'acquisition de cible sont basés sur les recherches de Fitts (voir 2.3.2.1 page 15).

Pour rappel, la loi de Fitts énonce que le temps du mouvement MT requis pour sélectionner une cible de taille W situé à une distance A est : (FITTS, 1954)

$$MT = a + b \log_2(A/W + 1) \quad (4.1)$$

Le problème de l'amélioration du temps de pointage est un domaine de recherche actuellement très actif. On pourra se rapporter à (BALAKRISHNAN, 2004) pour une étude exhaustive des moyens employés pour diminuer ce temps. En considérant l'équation (4.2), réduire MT peut s'obtenir en diminuant la distance A , en augmentant la taille W , ou adaptant les deux en même temps.

Par exemple, pour diminuer la distance A , on peut utiliser des menus circulaire (*pie menus*). CALLAHAN *et al.* (1988) ont comparé ces menus aux traditionnels menus linéaires que l'on retrouve dans tous nos systèmes d'exploitation, et a observé une amélioration des temps de pointage de 15 à 20%. BAUDISCH *et al.* (2003) ont, quant à eux, proposé de diminuer temporairement cette distance, en étirant les icônes cibles vers le curseur de la souris (figure 4.1).

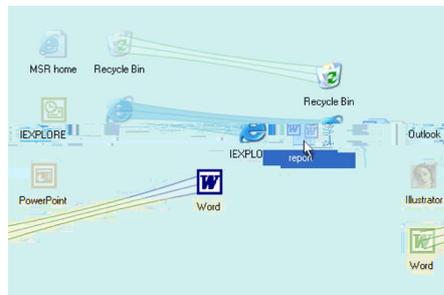


FIG. 4.1 – Diminution de la distance entre l'icône et ses cibles

Pour augmenter la taille de la cible W , il y a eu plusieurs façons de faire : WORDEN *et al.* (1997) ont proposé l'utilisation d'un « curseur-région » (figure 4.2), à l'inverse d'un curseur-point tel que nous utilisons en manipulant notre souris. Il y a aussi la possibilité de dilater la cible à l'approche du curseur (MCGUFFIN ET BALAKRISHNAN,

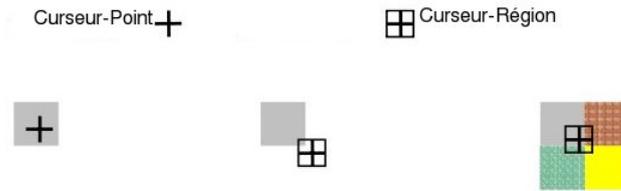


FIG. 4.2 – Les « curseurs-régions » de WORDEN *et al.* (1997) ; à gauche : la sélection avec un curseur-point a lieu lorsque l’intersection des deux segments est sur la cible ; au milieu : la sélection avec un curseur-région a lieu dès qu’une partie du curseur intersecte la cible ; à droite : lorsque plusieurs cibles se trouvent sous le curseur-région, c’est le comportement d’un curseur-point qui est utilisé

2002), à l’instar de ce qui se passe sur la barre d’application (le Dock) du système MacOSX d’Apple.

Enfin, BLANCH *et al.* (2004) ont joué sur l’adaptation du gain entre l’espace moteur et l’espace visuel (*Control-Display gain*). Ce gain augmente quand le curseur s’approche d’une cible, et diminue lorsqu’il s’en éloigne. Le curseur semble alors magnétisé par la cible : il est facile de l’atteindre, et difficile de la quitter. Pourtant, ils ont également noté qu’une telle technique perdait tout son intérêt en présence de distracteur(s) entre la position initiale du curseur et la cible à atteindre, chaque distracteur attirant le curseur.

Cette notion de distracteurs va revenir dans notre approche, comme nous allons le voir.

4.2 Travaux antérieurs intégrant le retour d’effort dans une tâche de pointage

Plusieurs études ont évalué l’utilisation de périphériques haptiques dans une tâche de pointage, en particulier pour interagir avec un bureau virtuel.

Dans un premier temps, cependant, nous citons les résultats obtenus dans le domaine de la simulation physique. Pour rappel, ce fut un des domaines précurseurs dans recherche sur l’interaction haptique (voir 3.5.1 page 45). Et dans ce contexte, l’apport du retour de force est flagrant en terme d’efficacité. Avec le retour de force, il est 30% plus rapide de placer une molécule correctement, et les trajectoires moléculaires sont 41% plus courtes (BROOKS *et al.*, 1990).

Retrouvons maintenant nos tâches de pointage dans un environnement virtuel...

En 1996, Akamatsu et MacKenzie (AKAMATSU ET MACKENZIE, 1996) ont étudié une souris tactile à retour de force. Ils ont montré des réductions significatives du temps de mouvement MT lorsque la modalité tactile est employée. L'effet est particulièrement prononcé pour les petites cibles. Cependant, ils ont également noté une augmentation du taux d'erreur. De plus, l'emploi de la modalité kinesthésique seule ne fait pas baisser significativement les temps d'acquisition d'une cible. Enfin, l'indice de performance IP lors de l'emploi du retour de force n'est pas significativement différent de celui observé sans retour de force.

Eberhardt (EBERHARDT *et al.*, 1997) et Hasser (HASSER ET GOLDENBERG, 1998) ont étudié, les effets de bassins d'attraction autour des cibles. Ces bassins amènent le pointeur de la souris au centre de la cible. Dans ces cas, les performances observées lors d'une tâche de pointage sont réellement meilleures (de l'ordre de 25%) que sans retour de force.

Pour Wall, l'étude s'est focalisé sur l'indice de performance IP (soit l'inverse de la pente de régression linéaire) au cours d'une tâche de pointage effectuée avec un PHANTOM (WALL ET HARWIN, 2000). En 2000, il a ainsi retrouvé les résultats de Akamatsu et MacKenzie, à savoir que le retour de force, bien qu'améliorant les temps d'acquisition des cibles, n'a pas d'effets sur l'indice de performance IP . Par contre, pour les mouvements « balistiques » ($IP < 3bits$), ils ont montré une amélioration significative de l'indice de performance de la tâche.

Enfin, Dennerlein a également étudié l'apport du retour de force. Dans une première étude (DENNERLEIN *et al.*, 2000) réalisé en 2000, c'est le suivi de courbes. Le retour de force prenait la forme d'une attraction du curseur sur la courbe grâce à une sorte de tunnel haptique. Il s'est avéré que les mouvements effectués avec un retour de force étaient 52% plus rapides que sans. Dans une deuxième étude, (DENNERLEIN ET YANG, 2001) se sont intéressés aux mouvements d'acquisition de cibles. Pour le retour de force, généré par une souris, c'est le concept de bassins d'attractions autour de la cible qui a été retenu. Les résultats sont similaires à ceux de Eberhardt et d'Hasser : une amélioration de 25% des performances est observée avec l'utilisation du retour de force. Il a également montré que cette différence s'amoindrissait lorsque d'autres bassins d'attraction haptiques étaient générés, en plus de celui généré par la cible. Enfin, son étude montrait que le confort perçu lors d'une tâche de pointage était meilleur avec un retour haptique.

En conclusion, il apparaît que le retour de force tend à améliorer les performances. Les temps d'acquisition d'une cible s'améliorent de 25% lorsque le champs de force agit au delà de la cible ; par contre, lorsque la force n'est déclenchée qu'au survol de la cible, les temps ne sont pas significativement différents. De plus, dans le cas de perturbations issues d'autres cibles potentielles qui génèrent leur propre retour de force, comme dans

le cas d'un bureau haptiquement augmenté (par exemple l'immersion haptic desktop (IMMERSION CORPORATION, 2005)), les performances baissent.

Nous allons maintenant étudier comment ces perturbations influent sur les performances, dans le cas d'un retour de force restreint à la cible, et avec un espace de travail entièrement rempli de distracteurs haptique (cas qui pourrait se retrouver avec le bureau visible sur la figure 4.3).



FIG. 4.3 – Voici le bureau encombré de Benoit...

4.3 Protocole de test

4.3.1 Sujets

Neuf sujets volontaires (8 hommes et 1 femme, âgés de 21 ans à 40 ans) ont participé au test. Tous les sujets sont familiers avec l'utilisation d'une souris ; deux d'entre eux avait déjà utilisé une souris à retour de force.

4.3.2 Matériel

Nous utilisons la souris à retour de force « Wingman Force Feedback Mouse » (Figure 3.20 page 50) conçue par Immersion Corporation (IMMERSION CORPORATION, 2005) et commercialisée par Logitech.

La manipulation d'un périphérique de pointage à retour de force, comme notre souris, est basée sur la perception kinesthésique du bras, de la main et des doigts. La perception cutanée n'est que peu stimulée dans cette interaction. En d'autres mots, ici, il ne s'agit pas de ressentir une texture.

L'ordinateur utilisé est un PC 1GHz. Les données ont été collectées par le serveur (Apache 2 tournant sur un PC à 733 Mhz) sous forme de feuilles de calcul. Les sujets sont accompagnés par un expérimentateur durant toute la durée du test.

4.3.3 Procédure

Pendant l'expérience, chaque sujet doit aller cliquer sur un petit rond en haut à droite de l'écran : l'origine. Une fois le clic effectué sur l'origine, une cible hexagonale apparaît à l'écran. Il lui faut aller cliquer le plus vite possible sur cette cible. Le sujet peut préparer son geste aussi longtemps qu'il le souhaite, tant que le curseur de la souris ne quitte pas l'origine. Quand il a cliqué sur la cible, celle-ci disparaît et il doit retourner à l'origine afin de générer une nouvelle cible.

L'ensemble de l'expérience est divisée en 4 phases, correspondant à 4 conditions de retour haptique :

- condition MT : aucun retour de force.
- condition MTF : un champs de force se déclenche quand le curseur de la souris passe au dessus de la cible. À ce moment, la souris est attirée au centre de la cible.
- condition MTDF : l'ensemble de l'écran est une mosaïque hexagonale. Lorsqu'il est survolé par le curseur, chaque hexagone déclenche un champs de force attirant le périphérique en son centre.
- condition MTDFH : même chose que la condition MTDF, mais l'intensité du retour de force dépend de la vitesse de la souris selon la loi

$$Intensité = \frac{Intensité_{max}}{vitesse + 1}$$

L'intensité sera ainsi plus faible lorsque la vitesse de la souris est élevée (voir figure 4.4).

Avant chaque phase chronométrée, une phase d'entraînement permet au sujet de s'habituer à manipuler le périphérique dans les différentes conditions.

Il y a 10 cibles différentes. Chacune est présentée 4 fois au sujet par phase. Ainsi, chaque sujet aura 160 mouvements origine-cible à réaliser pour un ensemble de 1440 mouvements pour l'ensemble des sujets.

Les paramètres de l'expérience sont résumés dans la table 4.1.

Ces conditions forment un ensemble homogène de tâches de pointage. Dans ce protocole de test, nous utilisons la formulation de « l'indice de difficulté de la tâche » proposée par MacKenzie (MACKENZIE, 1992) :

$$ID = \log_2(A/W + 1) \tag{4.2}$$

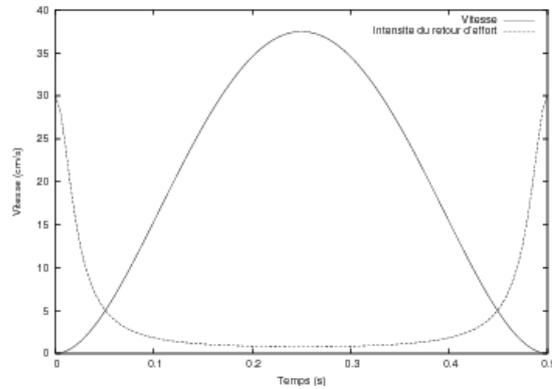


FIG. 4.4 – Dans la condition MTDHFH, l'intensité du retour de force dépend de la vitesse du pointeur. Dans le cas idéal d'une trajectoire minimisant le jerk (voir 2.3.2.4 page 19), on aurait le résultat ci-dessus.

DISTANCES À LA CIBLE	21, 72, 92, 138, 205, 233 415, 586, 831, 938 pixels
TAILLE DE LA CIBLE	40 pixels
CONDITIONS EXPERIMENTALES	- MT : sans retour de force, - MTF : retour de force sur la cible, - MTDHF : retour de force sur le damier, - MTDHFH : retour de force adaptatif sur le damier

TAB. 4.1 – paramètres de l'expérience.

où A est la distance à la cible, et W la taille de la cible (en l'occurrence sa largeur). En utilisant l'équation 4.2, nous obtenons des indices de difficultés compris entre :

$$ID_{min} = \log_2 \left(\frac{21}{40} + 1 \right) = 0.61bits$$

et

$$ID = \log_2 \left(\frac{938}{40} + 1 \right) = 4.61bits$$

Au final, l'interface de l'expérimentation est présentée sur la figure 4.5. (nous noterons que le choix de l'interface provient de nos recherches sur la représentation instantanée de la musique, voir la section 6.4 page 121)

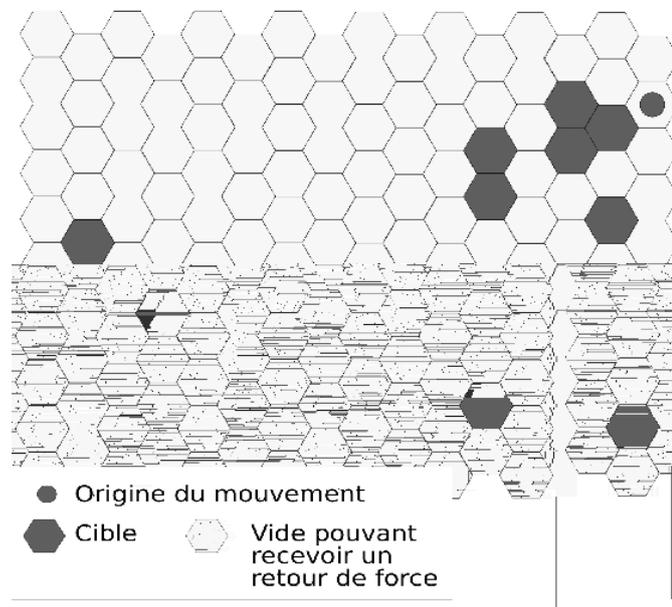


FIG. 4.5 – Origine et cibles du protocole

4.4 Résultats et discussion

L'analyse de la variance (ANOVA) sur les temps de pointage, permet de nous prononcer sur la significativité des facteurs jouant sur nos mesures : les différentes conditions expérimentales et l'indice de difficulté. Il apparaît que le facteur « conditions expérimentales » est très significatif ($F_{9,39} = 24.96, p < 0.0001$), ainsi que le facteur

CHAPITRE 4. PERFORMANCES DU RETOUR DE FORCE SUR LE POINTAGE

« indice de difficulté » ($F_{3,39} = 10.3$, $p < 0.0001$). De plus, les deux facteurs n'influent pas l'un sur l'autre ($F_{27,39} = 0.35$, $p = 1.0000$).

Les moyennes des temps pour les 4 conditions de retour haptique sont dans le tableau 4.2.

MT	MTF	MTDF	MTDFH
585 ms	584 ms	723 ms	676 ms
-	(-0, 2%)	(+23, 6%)	(+15, 6%)

TAB. 4.2 – Moyennes des temps des mouvements dans les 4 conditions ; les pourcentages donnent l'écart par rapport à la condition MT

Nous pouvons déjà observer qu'il n'y a pas de différence significative entre cliquer sur une cible sans retour de force (MT) et avec retour de force (MTF). Ceci rejoint les observations de Akamatsu (AKAMATSU ET MACKENZIE, 1996) et s'explique par le fait que le retour de force sur la cible n'est activé que lorsque le pointeur s'y trouve, à la différence d'autres expériences qui élargissaient le bassin d'attraction au delà de la taille de la cible (HASSER ET GOLDENBERG, 1998; EBERHARDT *et al.*, 1997; WALL ET HARWIN, 2000). Par contre, le fait qu'il y ait des champs de force entre l'origine et la cible (MTDF et MTDFH) génère une hausse significative des temps (respectivement +23,6% et +15,6% par rapport au mouvement sans retour de force). Enfin, l'adaptation du retour de force sur la vitesse du curseur permet de réduire cette perte de performance de 6,5% .

Nous aurions pu espérer une amélioration plus nette des temps de pointage dans la condition MTDFH. Cependant, le modèle d'impulsion initiale optimisée de Meyer (voir page 21) nous apporte une explication possible : Le geste le plus fréquent lors d'une tâche d'acquisition de cible consiste en un premier mouvement initial qui peut dépasser ou ne pas atteindre la cible, suivi de plus petits mouvements correctifs pour parvenir réellement sur la cible. Avec notre retour de force adaptatif, le geste de pointage pouvait se retrouver « emprisonné » sur une zone proche de la cible.

Les régressions linéaires sur les moyennes des données nous donnent les coefficients de régression linéaire de l'équation (2.3) pour les différentes conditions de retour haptique. Ainsi, la table 4.3 présente les différents modèles de la loi de Fitts selon ces conditions. Chaque modèle a été calculé en effectuant une régression linéaire entre les 10 indices de difficulté (ID), calculé en utilisant l'équation 4.2, et les temps observés.

Les différentes conditions ne diffèrent de manière significative que de par leurs ordonnées à l'origine. Les pentes de chaque modèle sont très proches. Enfin, nous pouvons noter, grâce aux valeurs élevées des R^2 que la loi de Fitts explique plus de 90% des variations dans les observations.

Conditions	Modèle de la loi de Fitts	R^2
MT	$MT = 0,25 + 0,122ID$	0,93
MTF	$MT = 0,25 + 0,120ID$	0,91
MTDF	$MT = 0,38 + 0,123ID$	0,96
MTDFH	$MT = 0,31 + 0,130ID$	0,90

TAB. 4.3 – Modèles de la loi de Fitts. MT est le temps du mouvement(ms), ID est l'indice de difficulté(bits)

Nous pouvons maintenant tracer la synthèse des mesures de notre expérience (figure 4.6).

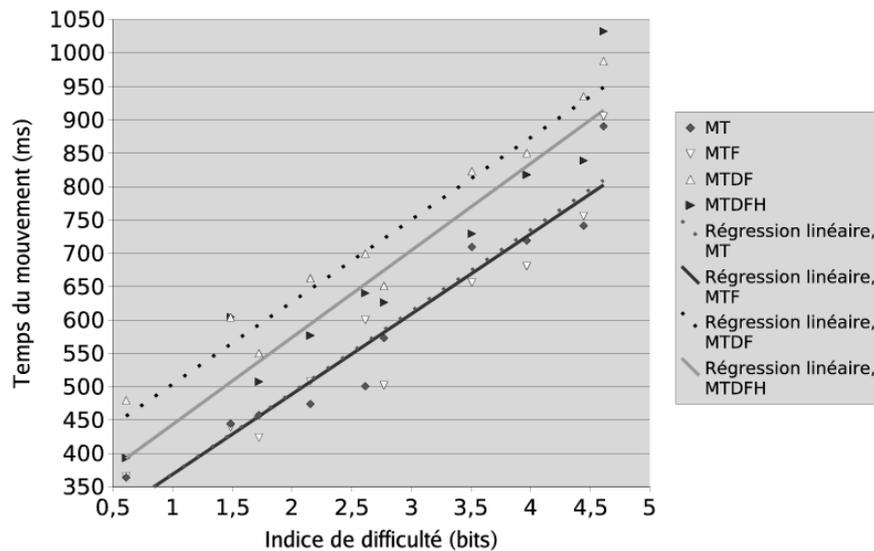


FIG. 4.6 – Temps du mouvement pour les 4 conditions de retour haptique

La méthode statistique de Bonferroni permet de grouper les observations en groupes significativement différents. Dans notre cas, cette méthode regroupe les observations MT et MTF en un premier groupe non-significativement différent, et les conditions MTDF et MTDFH en un deuxième. Notre proposition d'adapter le retour haptique à la vitesse de la souris (condition MTDFH) n'apparaît donc pas significativement différent de la condition sans adaptation ($p > 0.15$).

4.5 Conclusion

Il est donc apparu que le retour de force pouvait améliorer les performances, mais dans des cas peu applicables à des situations complexes : une seule cible haptiquement augmentée. Dans le cas d'une multiplication des cibles potentielles, le retour haptique devient même un facteur de perte de performances. Dans notre cas, les temps de pointage ont augmenté de 23% lorsque l'écran est compétement rempli de distracteurs haptiques.

Nous avons proposé ici un retour de force adaptatif, calculé en fonction de la vitesse courante du pointeur. Les performances s'améliorent alors de 6,5%.

Pour aller plus loin, nous pouvons imaginer tester d'autres adaptation dynamiques des forces, basées sur l'accélération du curseur, par exemple. De plus, nous pourrions tester des zones d'attrance englobant plusieurs cibles, et ce, de manière à éviter au curseur de « tomber » dans une mauvaise cible.

Notons que dans un contexte d'accessibilité, l'intérêt de l'utilisation de dispositifs à retour de force a déjà été prouvé, par exemple auprès de personnes handicapés moteurs KEATES *et al.* (2002).

Au final, cette étude nous a permis d'étudier la partie « action » du mode haptique, et plus précisément les gestes **déictiques** MCNEILL (1992) (voir 2.3.3 page 22). Dans tout ce chapitre, en effet, il s'agissait d'utiliser une souris à retour de force dans un registre classique pour une souris : le pointage. Le retour de force essayant d'améliorer la vitesse de pointage.

Dans la seconde partie de cette thèse, nous allons passer aux gestes **épistémiques** de CADOZ (1994), c'est à dire aux gestes effectués pour prendre des connaissance du monde extérieur. Ce sont ces gestes, et leurs retours de forces associés, qui vont nous permettre d'envisager une utilisation de la modalité haptique, dans un but d'accessibilité des personnes non-voyantes aux documents numériques.

Deuxième partie

Haptique et Accessibilité

CHAPITRE 5

Vers l'accessibilité

Sommaire

5.1	INTRODUCTION	78
5.2	L'INTERACTION NON-VISUELLE	78
5.2.1	DÉFINITIONS DU HANDICAP	78
5.2.2	LES CAPACITÉS SENSORIELLES CHEZ LES NON-VOYANTS	80
5.2.3	LA REPRÉSENTATION MENTALE D'UN DOCUMENT PAR UNE PERSONNE NON-VOYANTE	80
5.2.4	MODALITÉS NON-VISUELLES DISPONIBLES EN SORTIE	81
5.2.5	UTILISATION ET JUSTIFICATION DE LA MULTIMODALITÉ	81
5.3	L'ACCESSIBILITÉ : DÉFINITIONS	83
5.3.1	L'ACCESSIBILITÉ PAR TIM BERNERS-LEE, DIRECTEUR DU W3C ET INVENTEUR DU WORLD WIDE WEB	83
5.3.2	L'ACCESSIBILITÉ PAR DENIS CHÊNE, FRANCE-TÉLÉCOM R&D	83
5.3.3	LA <i>Web Accessibility Initiative</i> (WAI) DU <i>World Wide Web Consortium</i> (W3C)	84
5.3.4	AUTRES ASPECTS DE L'ACCESSIBILITÉ	85
5.3.5	ACCESSIBILITÉ: NOTRE POSITIONNEMENT	85
5.4	L'ACCESSIBILITÉ DES PERSONNES NON-VOYANTES ET MAL- VOYANTES GRÂCE À UN DISPOSITIF À RETOUR HAPTIQUE	85

5.4.1	IDENTIFIER LE CONTENU ET L'AGENCEMENT D'UN DOCUMENT	86
5.4.2	TOUCHER UN DOCUMENT GRAPHIQUE	86
5.4.3	PERMETTRE D'APPRÉHENDER LES FORMES ET LES TEXTURES	88
5.4.4	INTERFACE GRAPHIQUE HAPTIQUEMENT AUGMENTÉE	89
5.4.5	L'ACCESSIBILITÉ À L'INTERNET, VIA LE MODE HAPTIQUE	90
5.4.6	L'ACCESSIBILITÉ DANS LE MONDE RÉEL : HOMERE	90
5.5	RECOMMANDATIONS DE CONCEPTIONS	91
5.6	CONCLUSION	92

5.1 Introduction

Avec les interfaces graphiques à manipulation directe (GUIs), l'utilisateur interagit avec l'ordinateur à l'aide d'un écran, d'un dispositif de pointage - en général une souris - et d'un clavier. Ces interfaces sont dites faciles à apprendre et à utiliser, grâce à une spatialisation de l'information qui réduit la charge cognitive de l'utilisateur. Toutefois, ce schéma d'interaction est incomplet : il exclut les utilisateurs non-voyants.

CHRISTOPHE RAMSTEIN, ISEA 1995

Dans ce chapitre, nous allons tâcher de synthétiser ce que la littérature nous indique quant à l'accès des non-voyants aux systèmes interactifs, tout d'abord dans un cadre général ; puis dans un contexte d'utilisation du système haptique.

5.2 L'interaction non-visuelle

5.2.1 Définitions du handicap

La déclaration des droits des personnes handicapées proclamée par l'assemblée générale de l'Organisation des Nations Unies le 9 décembre 1975 indique que « toute personne dans l'incapacité d'assurer par elle-même tout ou partie des nécessités d'une vie individuelle ou sociale normale, du fait d'une déficience, congénitale ou non, de ses capacités physiques ou mentales » est une personne handicapée.

En 1980, l'organisation Mondiale de la Santé O.M.S. (1980), dans le rapport du rhumatologue britannique, Philip WOOD, introduit une clarification conceptuelle dans

la définition du handicap, reprise en France sous le titre de " Classification internationale des handicaps (CIH) : déficiences, incapacités, désavantages. Il y est défini le handicap comme la conséquence des maladies sur la personne suivant trois plans :

- **la déficience**, correspondant à l'altération d'une structure ou d'une fonction psychologique, physiologique ou anatomique. La déficience peut-être temporaire ou définitive ;
- **l'incapacité**, qui est une réduction partielle ou totale de la capacité d'accomplir de façon normale une activité. L'incapacité est en quelque sorte la conséquence fonctionnelle de la déficience mais elle ne dépend pas obligatoirement de celle-ci. D'autre part, une déficience peut très bien ne s'accompagner d'aucune incapacité ;
- **le désavantage ou le handicap**, conséquence de la déficience ou de l'incapacité sur les conditions d'insertion sociale, scolaire ou professionnelle.

Dans l'union européenne, c'est près d'un tiers de la population qui souffre de troubles divers (voir le tableau 5.2).

Type de troubles	Estimation (en millions)	% des personnes handicapées	% de la population
Physique	24.80	68%	7.7%
Visuel	6.50	15.80%	2%
Auditif	8.70	23.90%	2.7%
Mental	7.40	20.30%	2.3%
Communication verbal	3.60	10%	1.1%

TAB. 5.2 – Population souffrant de troubles dans les états membres de l'Union Européenne (adapté de [TIDE 96]).

Le tableau 5.4 montre les statistiques sur les populations mal-voyantes et non-voyantes. En France, sur 18000 aveugles en âge de travailler, environ 6000 travaillent, dont 1500 manuels (les 2/3 en secteur protégé), 1500 standardistes, 1300 masseurs kinésithérapeutes, 600 enseignants (en milieu spécialisé ou ordinaire), 400 sténodactylos, 300 musiciens professionnels, 300 divers (juristes, cadres de la fonction publique, informaticiens) ; plus de 50% ne peuvent trouver du travail. [Quid 2005]

Enfin, la France a voté le 12 février 2005 la loi n°102-2005 pour l'égalité des droits et des chances, la participation et la citoyenneté des personnes handicapées, dont l'article 47 rend obligatoire l'accessibilité des sites Web du secteur public.

	Troubles Visuels	Aveugles + mal-voyants
Monde (OMS février 2000)	160 000 000	45 000 000
France (1997)	1 500 000	110 000 + 250 000
% de la population française	2.6%	

TAB. 5.4 – Populations non et mal-voyantes en France et dans le monde

5.2.2 Les capacités sensorielles chez les non-voyants

GRANT *et al.* (2000) ont conduit une étude sur des personnes non-voyantes et voyantes. Il s'agissait d'apprécier la précision de la perception tactile des deux populations, et établir un éventuel lien entre le handicap et les capacités sensorielles. En fin de compte, cette étude a prouvé que les non-voyants obtenaient de meilleurs résultats que les voyants au début des tests, mais que cet avantage diminuait au fur et à mesure, jusqu'à disparaître.

En fait, il a été souvent dit que les aveugles développaient des capacités sensorielles supra-normales, telles que l'acuité auditive, ou somesthésique. Dans la pratique, cependant, il a été prouvé que l'acuité haptique (HELLER, 1989) était équivalente chez les non-voyants congénitaux, chez les non-voyants accidentels et chez les personnes voyantes.

5.2.3 La représentation mentale d'un document par une personne non-voyante

Une personne aveugle se sert énormément de sa mémoire et relativement peu de ses sens, alors que l'activité d'une personne voyante est essentiellement basée sur la vue et la coordination oeil-main.

Pourtant, les travaux de HATWELL (1993) et de MARTIAL (1998) ont montré que la représentation mentale des non-voyants est identique à celle des voyants. En effet, même si l'on parle habituellement de mémoire visuelle, lorsque l'on considère la représentation mentale de quelque chose, tout est basé sur l'expérience de l'espace. En d'autres mots, pour se construire une représentation mentale de ce qui leur est décrit, une personne aveugle s'appuiera sur les notions qu'il a de l'espace : en haut, à droite, à l'est, derrière.

Dans une autre expérience, (MANGHI, 2001) a demandé à ses sujets (l'étude portait sur des voyants et des non-voyants, et explorait également les effets de l'âge) de décrire un trajet dans une ville à quelqu'un. Les résultats se sont révélés très intéressants :

1. Les personnes non-voyantes ont obtenu des résultats équivalents quant au taux de réussite de la tâche,
2. Leurs descriptions d'itinéraires ont été surtout jugées plus pertinentes, avec notamment l'utilisation
 - de repères absolus (le nord, le banc sur le trottoir...)
 - de précisions dans les mesures (angles, distances),
 - de repères multimodaux (le carrefour, le marteau-piqueur...)

Il y a cependant, entre un voyant et un non-voyant, une différence très importante, lors de l'accès aux documents textuels : le non voyant ne peut pas se faire une idée globale de la forme du texte. Inversement, lors d'une tâche de lecture, une personne voyante peut parcourir l'ensemble du document très rapidement, et par exemple, repérer rapidement l'item qui l'intéresse.

Pour se faire une idée assez rapide du texte avant la lecture, les non-voyants utilisent une synthèse vocale réglée sur un débit rapide. Cependant, la mémoire auditive demande une grande concentration. Ainsi, l'utilisation d'une autre modalité, comme le toucher, peut permettre de réduire la charge mentale.

En conclusion, un non-voyant se construit une image mentale identique en tout point à celle d'une personne voyante. Cependant, la construction d'une telle représentation mentale nécessite une description de la disposition globale, ou des mécanismes de navigation dans le document. Enfin, on pourra s'appuyer sur une grande précision dans les descriptions.

5.2.4 Modalités non-visuelles disponibles en sortie

Contrairement à ceux de l'être humain, les médias non visuels en sortie restent limités (tableau 5.5). Les systèmes basés sur les sens de l'odorat et du goût restent très rares. Maintenant, les périphériques de pointage à retour d'effort se démocratisent de plus en plus (voir 3.5.2 page 46).

5.2.5 Utilisation et justification de la multimodalité

DUFRESNE *et al.* (1995) ont montré l'impact et l'intérêt de la bimodalité audio-haptique pour les utilisateurs non-voyants. Le tableau 5.6 indique le pourcentage de bonnes réponses dans trois situations modales ; pour 12 voyants et 12 non-voyants. Il est à noter que dans cette expérience, les sujets non-voyants ont obtenus de meilleurs scores : leur concentration était supérieure.

Sens perceptifs humain	Médias informatiques	Stimuli	Récepteurs
Ouïe	Haut-parleurs, casque audio	Parole, bruit, son	Oreilles
Haptique	Afficheur braille, sondes chauffantes, système à retour de force	Texture, température, mouvement	Peau, Muscles, tendons, corps
Odorat	?	Odeurs	Nez
Goût	?	Saveur	Langue

TAB. 5.5 – Sens perceptifs humain et médias informatiques (adapté de (TRUILLET, 1999))

Modalité	Testeurs non-voyants : 12	Testeurs voyants : 12	Total : 24
Audio	68%	62%	64%
Haptique	78%	71%	74%
Audio + haptique	83%	78%	80%
Total	76%	70%	73%

TAB. 5.6 – Bonnes réponses dans différentes situations modales

5.3 L'accessibilité : définitions

The power of the Web is in its universality. Access by everyone regardless of disability is an essential aspect.

TIM BERNERS-LEE, Inventeur du Word Wide Web

5.3.1 L'accessibilité par Tim Berners-Lee, directeur du W3C et inventeur du World Wide Web

Mettre le Web et ses services à la disposition de tous les individus, quel que soit leur matériel ou logiciel, leur infrastructure réseau, leur langue maternelle, leur culture, leur localisation géographique, ou leurs aptitudes physiques ou mentales.

L'accès à l'information et à la communication est un droit universel. Le web est devenu un média majeur, et il se doit d'être accessible à tous sans discrimination. Concevoir dans le cadre du « design for all » (conception pour tous), c'est anticiper sur les usages, répondre à une logique de développement durable et surtout, utiliser la technologie dans le respect des individualités.

5.3.2 L'accessibilité par Denis Chêne, France-Télécom R&D

« Être accessible » c'est avant tout permettre l'accès. L'accès aux informations (documents, nouvelles, bases de données) ; l'accès aux échanges, qu'il s'agisse des échanges en terme de communication (audio, vidéo, texte...) ou des échanges de biens de consommation (achats divers, gestion monétaire...). Mais, « être accessible » c'est aussi permettre l'utilisation, car rien ne sert d'accéder si l'on ne peut utiliser. « Consulter », c'est bien, mais « faire », c'est mieux.

La richesse du numérique, c'est sa malléabilité. La malléabilité permet en effet de reformuler les données échangées de façon à correspondre à chaque type d'utilisateur et de situations. Il existe en effet de nombreux types d'utilisateurs différents, qui accèdent à l'information de façons diverses, selon des contextes variés (absence de visibilité, d'audition, de motricité, de compréhension). Rendre l'information et les échanges accessibles, c'est optimiser, pour chaque individu, pour chaque contexte d'usage, l'acquisition, la production, et la manipulation d'informations et d'éléments pouvant être atteints sur ou via le web.

La richesse du web c'est son gigantisme. D'aucun diront qu'il est impossible, sur une telle masse, de gérer toutes les individualités et tous les contextes, et que 'faire du spécifique' est coûteux et peu rentable. Certes, mais l'objet n'est justement pas de faire du spécifique, mais du générique qui puisse servir à tous, sans exception. Ce faisant, l'accessibilité est moins coûteuse : l'araignée gagnera à tisser une toile solide plutôt qu'une toile fragile aux nombreuses rustines ; et plus rentable : davantage d'utilisateurs pourront y accéder dans plus de contextes d'usages.

Au final, l'accessibilité résulte d'une « conception pour tous ». Or, la richesse de l'être humain, c'est sa diversité.

5.3.3 La *Web Accessibility Initiative* (WAI) du *World Wide Web Consortium* (W3C)

Le *World Wide Web Consortium*, abrégé W3C¹, est un consortium fondé en octobre 1994 pour promouvoir la compatibilité des technologies du *World Wide Web* telles que HTML, XHTML, XML, CSS, PNG, SVG et SOAP. Le W3C n'émet pas des normes, mais des recommandations.

Le consortium laisse le soin aux fabricants de suivre les recommandations. Contrairement à l'Organisation internationale de normalisation ou d'autres corps internationaux de standardisation, le W3C ne possède pas de programme de certification, et beaucoup de standards ne définissent pas formellement un niveau de conformité. Ils sont ainsi souvent implantés partiellement.

Concernant l'accessibilité, le W3C a créé des recommandations à travers le projet WAI (*Web Accessibility Initiative*) en 1996. Ces recommandations s'adressent à tous les distributeurs de contenu numérique par Internet : navigateurs, documents HTML, logiciels d'édition de HTML, logiciel de publication de site Web créant le code HTML.

Les recommandations de la WAI actuellement en vigueur sont :

- les *Authoring Tool Accessibility Guidelines* (ATAG) qui posent les règles d'accessibilité pour les outils d'édition.
- les *Web Content Accessibility Guidelines* (WCAG) qui montrent comment créer des documents Web avec un contenu accessible aux utilisateurs souffrant de handicaps.
- les *User Agent Accessibility Guidelines* (UAAG), enfin, posent les règles pour l'accessibilité des agents utilisateurs.

On pourra se référer aux annexes, page 162, pour plus de détails.

¹W3C : <http://www.w3.org>

5.3.4 Autres aspects de l'accessibilité

« L'accessibilité n'est pas une fonctionnalité, mais bien un processus (une méthode) que l'on intègre tout au long du cycle de vie d'un projet. »

Pierre Guillou (responsable de la cellule accessibilité de l'association BrailleNet)

5.3.5 Accessibilité : notre positionnement

Nous nous positionnons pour une accessibilité au sens large. Il s'agit d'une approche visant à étendre la démarche d'accessibilité au delà d'un public spécifique. En employant l'illustration du « qui peut le plus peut le moins », concevoir un site Web accessible pour une personne non-voyante, rendra ce site Web plus simple d'usage pour l'ensemble des utilisateurs. La problématique de cette thèse traite de l'utilisation de dispositifs à retour de force en matière d'accessibilité, à priori pour les personnes souffrant d'handicap visuel ; maintenant, quand nous proposerons des solutions techniques utilisables spécifiquement par des personnes handicapées, les concepts utilisés, et les solutions techniques retenus peuvent (et doivent) être reprises dans des contextes plus larges ; dans des situations où le sens de la vue serait mobilisé sur une autre tâche, par exemple.

Nous allons cependant passer en revue ce qui a déjà été réalisé spécifiquement pour des personnes souffrant d'un handicap visuel, en matière d'accessibilité, et mettant en œuvre des dispositifs haptiques. Nous retiendrons que ces approches peuvent être reprises sans public spécifique, avec une interaction augmentée par le sens haptique.

5.4 L'accessibilité des personnes non-voyantes et mal-voyantes grâce à un dispositif à retour haptique

L'idée de base de l'utilisation de périphériques à retour haptique pour des utilisateurs non-voyants, est de palier, autant que raisonnablement possible, à l'absence de canal visuel. Dans cette approche, plusieurs contextes d'utilisation ont été explorés.

Nous allons les étudier plus précisément, afin de dégager des pistes pour notre propre approche.

5.4.1 Identifier le contenu et l'agencement d'un document

D. Offen et B. Thomlinson ont développé une librairie de programmation permettant d'identifier l'agencement d'un document (OFFEN ET THOMLINSON, 2001). L'OPENBook (c'est le nom de la librairie) est ainsi capable d'identifier les colonnes, les titres, les blocs de texte, les illustrations, les légendes, les tableaux, les entêtes et les pieds de pages. Un synthétiseur vocal permet de lire le contenu du document. Le périphérique utilisé est la souris Wingman Force Feedback de Logitech. L'utilisateur pourra alors accéder à l'information de plusieurs manières :

1. Le mode « Page Layout Summary » (pour *résumé de la disposition de la page*) rapportera le nombre d'éléments de chaque type visibles sur la page. Par exemple « 1 titre, 2 colonnes, 1 illustration ».
2. Le mode « Guided Layout » (pour *disposition guidée*), l'utilisateur sera passif, et se laissera guider (ainsi que sa main avec la souris à retour de force) dans un ordre logique dans la lecture du document. Le synthétiseur vocal annonçant le nom de chaque élément.
3. Avec le mode « Explore Layout » (pour *disposition explorée*), l'utilisateur est actif, et contrôle le mouvement d'un élément à un autre, en entendant la synthèse pc8Td[(pc4458T4.re)-384(Layout)]TJ/F5911.9552Tf80.9T4.ani

Les laboratoires de British-Telecom ont étudié l'utilisation d'un affichage haptique couplé au VRML (Virtual Reality Markup Language), le format pour l'affichage des graphiques 3D sur le Web (HARDWICK *et al.*, 1998). Le travail est basé sur une expérience acquise du développement d'un navigateur capable de piloter un retour de force à partir d'un fichier VRML. On retrouve ici l'approche de la bibliothèque de programmation Ghost™SDK de Sensable : le dispositif de pointage remplace le doigt de l'utilisateur dans l'espace virtuel, et permet de toucher les objets.

Dans ces trois premières approches, il s'agit de découvrir un objet tridimensionnel à l'aide d'un dispositif de pointage à retour de force. On retrouve ainsi les limitations suivantes issues du tableau 3.3 page 54) :

L'enveloppement	Non possible en l'absence de plusieurs points de contact
Le suivi de contours	Possible, mais très difficile du fait d'une zone de contact

J. A. Gardner et V. Bulatov (GARDNER ET BULATOV, 2001) se sont appuyés sur le format SVG (Scalable Vector Graphics) qui est le format XML pour les images vectorielles. Associé à une souris à retour de force et à un retour sonore, des images peuvent être rendue accessibles, tant qu'elles ne sont pas trop complexes aux non-voyants. Il s'agissait par exemple de localiser les positions des différentes régions sur une carte géographique, grâce au rendu d'une texture particulière et d'un retour sonore, quand le pointeur de la souris passe au centre d'une chaque région. Cette approche est très similaire à ce que nous avons réalisé, voir la section 6.3.2.

Wai Yu, de l'université de Glasgow a beaucoup étudié l'utilisation d'une souris à retour de force ou du PHANTOM dans les problèmes d'accessibilité. Il a proposé tout d'abord une méthode permettant aux non-voyants d'accéder à des graphiques mathématiques à l'aide du PHANTOM (YU *et al.*, 2001). La figure 5.1 est issue de cette application : lorsqu'il passe à proximité d'un des segments, le pointeur du dispositif est attiré sur lui.

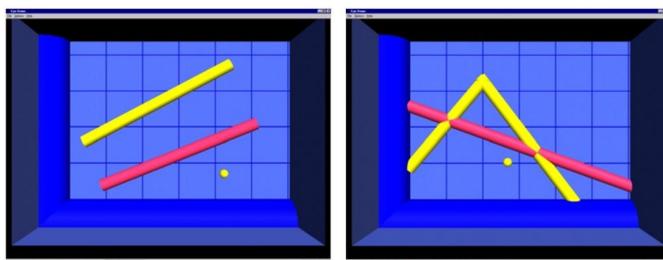


FIG. 5.1 – Exemples de graphiques haptiquement augmentés

Plus tard, il a continué son travail en proposant cette même accessibilité dans un contexte Web : l'application tourne dans un navigateur internet et utilise la souris Wingman Force Feedback. Pour cela il a exploré la construction automatique de graphiques haptiques YU *et al.* (2002), puis, il a donné à l'utilisateur non-voyant, la possibilité de créer ses propres graphiques (YU *et al.*, 2003).

Enfin, SJÖSTRÖM (2002) a également étudié le rendu de graphiques mathématiques, mais uniquement à l'aide d'un PHANTOM. Son approche cherche à être plus proche d'une réelle situation pédagogique. On peut citer les histogrammes haptiques, obtenus par effet de cloisonnement, ou les courbes « mathém'haptiques », qui comme pour Wai Yu, sont issues d'un effet d'attraction sur la courbe.

5.4.3 Permettre d'appréhender les formes et les textures

FRITZ ET BARNER (1996) ont développé une méthode synthétisant des textures haptiques perceptiblement distinctes en utilisant des techniques de modélisation stochastiques. Leur but était de créer un ensemble de textures qui pourraient alors être utilisées pour décrire des illustrations complexes de données.

Dans ces travaux, les périphériques utilisés sont des PHANTOMS (voir 8.3 page 162) ou l'Impulse Engine 3000 (figure 5.2). En effet, pour générer des textures probantes, il est nécessaire d'utiliser du matériel disposant d'une résolution spatiale très fine : 0.03mm et 0.01mm respectivement pour le PHANTOM et l'Impulse Engine 3000.

COLWELL (1998) a étudié la perception des textures, des formes et des objets virtuels par des sujets voyants et non-voyants à l'aide de l'Impulse Engine 3000 (figure 5.2). Ces travaux font partie des grandes références du domaine (voir page 91).



FIG. 5.2 – L'impulse engine 3000

Enfin, SJÖSTRÖM (2001) a étudié la perception de textures issues du monde réel. Les travaux précédents utilisaient des méthodes stochastiques pour générer leurs textures. Sjöström s'est inspiré de la technique du Bump-Mapping pour générer ses textures.

Au final, toutes ces études soulignent le fort potentiel de l'utilisation de textures dans les systèmes interactifs, du fait de bonnes capacités psychophysiques pour discriminer deux textures différentes.

5.4.4 Interface graphique haptiquement augmentée

C'est la piste qu'ont suivis Dufresne (DUFRESNE *et al.*, 1995), Ramstein (RAMSTEIN, 1996), O'Modhain et Guillepsie (SILE O'MODHRAIN ET GUILLEPSIE, 1996) et Rosenberg (ROSENBERG, 1997).

Il s'agit d'opérer une traduction de ce qui apparaît à l'écran en effets haptiques via un périphérique adapté. Les périphériques utilisés sont du type souris. Quelques exemples d'effets proposés par le FEELiT DeskTop d'Immersion Corporation, par The Moose de Guillepsie ou le Multimodal User Interface System de Ramstein :

- Le passage du pointeur de la souris au-dessus d'une icône ou d'un item d'un menu déroulant provoque un choc dans la main de l'utilisateur ou encore un effet magnétique est ressenti. Guillepsie a utilisé la notion d'hapticon.
- Le glisser-déposer trouve sa métaphore enrichie : on a réellement l'impression de porter quelque chose avec sa souris, puisque qu'elle semble avoir beaucoup d'inertie lorsque l'on porte un document. Le raffinement peut même aller jusqu'à rendre l'inertie du périphérique maniant du pointeur, proportionnelle à la taille (en Mo) du dossier/fichier déplacé.
- Les bords des fenêtres deviennent « apparents » (toujours haptiquement), avec des notions d'intérieur et d'extérieur.

Cette approche permet de rajouter le retour haptique en tant que modalité parallèle et redondante à celles déjà utilisées : le retour visuel tout d'abord, et le retour sonore ensuite dans le cadre d'une utilisation par des non-voyants. Cependant, l'approche consistant à prendre comme base l'interface graphique pour la traduire en retour haptique, bien qu'étant la plus intuitive, reste bridée. En effet, l'interface graphique n'a été conçue ni pour une utilisation par des non-voyants, ni pour être traduite en effets de force. Les éléments à faire apparaître haptiquement sont trop nombreux et les effets finissent par se chevaucher, et s'annulent ou s'amplifient par phénomène de résonance.

5.4.5 L'accessibilité à l'Internet, via le mode haptique

Très récemment, Wai Yu et ses collègues ont proposé un système multimodal de présentation de pages Internet (YU *et al.*, 2005). Il s'agissait d'appliquer l'approche qu'il a utilisée sur les graphiques mathématiques, au pages Internet. Par exemple, la proximité du pointeur de la souris avec une image ou un lien, se matérialisait par un retour sonore (synthèse sonore ou sonification) et haptique (par une souris à retour de force). L'intérêt de leur approche vient de l'utilisation de logiciels et de matériels courants : Internet Explorer ou Mozilla Firefox pour les navigateurs employés, la souris Wingman Force Feedback et son WebPlugin pour le dispositif haptique.

5.4.6 L'accessibilité dans le monde réel : Homere

Homere est un système qui a été réalisé par la société ONDIM², en partenariat avec le Commissariat à l'Énergie Atomique et PSA Peugeot Citroën (ASCHER *et al.*, 2002). Il s'agit d'un système d'assistance à la reconnaissance d'itinéraires urbains pour aveugles et malvoyants. Le dispositif haptique revient à simuler une canne blanche virtuelle. L'ensemble du système permet la reconnaissance d'un itinéraire au sein de la Cité des Sciences et de l'Industrie.



FIG. 5.3 – Le système Homere

²<http://www.ondim.fr/>

5.5 Recommandations de conceptions

COLWELL (2001) a déduit de ses expériences une série de recommandations quant à l'utilisation du mode haptique pour les non-voyants : ³

1. Les utilisateurs doivent être capables d'une discrimination aisée entre les différentes textures simulées ; il ne faut pas partir de l'hypothèse comme quoi les variations des paramètres de génération d'une textures sont facilement détectables par autrui.
2. La perception des textures peut varier d'un utilisateur à l'autre, tant sur la perception des éléments de la texture, que sur la manière dont la texture est ressentie (i.e. qu'est-ce qui est plus dur, qu'est-ce qui est plus doux ?).
3. La perception des dimensions est plus précise sur un grand objet virtuel que sur un petit.
4. La taille d'un objet virtuel est perçue comme étant plus grande lorsque l'objet est exploré de l'intérieur, et plus petite lorsque l'objet est exploré de l'extérieur.⁴
5. Les objets virtuels n'ont pas besoin de suivre les lois de la physique de la même manière que dans le monde réel. Notamment, les utilisateurs peuvent passer à travers la surface d'un objet. Ce sont les contraintes technologiques qui ne permettent pas de rendre tous les aspects physiques d'un objet sur son avatar virtuel. Pour autant, cela ne semble pas déranger les utilisateurs pour pousser un objet même en passant au travers de sa surface, mais un soin particulier doit être apporté pour respecter le maximum des autres lois de la physique.
6. Les utilisateurs peuvent rencontrer des difficultés pour orienter des objets virtuels dans l'espace ; si cela s'avère important dans la tâche, d'autres mécanismes peuvent être utilisés (par exemple, en ajoutant un sol ou des murs à l'espace virtuel).
7. Les utilisateurs peuvent avoir besoin d'apprendre des stratégies d'exploration avec un périphérique particulier. Ceci n'est certainement pas long, mais autant proposer de telles stratégies aux utilisateurs.
8. Les utilisateurs peuvent ne pas appréhender des objets trop complexes depuis une information purement haptique ; une information multimodale peut alors être utilisée pour donner un sens aux objets complexes.

³(1) et (2) concernent les textures virtuelles, (3) à (7) sont sur les objets virtuels, (8) à (9) concernent les objets complexes et leurs orientations et enfin (10) et (11) traitent de l'espace haptique et de sa navigation.

⁴Les recommandations (3) et (4) suggèrent que si la taille des objets est un paramètre important, il peut être nécessaire de biaiser la taille de l'objet virtuel par rapport à sa taille réelle.

9. Les objets virtuels complexes sont souvent constitués de plusieurs composants. La modélisation tridimensionnelle peut générer des petits vides entre ces composants. Lors de l'exploration haptique, le curseur peut s'y coincer. Tout ceci ne peut que perdre l'utilisateur lors de l'exploration haptique d'un objet virtuel.
10. Les utilisateurs peuvent se perdre dans l'espace haptique. Il est nécessaire de proposer un mécanisme donnant des informations sur la navigation, afin d'éviter ce problème.
11. Les utilisateurs peuvent avoir différents modèles mentaux de ce qu'est l'espace virtuel et de quelle partie du périphérique est en train de toucher l'objet virtuel. Il faut veiller aux conséquences de ces facteurs.

De même, SJÖSTRÖM (2002) a proposé ses recommandations plus spécifiquement dédiées la conception de l'interaction haptique non-visuelle :

1. **L'objet** : Élaborer un objet virtuel en tant que tel : l'objet peut ressembler à un objet réel, mais il faudra aussi tenir compte des caractéristiques de la perception pendant sa conception.
2. **La navigation** : Faciliter la navigation ainsi que la vue générale : en proposant des points de références pour éviter à l'utilisateur de se « perdre » (c'est à dire de mettre le pointeur de son dispositif à retour de force, à un endroit privé de retour de force)
3. **Le contexte** : Proposer des informations contextuelles
4. **La multimodalité** : Utiliser toutes les modalités disponibles (plage braille, synthétiseur vocal...)
5. **L'apprentissage** : Proposer un support, voire même des cours pour la phase d'apprentissage de la méthode d'interaction, pour la prise de connaissance de l'environnement et pour le fonctionnement du programme.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le public auquel nous nous intéressons en premier lieu, à savoir les utilisateurs non-voyants.

Nous avons également défini ce que nous attendons d'une démarche d'accessibilité : les concepts mis en œuvre pour une application visant un public spécifique, doivent pouvoir être reprises dans des applications sans public spécifique. L'interaction s'en trouvera, selon les cas, augmentée, améliorée, ou simplifiée.

Pour finir, et afin de positionner notre proposition (voir chapitre suivant), nous avons posé l'état de l'art des réalisations utilisant l'interaction haptique dans une démarche d'accessibilité, ainsi que les recommandations qui ont été émises.

CHAPITRE 6

La localisation relative

Sommaire

6.1	INTRODUCTION	94
6.2	LA LOCALISATION RELATIVE	94
6.2.1	L'IDÉE SOUS-JACENTE	94
6.2.2	MISE EN ŒUVRE TECHNIQUE	95
6.2.3	EFFET DE LA NATURE DE LA MODALITÉ AUDIO SUR LA MÉMOIRE	103
6.2.4	MODÉLISATION DU TEMPS D'EXPLORATION	110
6.2.5	VERS LES APPLICATIONS DE LA LOCALISATION RELATIVE	117
6.3	APPLICATION À LA GÉOGRAPHIE : GEOGR'HAPTIC	117
6.3.1	CE DONT DISPOSENT LES NON-VOYANTS POUR AVOIR ACCÈS AUX CARTES GÉOGRAPHIQUES	117
6.3.2	L'APPLICATION GÉOGR'HAPTIC	119
6.3.3	GÉOGR'HAPTIC EN ACTION	119
6.3.4	AU FINAL	120
6.4	APPLICATION À LA MUSIQUE : MUSIC'HAPTIC	121
6.4.1	SPATIALISATION DE L'INFORMATION MUSICALE ET AP- PRENTISSAGE	121
6.4.2	LA REPRÉSENTATION DE STEEDMAN	123
6.4.3	MUSIC'HAPTIC: LE PROTOTYPE	126
6.5	CONCLUSION	128

6.1 Introduction

Nous allons proposer dans ce chapitre un cadre d'utilisation des périphériques de pointage à retour de force. Nous avons déjà abordé les limites de ce type de dispositif dans le chapitre 3, page 53.

Maintenant, du potentiel du système haptique (voir la section 2.4 page 23, la section 3.4.3 page 39 et la section 3.6.1 page 53), nous pouvons déjà édicter plusieurs règles :

Règle 1 : la précision des doigts en terme de positions, et de mémorisation (ZHAI *et al.*, 1996). Ceci implique l'utilisation des périphériques type PHANTOM en mode stylo, de manière à ne pas trop baser l'interaction sur le couple épaule-coude. De plus, une souris peut rester préférable car elle est plus simple à manier en 2D.

Règle 2 : la mémoire sur la position est meilleure que celle sur les distances. (FAINE-TEAU *et al.*, 2003)

Règle 3 : l'apprentissage par geste actif donne de meilleurs résultats que celui par geste passif. En d'autres mots, il faudra préférer des phases d'apprentissage de l'interface basées sur l'exploration, plutôt que sur la présentation.

De plus, les modèles de l'utilisateur (en particulier le modèle du processeur humain, voir la section 3.3.1 page 34) nous indiquent quelques règles à respecter sur l'ergonomie des interfaces :

Règle 4 : limiter le nombre d'items de menus

Règle 5 : établir des liens entre éléments (couleurs, format, emplacements) pour faciliter le filtrage cognitif

Règle 6 : écrire des messages concis

Règle 7 : ne pas présenter d'informations inutiles

6.2 La localisation relative

6.2.1 L'idée sous-jacente

C'est grâce à la mémoire sensorielle associée à notre perception kinesthésique, que nous pouvons nous représenter mentalement la position des objets que nous sommes en train de manipuler. Nous allons associer cette approche à une utilisation de périphériques de pointage à retour de force et à un retour audio (synthèse vocale et son). C'est ce que nous nommerons par la suite la « localisation relative ».

Par exemple, sur la figure 6.1, un utilisateur non-voyant pourra reconnaître les positions relatives de départements français de la région Midi-Pyrénées (l'exemple en haut de la figure) ou bien la disposition des membres d'un être virtuel (l'exemple du bas de la figure).

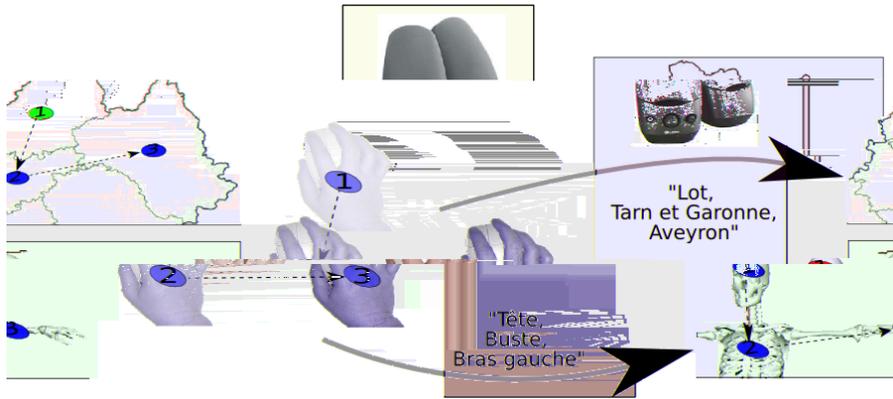


FIG. 6.1 – La localisation relative

Afin d'illustrer ce concept d'interaction, nous proposons **la métaphore du levier de vitesse** (figure 6.2), qui comprend nombre de similitudes avec la localisation relative :

- l'action de l'utilisateur est le déplacement d'un point dans l'espace ;
- le feedback de l'action est constitué par un retour haptique (guidage et cran) et sonore (bruit du moteur) ;
- l'interaction est réalisée sans regarder le levier (ou alors, il faut penser à apprendre à conduire) ;
- une phase d'apprentissage est nécessaire, ainsi qu'une mise à niveau quant aux spécificités des différents modèles. Par exemple, la marche arrière est en haut à gauche, ou encore, la boîte compte 6 vitesses.

6.2.2 Mise en œuvre technique

6.2.2.1 Cahier des charges

Le système devra respecter au mieux les points suivants :

- Se baser sur des formats de fichier les plus pérennes possible
- Être extensible pour s'adapter à d'autres domaines
- Permettre une traduction haptique la plus automatique possible



FIG. 6.2 – La métaphore du levier de vitesse

6.2.2.2 Le format de fichier

Nous avons décidé de baser notre système sur le formalisme XML. Nous avançons plusieurs raisons à ce choix :

1. Le format XML est un format ouvert et normalisé.
2. Il existe toute une panoplie d'outils pour la manipulation des fichiers XML : XSL, XPath...
3. Certains formats issus du XML peuvent être utilisés dans un contexte Web : SVG, MathML, X3D...
4. Certains domaines disposent de leur formalisme XML : CML pour la chimie, SVG pour les graphismes vectoriels, MathML pour les mathématiques...
5. Quasiment tous les langages de programmation disposent d'outils permettant la lecture, la manipulation ou la création de fichiers XML. Pour notre part, nous avons utilisé Perl et PHP côté serveur. Côté client, c'était du javascript qui pouvait générer le SVG, javascript parfois lui-même généré par une programmation « server-side ».
6. Le XML est « scriptable ». En d'autres mots, il permet une interaction avec l'utilisateur, et ce, de manière relativement facile ; de plus, grâce au DOM (*Document Object Manager*), il est possible d'agir sur la structure même du document XML, par exemple en ajoutant dynamiquement un objet.

En pratique, c'est le format de fichiers SVG (*Scalable Vector Graphics*) que nous utilisons. Il s'agit du formalisme XML pour produire des images vectorielles. Mais pourquoi un format qui code des images ? La question est à poser, surtout lorsque les applications basées sur notre approche, ciblent les utilisateurs non-voyants. En fait, le SVG va nous donner les informations spatiales dont nous avons besoin pour générer les effets de retour de force. Et ce, de manière beaucoup plus automatique qu'avec un fichier binaire codant une image bitmap (comme les fichiers jpeg ou gif).

Par exemple, considérons le code SVG suivant :

```
<rect x="1" y="1" width="1198" height="398"
fill="none" stroke="blue" stroke-width="2"/>
```

Il s'agit de la déclaration d'un rectangle dont le coin supérieur gauche est aux coordonnées (1,1), dont la largeur est 1198 et la hauteur 398. En connaissant ces données, il est simple de générer une force sur un périphérique adapté, de manière à amener le dispositif au centre de ce rectangle (en l'occurrence, en $x = 599$ et $y = 296$).

6.2.2.3 Le retour de force

Notre retour de force est généré via la souris Wingman Force Feedback Mouse. De plus, nous utilisons le Web Plugin d'Immersion™ pour disposer du retour de force dans un navigateur Internet. En l'occurrence, il s'agit de Internet Explorer, car c'est un des seuls qui accepte le plugin.

L'effet que nous utilisons pour situer un point haptique est illustré

6.2.2.4 Une approche manuelle

La première approche que nous avons utilisée pour placer l'effet en relation avec l'affichage, a été purement manuelle. Il s'agissait de créer un tableau contenant les coordonnées des points en question. Ces coordonnées, ont été préalablement relevées, dans un logiciel d'édition de fichiers SVG, à la main. Il fallait de plus, conserver un certain ordre afin de retrouver quelles coordonnées allaient avec quel point.

6.2.2.5 Des approches plus automatiques

6.2.2.5.1 L'emplacement de l'effet est calculé au chargement du SVG : À la lecture du fichier SVG, il est possible de calculer un couple de coordonnées symbolisant le « centre » d'une forme. En reprenant notre exemple précédent, qui code le rectangle, une fonction javascript peut facilement calculer le centre de la primitive `<rect>`, en l'occurrence, dans le système de coordonnées du SVG, $x_c = 599$, et $y_c = 199$. Nous avons ainsi développé plusieurs fonctions permettant le calcul du centre d'inertie, pour un rectangle, une ellipse.

Le problème s'est compliqué lorsque nous nous sommes penché sur les primitives `<polygon>` et `<path>`. La primitive `<polygon>` code une suite de point de la forme " $x_1, y_1 x_2, y_2 \dots x_n, y_n$ " afin de dessiner un polygone. La primitive `<path>` dessine un chemin, en donnant par exemple le point de départ, puis une liste de vecteurs. Le calcul en soi du centre d'inertie ne pose pas de problème. Par contre, il est également possible de tomber sur un centre d'inertie extérieur à la forme.

exemple avec la primitive `<polygon>`

```
<polygon  
points="10,10 10,100 100,100 100,90 20,90 20,50 70,10"  
style="fill : red; stroke : black"/>
```

La figure 6.4 illustre cette forme, ainsi que le centre d'inertie calculé : $x_c = 47,14$ et $y_c = 137,14$.

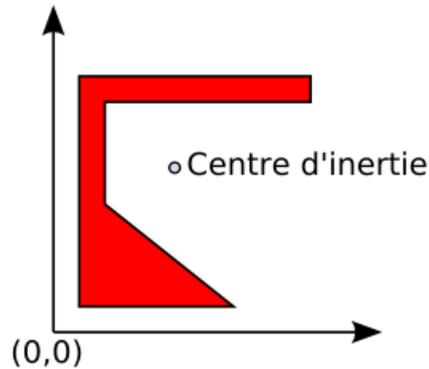


FIG. 6.4 – Centre d'inertie extérieur à la forme

Pour cette raison, et pour éviter d'avoir à se lancer dans de fastidieux calculs qui visent à déterminer le centre géodésique de la forme, nous avons finalement opté pour une autre approche.

6.2.2.5.2 Utilisation de l'attribut « translate » : L'approche que nous avons le plus utilisée, est toujours automatique. Néanmoins, elle présuppose un travail préalable lors de la création du fichier SVG ; dans notre cas, le travail se fera lors de la génération du fichier.

L'approche consiste en :

1. la création de formes vectorielles, centrée en (0,0),
2. l'utilisation de ces formes en les plaçant dans un fichier SVG. Le placement de ces formes sera réalisé par l'attribut « translate »

dans l'exemple précédent :

Nous allons centrer la forme en (0,0) ; cette origine sera le point de retour haptique. Le code suivant

```
<polygon points="-20,-20 -20,70 70,70 70,60 -10,60 -10,20
40,-20"
style="fill : red; stroke : black"/>
```

nous donne la figure 6.5 :

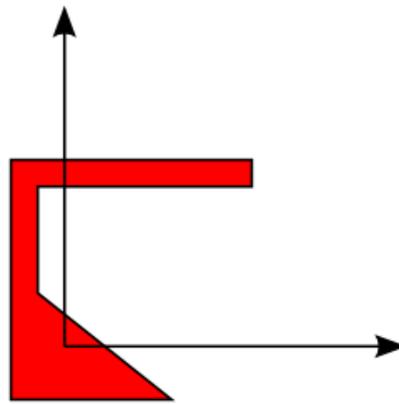


FIG. 6.5 – Forme centrée sur l'origine

Par la suite, il nous suffira de réutiliser cette forme, en la plaçant grâce à une translation avec la balise adéquate. Par exemple, pour placer notre forme en (50,150), on aura :

Finalement, nous n'avons plus qu'à lire la valeur de la translation pour positionner correctement l'effet. Le gros avantage de cette approche est également sémantique : nous manipulons ici un élément graphique, dont l'origine se trouve être un élément haptique. Notre forme devient un interacteur bimodal : visuel et haptique.

6.2.2.6 Le retour audio

Dans nos prototypes, le retour audio n'est effectué que d'une seule façon, par sons pré-enregistrés (format wav ou mp3) inclus dans le fichier SVG lors de la génération. Pour autant, d'autres possibilités sont envisageables, telles qu'utiliser un lecteur d'écran et une synthèse vocale, de manière à faire prononcer des mots-clés inclus dans le fichier SVG. Autre approche, de même que nous générons dynamiquement le SVG, il est également possible de synthétiser le retour audio côté serveur, en créant un fichier midi, par exemple.

Enfin, quel que soit la façon dont nous disposons de la modalité audio, cette dernière se déclenche lorsque le pointeur de la souris passe au dessus d'une forme donnée, en même temps que le déclenchement de l'effet haptique.

6.2.2.7 Une architecture client-serveur basée sur MVC

Nous avons choisi un contexte d'application orienté Web-Application. Nos prototypes sont donc basés sur une architecture client-serveur.

CHAPITRE 6. LA LOCALISATION RELATIVE

Côté serveur, c'est le serveur Web Apache qui est utilisé. Côté client, nous utilisons le navigateur Microsoft Internet Explorer : en effet, Il est actuellement le seul à disposer

Par extension, et dans un cadre d'utilisation enseignant-élève, nous aurions un système avec un côté enseignant

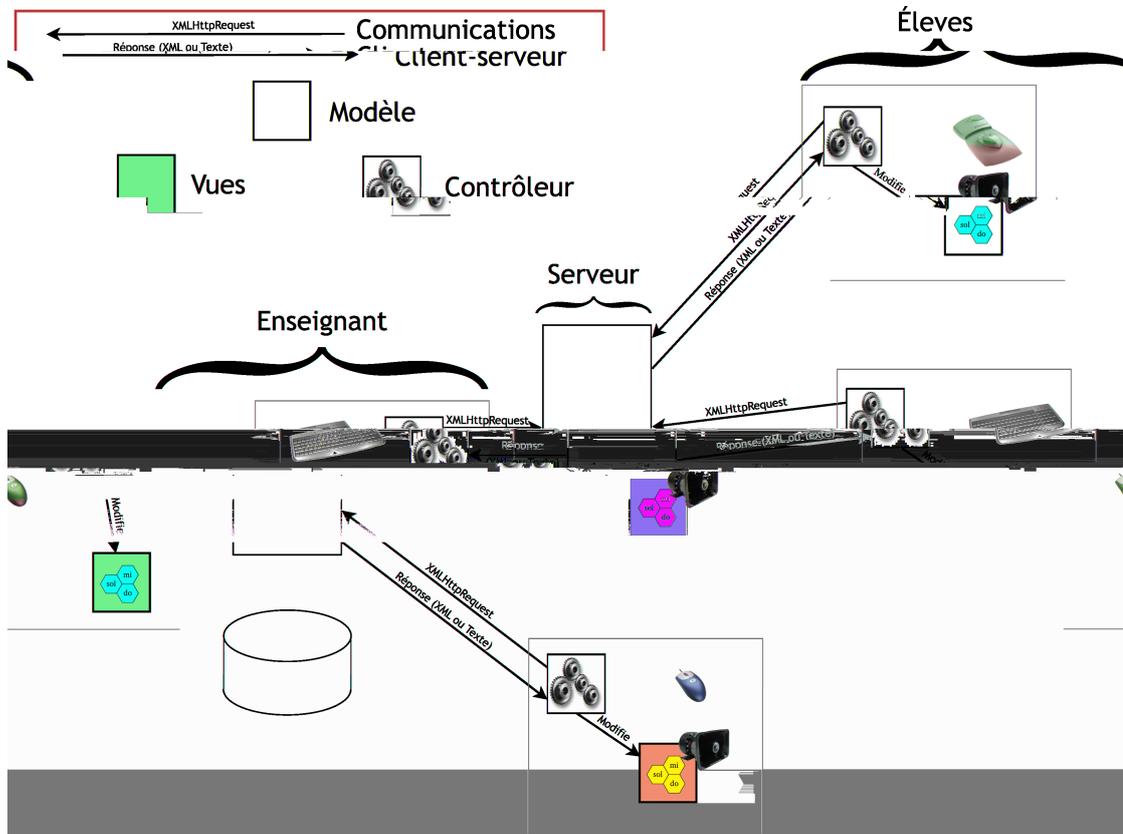


FIG. 6.7 – Le modèle MVC Enseignant-Élève

D'un point de vue technique, le XMLHttpRequest est une fonction javascript invoquée par le contrôleur vers le modèle. L'avantage de cette fonction est qu'elle dispose d'un mode asynchrone, et donc, l'interaction peut continuer côté client, sans attendre la réponse du serveur. C'est ce qui est nommé AJAX pour Asynchronous Javascript And XML (on pourra se référer à l'appendice page 165 pour plus de détails).

Les réponses du serveur, enfin, permettent l'extensibilité et la flexibilité de l'application. En effet, deux formes de réponses peuvent survenir :

- la réponse est sous une forme XML : dans ce cas, le contrôleur parse le XML, et en extrait les données nécessaires à l'interaction via la Vue.
- la réponse est sous forme de texte : dans ce cas, le texte peut contenir des commandes pour le contrôleur sur chaque client, commandes pouvant étendre les

possibilités du Contrôleur. Par exemple, dans un cadre typiquement enseignant-élève, le contrôleur de chaque poste doit se tenir à jour informé des traitements effectués par le modèle. Une réponse sous forme de texte peut contenir une nouvelle version de la fonction de mise à jour, pour ralentir ces dernières (gestion de la bande passante par le serveur par exemple, si le trafic devient trop important).

6.2.2.8 En résumé

Nous avons présenté notre approche technique. Il faut souligner que le meilleur reste à venir. En effet, pour le moment, le développement reste tributaire du bon vouloir des entreprises : le web plugin d'Immersion Corporation n'est plus développé depuis plusieurs années. Ainsi, il n'est pas possible de l'utiliser sous les navigateurs basés sur Gecko comme Mozilla ou Firefox. Or, ces navigateurs nous auraient permis d'améliorer la souplesse lors de la programmation, avec par exemple la possibilité d'inclure directement dans le code XML (XHTML en l'occurrence) d'une page internet, une partie de SVG, sans avoir besoin de plugin externe pour l'affichage.

Au final, d'ici 2 à 3 ans, les choix techniques discutés ici pourront paraître assez lourds, mais les recommandations conceptuelles resteront valides.

6.2.3 Effet de la nature de la modalité audio sur la mémoire

Nous avons conçu une expérimentation, qui vise d'une part à valider notre approche, mais aussi à démontrer ses limites.

Nous allons chercher à montrer que la nature du retour audio influe sur le temps mis pour explorer une carte haptique, et donc sur la mémorisation de cette dernière. Par nature du retour audio, nous comprenons le type de son : un son contenant un sens « écrit », et un son musical. Pour une personne non musicienne, par exemple, il est plus compliqué de mémoriser des notes de musique, que des chiffres, des lettres ou même des phrases.

6.2.3.1 Sujets

Nous avons pu faire passer notre test à 19 personnes (5 femmes, 14 hommes), âgés de 25 à 34 ans. Tous avaient déjà utilisé une souris. Enfin, quatre d'entre eux avaient déjà manipulé la souris à retour de force.

6.2.3.2 Matériel

Le test a été effectué à l'aide de la souris Wingman Force Feedback Mouse. Pour le reste, une architecture client-serveur était en place, à savoir un serveur Apache, avec PHP activé, et un client avec Microsoft Internet Explorer pour lire les données envoyées par le serveur. Dans notre cas, le serveur et le client tournaient sur la même machine, un portable équipé de 512 Mo de mémoire, et d'un processeur Pentium 4 à 2 Ghz. Enfin le retour sonore se faisait via un casque audio.

6.2.3.3 Procédure

La tâche que nous avons mise au point est la plus générique possible. Il s'agit de compter des « points haptiques » à l'aide de la souris Wingman et sans retour visuel. Un point haptique est un effet d'attraction en un certain endroit de l'espace de travail de la souris.

L'espace de travail de la souris est ainsi divisé en un certain nombre de régions. Chaque région est donc pourvue d'un retour de force (un point haptique), et d'un retour sonore. Nous avons utilisé différents retours sonores, à savoir, des notes de musique, des lettres de l'alphabet pré-enregistrées, et le silence.

Les différents paramètres de l'expérience sont précisés dans le tableau 6.1.

Conditions audios :	Notes, Lettres, ou Silence
Nombre de régions à trouver :	3, 6 ou 9

TAB. 6.1 – Les conditions expérimentales

La répartition des points haptiques sur la surface de travail de la souris est générée par une programmation côté serveur, de manière à construire des fichiers SVG, eux-mêmes interprétés, par une programmation javascript côté client, afin de générer le retour de force. Enfin, les positions de ces points haptiques sont choisies lors de la génération, parmi 18 positions pré-établies. À noter, enfin, que l'espace non-occupé par les formes SVG, génère une vibration avec la souris, indiquant au sujet qu'il est sorti de la zone d'intérêt. La figure 6.8 montre quelques configurations que les sujets ont dû explorer.

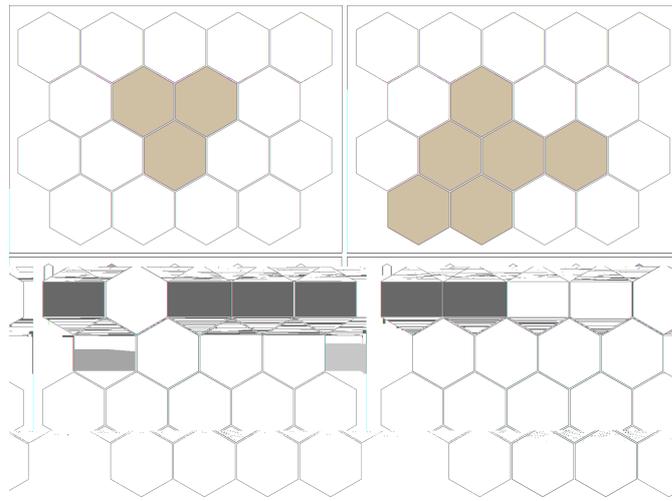


FIG. 6.8 – Exemples des configurations à explorer ; les hexagones colorés représentent les zones haptiques à trouver et à localiser

Une session consiste en une phase d’exploration avec 3, 6 ou 9 points haptiques, et une des conditions audios. Les sessions sont chronométrées. Et à la fin de chaque session, deux questions sont posées au sujet :

1. Combien y-a-t-il de points haptiques ?
2. Comment sont-ils agencés les uns par rapport aux autres ? (question ouverte : nous n’avons pas utilisé de formulaire de réponse, mais nous avons consigné les réponses orales, écrites ou gestuelles)

L’ordre des différentes sessions selon le nombre de points, et le type de retour audio, est aléatoire. Ceci afin de limiter les effets de l’apprentissage d’une session à l’autre, par rapport à la difficulté de la tâche (c’est à dire le nombre de points à trouver).

Avant de commencer, un exemple de chaque condition sonore est proposé, afin d’habituer les sujets au maniement de la souris, et au déroulement du test.

Pour terminer, nous avons noté les remarques que les sujets pouvaient nous faire.

6.2.3.4 Résultats et Discussion

6.2.3.4.1 Le temps nécessaire pour compléter la tâche : la mémorisation La première donnée mesurable que nous pouvons commenter est le temps mis pour achever la tâche, en fonction du nombre de points et de la nature du retour audio. Le tableau 6.2 nous indique ces résultats, que la figure 6.9 illustre.

	Notes	Lettres	Silence	Moyenne
3 points	55,8	48,9	56	53,6
6 points	117,6	87,6	144,4	116,5
9 points	162	117,4	183,1	154,2
Moyenne	111,8	84,7	127,8	108,1

TAB. 6.2 – Moyennes des temps (en ms), selon les conditions audios (axe horizontal) et le nombre de points (axe vertical)

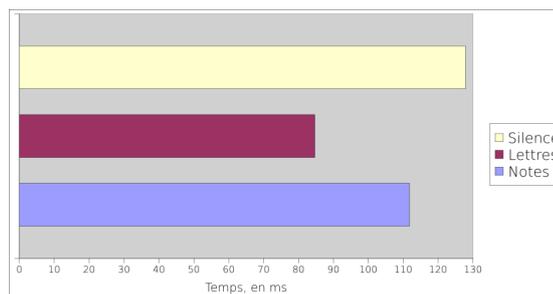


FIG. 6.9 – Les temps selon les différentes conditions audios

Nous remarquons immédiatement que les performances sont nettement meilleures avec les lettres. En moyenne, la tâche avec les notes de musique est 31,8% plus lente qu’avec les lettres ; et la tâche sans retour audio est 50,8% plus lente.

À présent, la figure 6.10 présente ces mêmes résultats, en les groupant selon le nombre de points présentés.

Les temps évoluent clairement en augmentant avec le nombre de points, et ce d’une manière pratiquement linéaire. De plus, on retrouve un comportement très similaire dans les trois cas : la reconnaissance est plus rapide quand ce sont des lettres qui sont présentées, puis viennent les notes de musique, et le silence.

Petite remarque, néanmoins : lorsqu’il n’y a que trois points, les différences de performances sont relativement faibles (de l’ordre de 15%). On peut expliquer ceci par le fait que trois éléments à mémoriser reste de toute façon une tâche facile, même si on remarque déjà des différences de performance.

6.2.3.4.2 La mémorisation de l’agencement spatial Grâce aux questions posées après chaque essai, nous avons pu noter sur 10, la qualité de l’agencement reconnu des points.

La note est calculée de la manière suivante :

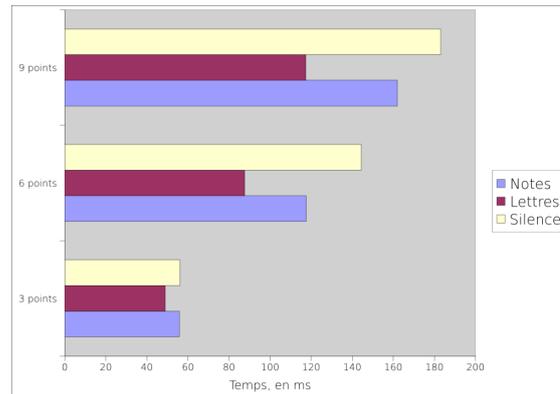


FIG. 6.10 – Les moyennes des temps, selon les différentes conditions audios, et en fonction du nombre de points à trouver

1. la première réponse concerne le nombre de points reconnus. Sur cette partie, on notera N_c le nombre reconnu de points, et N_r le nombre réel de points. L'ensemble de la note devra tenir compte du nombre d'éléments à retrouver N_r : en effet, il serait étrange de sanctionner d'avantage « 7 points trouvés sur 9 », que « 2 points trouvés sur 3 ».
2. la seconde réponse concerne l'agencement des points. La note est ici plus difficile à formaliser afin d'éviter une certaine subjectivité : nous devons compter avec la disposition générale des réponses données (« il y a un élément en haut, et un autre à droite »), ainsi qu'avec une certaine exigence de précision (« l'élément du haut est deux fois plus éloigné du centre que celui de droite »). Nous notons cette partie de la note A_g , entre 0 et 10.

Nous allons chercher à obtenir une note N , sur 10, dans tous les cas de figure (3, 6, et 9 points). Le comportement de la notation doit suivre la qualité de la réponse.

La note N sera alors calculée selon la formule :

$$N = A_g \left(\frac{N_c}{N_r} \right)$$

Ce comportement de la notation nous semble conforme à la qualité des réponses.

Au final, le tableau 6.3 présente la synthèse de ces notes, et la figure 6.11 illustre le comportement des notes, selon la nature du retour audio.

D'une manière similaire à ce que l'on a observé avec les temps, au paragraphe précédent, nous notons que le retour « Lettres » obtient les meilleures notes. Le retour

	Notes	Lettres	Silence	Moyenne
3 points	9,48	9,75	9,18	9,48
6 points	7,28	8,03	6,33	7,21
9 points	5,33	6,82	4,98	5,71
Moyenne	7,39	8,20	6,83	7,46

TAB. 6.3 – Moyennes des notations, sur 10, selon les différentes conditions audios, et en fonction du nombre de points à trouver

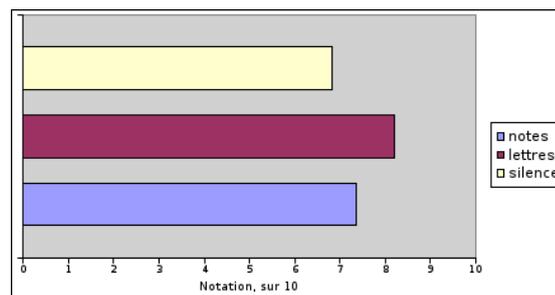


FIG. 6.11 – Notations selon les différentes conditions audios

audio « notes » obtient des notes 9,5% plus faibles que le retour « lettre » ; quant au retour « silence », ses notes sont 16,7% plus faibles.

Nous notons également que les notes s’effondrent très rapidement avec l’augmentation du nombre de points à découvrir. Cela peut provenir de notre méthode de notation, mais nous pensons qu’il s’agit de la difficulté intrinsèque de la tâche : une reconnaissance, et une localisation à l’aide d’une souris à retour de force, reste une tâche ardue, du fait notamment du manque de précision du périphérique, et du retour haptique sur un unique point de contact.

Maintenant, la figure 6.12 distingue les notes selon le nombre de points à découvrir.

Là encore, les résultats sont très proches de ceux déjà observés, et ce, dans les trois cas de figure : les meilleurs résultats pour le retour « lettres », suivi du retour « notes », et le retour « silence ».

Il s’agit maintenant de commenter tous ces résultats, ensembles. À savoir, existe-t-il un lien entre les performances lors de la tâche, et la note obtenue ?

6.2.3.4.3 Corrélation entre le temps de la tâche et la notation ? Pour terminer, nous synthétisons tous ces résultats sur la figure 6.13.

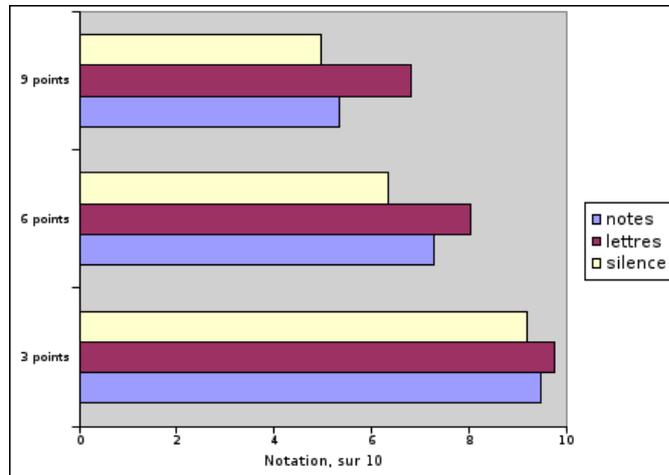


FIG. 6.12 – Notations, selon les différentes conditions audios, et en fonction du nombre de points à trouver

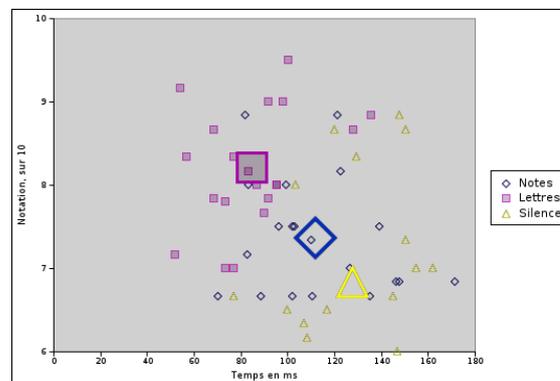


FIG. 6.13 – Corrélation entre le temps mis lors de la tâche, et la notation. Les grands symboles représentent les positions moyennes pour chacune des conditions de retour audio

6.2.3.5 En conclusion

Cette série de tests nous permet de poser quelques réflexions sur notre approche. Cela montre déjà la faisabilité de l'approche : la mémorisation s'opère bien, et les erreurs quant-à la précision spatiale tend à diminuer avec l'habitude du dispositif.

Les retours utilisateurs désignent cependant les limites du périphérique. Bien que l'approche plaise lors de l'explication pré-expérimentation, il s'ensuit une certaine frustration : « les effets ne sont pas assez forts ». Ceci est malheureusement le fait des caractéristiques techniques de la souris, plafonnant à 1N.

Nous pensons que cela peut néanmoins valider notre approche, tout du moins dans un cadre d'expérimentation et de prospection.

Par la suite, un test impliquant plus de monde pourrait permettre d'affiner les résultats. Il pourrait être intéressant, par exemple, de prendre en compte l'effet de l'âge sur les résultats. Les données que nous avons recueillies ne sont pas suffisamment nombreuses pour pouvoir conclure sur ce point, mais il semble que les sujets jeunes appréhendent plus facilement, et rapidement, le maniement de la souris.

6.2.4 Modélisation du temps d'exploration

Nous allons maintenant tenter de modéliser le temps qu'il nous faut pour explorer une surface haptique, telle que nous la considérons depuis le début de ce chapitre. L'idée est de déterminer comment le temps d'exploration évolue, en fonction du nombre d'éléments présentés. Enfin, l'expérience précédente semble avoir montré une évolution du temps d'exploration linéaire, selon le nombre d'éléments à sentir.

Nous allons donc proposer une tâche de recherche d'éléments, parmi un ensemble de points haptiques.

Nous posons l'hypothèse que le temps T de la tâche peut se décomposer de la manière suivante :

$$T = ET + RT + MT \tag{6.1}$$

avec, T , le temps total de la tâche,

ET , le temps d'exploration

RT , le temps de réaction

et MT , le temps du mouvement.

Ce dernier sera modélisé selon la loi de Fitts. Le temps de réaction RT sera modélisé selon la loi de Hick-Hyman, que nous présentons maintenant.

6.2.4.1 La loi de Hick-Hyman

Hick et Hyman (HYMAN, 1953) ont étudié la relation entre le temps de réaction RT et le nombre de réponses-stimuli alternatifs n . Leurs résultats montrent que le choix RT semble augmenter régulièrement d'environ 150 ms lorsque le nombre de réponses-stimuli n double. Ceci suggère une relation logarithmique entre le nombre de stimuli-réponses et le temps de réaction. L'interprétation de cette relation montre que le logarithme du nombre d'alternatives est une mesure de la quantité d'information à traiter. Plus il y a d'alternatives, plus il y a d'informations à traiter.

La loi de Hick-Hyman s'exprime ainsi :

le temps de réaction pour faire un choix parmi n alternatives est :

$$RT = a + b \log_2(n) \quad (6.2)$$

où a et b sont des constantes déterminées empiriquement.

b est la pente ou le taux de traitement d'information et s'exprime en s/bit. Généralement, $b = 127 - 215$ ms/bit d'information.

a est l'ordonnée à l'origine et est exprimé en seconde. On estime $a = 179$ ms lorsque $\log_2 n = 0$, $n = 1$. Ainsi, a est la vitesse élémentaire du système de perception moteur.

Les valeurs de a et b dépendent :

- de l'entraînement ;
- de l'effet de compatibilité entre les stimuli et les réponses ;
- de la familiarité avec le sous-ensemble de stimuli ;
- du pouvoir de discrimination entre les stimuli ;
- et de l'effet de la répétition des stimuli.

6.2.4.2 Sujets

Onze sujets, âgés de 24 à 32 ans, ont participé au test. Tous avaient déjà participé au test précédent, et donc, avaient une certaine habitude avec la souris à retour de force.

6.2.4.3 Matériel

Le présent test reprend exactement le même matériel que le précédent. À savoir : une souris à retour de force Wingman Force Feedback Mouse, branchée sur notre architecture client-serveur ; des script php générant les médias.

6.2.4.5 Calcul du temps théorique moyen des mouvements

Afin de déduire le temps d'exploration ET , nous allons soustraire au temps total le temps de réaction RT , que nous obtenons grâce à la loi de Hick-Hyman, ainsi que le temps du mouvements MT .

Comme dans chaque situation, la position de la cible à atteindre est aléatoire, nous allons estimer la moyenne des mouvements possibles, en fonction du nombre de zones.

Détaillons le calcul pour 4 zones. La situation est schématisée sur la figure 6.15

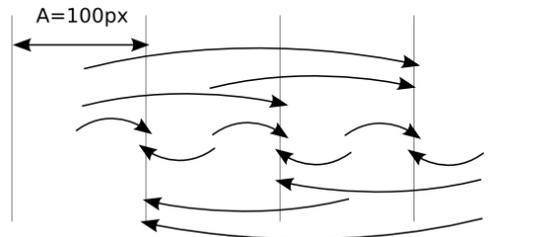


FIG. 6.15 – Les mouvements possibles pour 4 zones à explorer

Nous dénombrons :

- 4 mouvements nuls
- 6 mouvements d'une longueur $A/2$
- 4 mouvements d'une longueur $3A/2$
- et 2 mouvements d'une longueur $5A$

Soit, respectivement, et d'après la loi de Fitts, des temps de mouvements équivalents à :

- $4ams$
- $6 \left[a + \log_2 \left(\frac{A}{2W} + 1 \right) \right] ms$
- $4 \left[a + \log_2 \left(\frac{3A}{2W} + 1 \right) \right] ms$
- $2 \left[a + \log_2 \left(\frac{5A}{2W} + 1 \right) \right] ms$

Tous ces calculs sont théoriques. Pour obtenir une valeur numérique, nous allons utiliser les valeurs des coefficients que nous avons déterminés lors de l'expérience sur les performances d'une tâche de pointage sur un champ à retour de force (voir 4 page 63), à savoir 380 ms., et $b = 123$ ms/bit (condition MTFD).

Il nous reste alors à déduire la moyenne des temps, en fonction du nombre de zones. Les résultats des calculs sont dans le tableaux 6.6.

n	2	3	4	6	9
MT_{moy} (en ms)	499	528	550	586	627

TAB. 6.6 – Temps théoriques des mouvements moyens, en fonction du nombre de zones

6.2.4.6 Calcul du temps de réaction théorique

En s'appuyant sur la loi de Hick-Hyman, nous pouvons écrire les temps théoriques minimum et maximum de réaction, avec les coefficients $b^- = 127$ ms/bit., et $b^+ = 215$ ms/bit.

– minimum :

$$RT^-(n) = 179 + 127 \log_2(n) \quad (6.3)$$

– et maximum :

$$RT^+(n) = 179 + 215 \log_2(n) \quad (6.4)$$

D'où l'évolution des temps théoriques minimum et maximum de réaction, en fonction du nombre de zones (tableau 6.8).

Nombre de zones	2	3	4	6	9
Temps de réaction minimum $RT^-(ms)$	306	380	433	507	581
Temps de réaction maximum $RT^+(ms)$	394	519	609	734	860

TAB. 6.8 – Temps de réaction minimum et maximum théoriques

6.2.4.7 Résultats et discussion

Les résultats de l'expérience sont présentés dans le tableau 6.10, et illustrés graphiquement sur la figure 6.16.

Nombre de zones	2	3	4	6	9
Temps moyen de la tâche (ms)	1291	2269	2636	4869	5644

TAB. 6.10 – Résultats de l'expérience

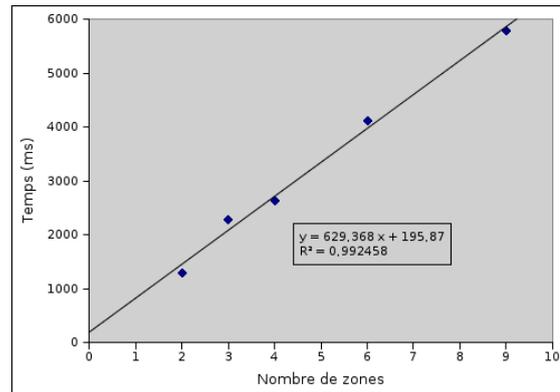


FIG. 6.16 – Évolution du temps de la tâche en fonction du nombre de zones

En partant de notre hypothèse de base, c'est à dire $Temps = ET + RT + MT$, nous pouvons déduire les valeurs minimum et maximum des temps d'exploration ET^- et ET^+ , en soustrayant aux temps de la tâche, les temps théoriques de réaction (ET^- et ET^+ calculé avec les équations 6.3 et 6.4), ainsi que les temps théoriques moyens des mouvements MT_{moy} . Ce calcul est synthétisé dans le tableau 6.11.

Nombre de points	Temps (empiriques)	RT^- (théoriques)	RT^+ (théoriques)	MT_{moy} (théoriques)	ET^- (déduits)	ET^+ déduits)
2	1291	306	394	499	486	398
3	2269	380	519	528	1361	1222
4	2636	433	609	550	1652	1476
6	4869	507	734	586	3776	3548
9	5644	581	860	627	4435	4156

TAB. 6.11 – Résultats : les temps moyens de la tâche T , les temps théoriques MT , et RT , d'où par soustraction les temps d'exploration minimum et maximum ET^- et ET^+ .

Traçons maintenant, la somme des temps de mouvement et d'exploration : on a soustrait des temps totaux, le temps de réaction théorique. On peut d'ores et déjà noter, sur la figure 6.17, que dans ce cas, le temps tombe à 0 quand le nombre de zones est nul. Ceci tend à confirmer notre hypothèse de départ. En effet, une fois ôté le temps de réaction, le temps devrait se trouver nul, car il n'y a plus, ni exploration, et donc ni mouvement. À noter qu'avec une cible unique, le temps $MT + ET$ est non nul. Cela provient du temps de déclenchement du geste (le terme a dans la loi de Fitts).

Soustrayons à présent le temps de mouvement MT , et traçons le résultat sur la figure 6.18. Nous pouvons y observer que le temps d'exploration ET , tombe à 0 lorsqu'il

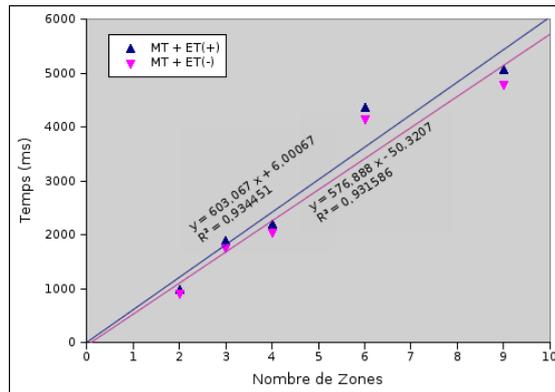


FIG. 6.17 – Temps d’exploration et de mouvement, en fonction du nombre de zones

n’y a qu’une seule zone haptique. Ceci tend également à confirmer notre hypothèse. En effet, on peut imaginer qu’avec une seule zone, il n’y a intuitivement pas de phase d’exploration.

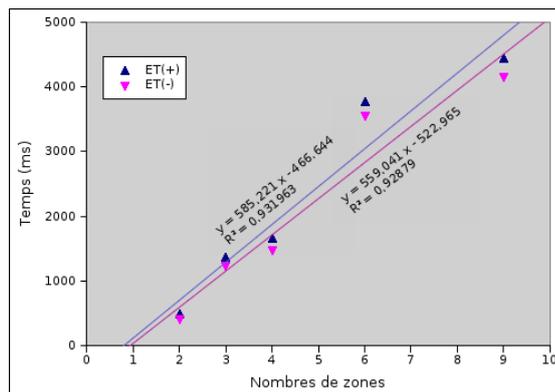


FIG. 6.18 – Temps d’exploration en fonction du nombre de zones

6.2.4.8 Conclusion

D’après notre expérimentation, le temps d’exploration d’une surface, à la recherche d’une zone haptique, semble être linéaire en n . Cependant, notons bien que dans notre test, nous n’avons pas étudié les cas au delà de 9 points haptiques. En effet, le modèle du processeur humain nous donne une mémorisation à court terme de 7 ± 2 éléments, selon la concentration ou la fatigue. Aussi, nous essaierons d’éviter de présenter trop de zones haptiques en même temps, dans une tâche de mémorisation.

6.2.5 Vers les applications de la localisation relative

Les tests que nous avons effectués dans cette section, valident selon nous notre approche, en terme de mémorisation sensorielle, ainsi qu'en terme d'utilisation du dispositif. Passé la surprise lors des premiers maniements de la souris à retour de force, les sujets de nos tests ont tous relevé l'intérêt d'un tel dispositif, tout en regrettant parfois la surface de travail trop petite.

Nous allons maintenant poursuivre dans ce chapitre en présentant les deux prototypes basés sur la localisation relative, que nous avons développés. Le premier prototype concerne la géographie, et le second, l'harmonie musicale.

6.3 Application à la géographie : geogr'haptique

Géogr'haptique est une application de la localisation relative, dans laquelle les points haptiques sont les centres des régions d'un pays, et le retour audio, la diction (pré-enregistrée ou par une synthèse vocale) du nom de cette région.

6.3.1 Ce dont disposent les non-voyants pour avoir accès aux cartes géographiques

La première solution dont une personne aveugle dispose pour appréhender la géographie, consiste à prendre un atlas géographique traduit en braille. Il lui faudra alors se faire une image mentale de la carte, en parcourant le texte. Du fait de la distance cognitive entre la représentation textuelle et la représentation spatiale, cela s'avère difficile, et assez peu parlant quant à la forme, la taille et la disposition géographique des pays, des régions, des villes ou des rivières.

Une autre possibilité consiste à utiliser des cartes tactiles. Ces dernières font apparaître les frontières, les découpages administratifs, les villes, de la même manière que des cartes conventionnelles. Cette fois, il y a une correspondance directe, à un facteur d'échelle près, entre l'information et la représentation. Cette méthode amène donc un contact direct avec la nature géographique de l'information : superficies, formes, emplacements.

Le projet CDV (pour Cartographie pour Déficiants Visuels ¹), au Canada (SIEKIERSKA *et al.*, 2001), propose l'accès à des cartes prêtes à imprimer en se servant d'un amplificateur thermique : la représentation graphique (figure 6.19) est téléchargée,

¹site web : <http://tactile.nrcan.gc.ca/>

de définir des zones sensibles auxquelles on affecte une action. Par exemple, couplé à une synthèse vocale, les différents points du graphique peuvent déclencher des messages vocaux. En posant le doigt sur une région, on entendra le nom de cette région, et éventuellement d'autres informations. Pour la géographie, TactiSon permet d'enrichir des cartes géographiques et des plans de villes sans les surcharger de texte braille souvent encombrant.

Enfin, le CDV, encore, propose une application des travaux de GARDNER ET BULATOV (2001). Il s'agit d'un environnement qui permet de lire des carte SVG relativement simples, et de les augmenter avec le mode haptique : sensation des frontières et des formes des régions.

6.3.2 L'application Géogr'Haptic

L'application que nous avons conçue a pour but de permettre à un utilisateur non-voyant de se faire une image mentale d'une carte géographique. A l'écran, est affichée une carte d'un pays indiquant ses différentes régions administratives. L'utilisateur se sert de la souris pour parcourir l'écran. A chaque fois qu'il passe au-dessus d'une région, un retour kinesthésique place la souris en son centre. En même temps, le nom de la région est lu par un lecteur d'écran et une synthèse vocale, pour assurer un retour sonore.

Geogr'haptique est une application orientée Internet. Ceci implique qu'elle tourne sur un classique navigateur Internet comme Internet Explorer ou Netscape Navigator. L'ensemble de la carte réagit comme une image réactive déclarée avec la balise <MAP> en HTML. Il est ainsi totalement envisageable d'associer un lien à chaque région, de manière à accéder à des informations précises sur la région, ou bien d'ouvrir une nouvelle carte, montrant la région en détail, et ses départements.

Pour fonctionner, il est toutefois nécessaire d'avoir installé deux plugins pour le navigateur Internet que l'on utilise :

- Le plugin ImmWeb d'Immersion Corporation qui autorise une programmation Javascript des effets haptiques de la souris.
- Le plugin SVGViewer d'Adobe, pour afficher les fichiers SVG. Ces fichiers sont la base graphique de l'application. Ce sont eux qui contiennent toute l'information graphique des cartes.

6.3.3 Géogr'haptique en action

Nous allons maintenant illustrer le fonctionnement de Géogr'haptique :

Situation de départ : une carte des Etats-Unis est affichée dans le navigateur internet. Le pointeur de la souris se trouve sur l'état du Kansas. Le son « Kansas » vient de sortir du haut-parleur et la souris semble aimantée dans sa position actuelle (figure 6.20).

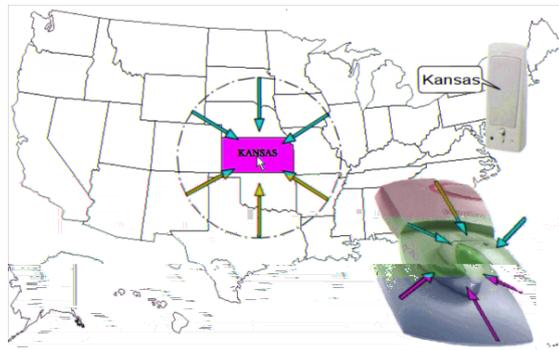


FIG. 6.20 – Géogr'haptique, situation initiale

Maintenant, on saisit la souris, et on la pousse vers la gauche. Il faut un peu forcer car elle nous ramènerait inexorablement vers le point d'origine. Pourtant, un instant plus tard, la force ressentie dans la souris s'est inversée, le périphérique se stabilise dans une nouvelle position située à gauche de la précédente et le mot « Colorado » vient d'être prononcé par la synthèse vocale (figure 6.21).

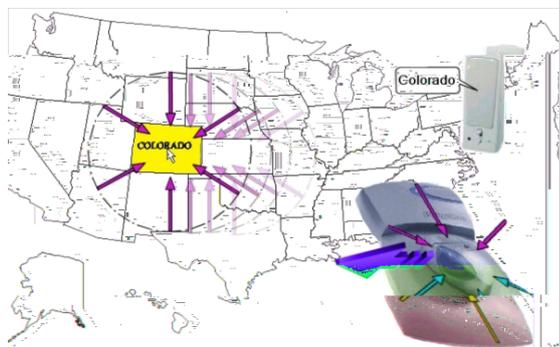


FIG. 6.21 – Géogr'haptique, situation finale

6.3.4 Au final

Nous avons pu faire tester notre prototype de manière informelle par quelques personnes non(ou mal)-voyantes. Il leur a été par exemple demandé de citer les régions

frontalières à une région donnée, et cette tâche a été facilement réalisée. Comparé à l'utilisation de la balise <map> en HTML, la localisation relative autorise l'appréhension des positions. Il est par exemple possible d'effectuer des aller-et-retours entre deux zones pour s'assurer de leurs positions, puis de passer à une troisième zone, et ainsi de suite. Une autre question qui a été posée était de citer les régions que l'on traverse pour aller d'une zone à une autre. Ici encore, les retours ont été excellents.

Tous nos testeurs ont donc souligné l'intérêt de l'approche, tout en regrettant de ne pas disposer d'un accès à une information géographique plus large, comme c'est par exemple le cas sur des web-services (non-accessibles cependant aux non-voyants) comme Google Maps², Yahoo Local³, ou encore MSN Virtual Earth⁴.

La viabilité de notre approche est tout de même clairement apparue, et nous avons pu nous tourner vers un autre domaine : la musique.

6.4 Application à la musique : Music'Haptic

Dans cette partie, nous présentons Music'Haptic, un prototype d'application d'enseignement de la musique, via la découverte des notes et des accords. Le retour audio de la localisation relative sera évidemment des notes de musique. Pour les points haptiques, nous allons avoir besoin d'une notation spatiale de l'information musicale.

6.4.1 Spatialisation de l'information musicale et apprentissage

La théorie de l'harmonie de Longuet-Higgins (LONGUET-HIGGINS, 1962A,B) propose l'utilisation d'un tableau de notes. La représentation de Longuet-Higgins a été un des premiers cadres théoriques permettant d'expliquer la perception et les traitements cognitifs mis en œuvre lors de l'écoute harmonique. La théorie de Longuet-Higgins (LONGUET-HIGGINS, 1962A,B) affirme que les intervalles qui interviennent dans la musique tonale occidentale sont ceux entre les notes dont la fréquence peut s'exprimer comme produit des trois facteurs principaux 2, 3, et 5 et aucun autre. Une fois assimilé cette assertion, il s'ensuit que l'ensemble constitué des intervalles de l'octave (8 tons), de la quinte juste (5 tons) et de la tierce majeure (3 tons) est le seul système de coordonnées capable de représenter une note quelconque de manière unique (selon un triplet de valeur suivant les trois axes). Ceci peut être représenté graphiquement en rangeant les notes dans une grille en trois dimensions, selon les tierces, les quintes et les

²<http://maps.google.fr>

³<http://maps.yahoo.com/>

⁴<http://local.live.com>

octaves. Enfin, il est fréquent d' « oublier » de noter l'octave, du fait de l'équivalence entre deux notes séparées par cet intervalle, afin de se concentrer sur les deux autres dimensions : les quintes justes sont alors sur un axe et les tierces majeures sont sur l'autre (figure 6.22).

Plus tard, STEEDMAN (1972) a proposé une notation dérivée de celle de Longuet-Higgins et nous la détaillerons dans la prochaine section.

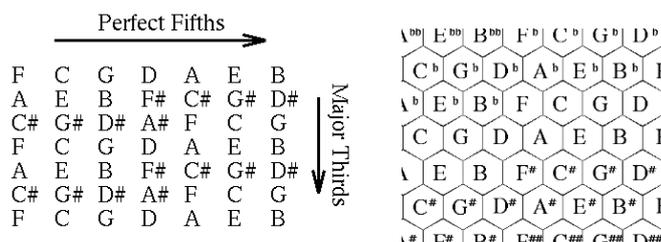


FIG. 6.22 – Représentations de Longuet-Higgins (à gauche) et de Steedman (à droite)

La théorie de Longuet-Higgins a été très étudiée en psychologie cognitive de la musique (HOWELL *et al.*, 1985) en tant que cadre pour expliquer comment s'effectuait la perception et le traitement de l'harmonie tonale. Plus tard, cette théorie a été appliquée pour développer de nouveaux outils éducatifs pour la musique. Par exemple, les travaux de Holland (HOLLAND, 1987, 1992) sont basés sur la notation de Longuet-Higgins afin de produire des interfaces interactives dans lesquelles les notes, les intervalles, les accords, les cadences ou les modulations, peuvent être directement manipulées et visualisées, grâce à une métaphore spatiale.

L'ordinateur a beaucoup été utilisé pour l'apprentissage de la musique. Et comme résultante de la nature pluridisciplinaire du domaine, les approches employées peuvent être très différentes. On pourra se référer à (BRANDAO, 1999) pour une étude exhaustive des techniques employées.

Plusieurs contextes ont été employés dans ces tâches :

- la visualisation graphique : (HOLLAND, 1987) et (CASTAING, 2004)
- l'intelligence artificielle : (HOLLAND, 1999)
- l'analyse et la composition assistée par ordinateur

Pour autant, ces approches oublient souvent les utilisateurs ayant une déficience visuelle. L'accessibilité à la notation musicale pour les personnes non-voyantes, est généralement basée sur la transcription linéaire de la partition, en Braille. Les applications informatiques (BRAILLE MUSIC EDITOR, 2002) et (TOCCATA, 2002) fonctionnent de cette façon. Mais cela implique la connaissance préalable des notions musicale et harmoniques, ainsi que du Braille musical.

6.4.2 La représentation de Steedman

Comme nous venons de le voir, selon la théorie de Longuet-Higgins, tous les intervalles de la musique tonale peuvent être représentés comme une combinaison d'octave, de quinte juste et de tierce majeure.

Mark STEEDMAN (1972) a proposé une autre notation, en décalant les lignes de l'espace, de manière à pouvoir intercaler les tierces mineures dans le plan. On se retrouve maintenant avec six voisins par notes, et donc, avec une représentation hexagonale (figure 6.23).

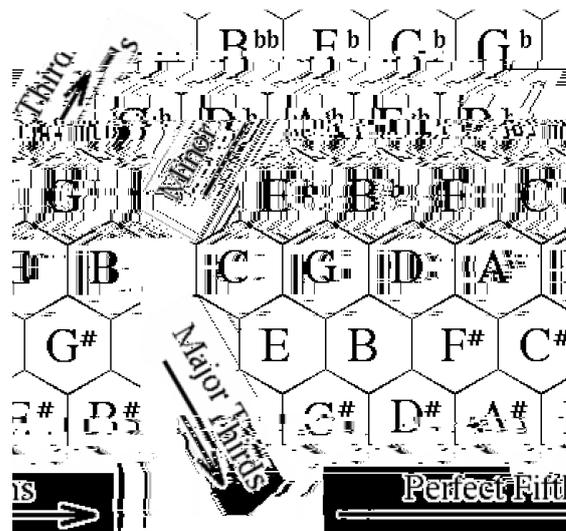


FIG. 6.23 – La représentation de Steedman et ses trois axes harmoniques

Nous avons choisi cette notation, pour lui appliquer la localisation relative. En effet, par rapport à la notation de Longuet-Higgins, les voisins d'une note sont équidistants. Donc, la loi de FITTS (1954) nous donne un temps égal pour accéder à chacun de ces voisins. De plus, ces six notes voisines peuvent être considérées comme étant les notes les plus « harmoniquement proches » de la note centrale.

Par rapport à la représentation originale, nous avons procédé à une rotation de 90 degrés dans le sens direct, de manière à préserver la corrélation intuitive que l'on peut avoir entre la hauteur du son (sa fréquence), et la direction à l'écran : plus la position est haute sur l'écran, plus le son a une fréquence élevée.

Les principales caractéristiques de notre représentation (figure 6.24) sont :

- l'axe vertical est constitué d'un empilement de quintes justes. Une des caractéristiques de cet intervalle se retrouve : en parcourant les notes sur cet axe, on passe successivement par toutes les notes, avant de reboucler au bout de 12 notes.
- l'axe diagonal allant vers le haut à droite, est constitué des tierces majeures. De manière similaire à ce que l'on a pour les quintes justes, il y a un comportement cyclique, et on retombe sur la même note au bout de 3 notes.
- l'autre axe diagonal contient les tierces mineures. Son cycle fait 4 notes de long.

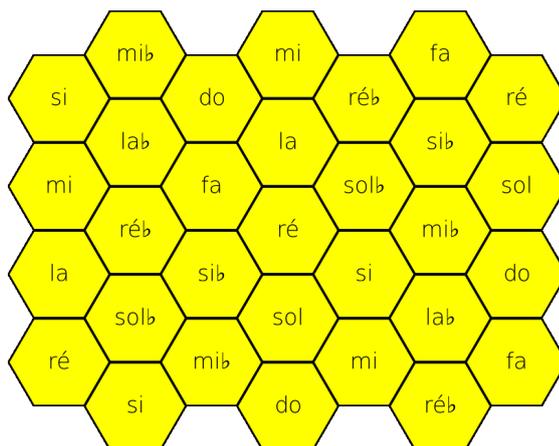


FIG. 6.24 – La représentation de Steedman, telle qu'elle est implémentée

La plus importante des caractéristiques de cette notation (et de celle de Longuet-Higgins) est la suivante : un accord est constitué de plusieurs notes jouées en même temps. Sur la représentation, on peut noter un accord en ne gardant que les notes jouées. Il se trouve qu'en notant les principaux accords de la musique occidentale, on trouve des formes spécifiques ; qui plus est, ces formes ne varient pas avec la tonalité de l'accord. La figure 6.25) montre les accords que nous considérons. Il faut bien garder à l'esprit que ces formes (par exemple le triangle isocèle pointant vers la droite pour la quinte majeure) restent les mêmes quelle que soit la tonalité de l'accord.

Nous allons nous baser sur cette propriété pour créer un outil d'apprentissage des accords, pour un utilisateur non-voyant. En effet, après une phase d'apprentissage, l'utilisateur pourra reconnaître la nature d'un accord, d'après sa forme sur la notation.

Autre avantage de cette notation, surtout dans une tâche d'apprentissage : deux accords d'une même nature peuvent avoir deux formes différentes dans la notation musicale traditionnelle ; on retrouvera quoi qu'il arrive la même forme spécifique dans la notation hexagonale. Sur la figure 6.26, le même accord de 7^{ème} diminuée peut avoir deux formes différentes. Avec la notation de Steedman, cet accord est constitué de quatre hexagones alignés, quelle que soit la tonalité.

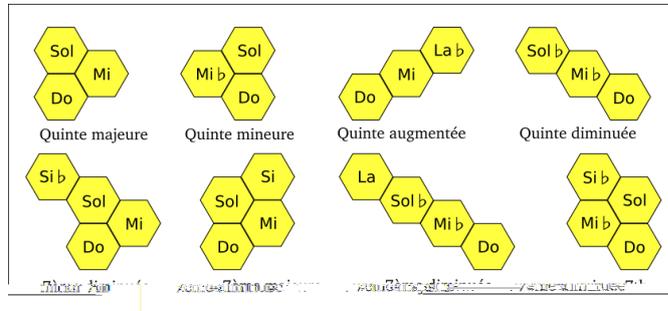


FIG. 6.25 – Les accord implémentés

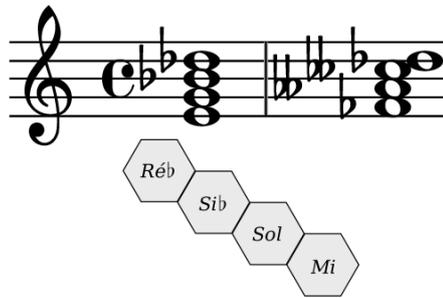


FIG. 6.26 – Des formes différentes dans la notation musicale, pour le même accord de 7ème.

De plus, si deux accords semblent avoir la même forme dans la notation musicale traditionnelle, leurs natures peuvent être différentes. Par exemple, sur la figure 6.27, les deux accords se ressemblent. Pourtant, l'un est un accord de quinte majeure, et l'autre un accord de quinte mineure, qui est représenté dans la notation hexagonale par un triangle pointant à droite ou à gauche.

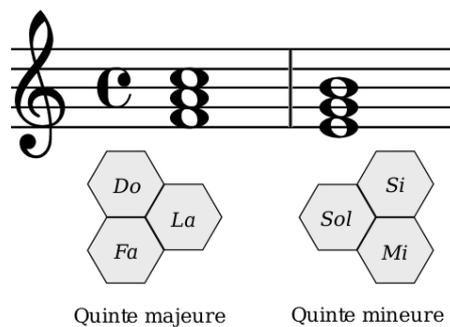


FIG. 6.27 – La même forme dans la notation musicale, pour des accords différents : Quinte majeure à gauche, et quinte mineur à droite

6.4.3 Music'haptic : le prototype

D'un point de vue système, le fonctionnement de Music'haptic est schématisé sur la figure 6.28. Nous avons eu recours à des script CGI exécutés sur le serveur, afin de générer les document graphiques (la notation musicale traditionnelle, et les portions de SVG), demandés par les requêtes utilisateurs.

Dans notre prototype, nous nous appuyons sur la représentation de Steedman afin de présenter les différents accords à l'utilisateur.

Deux modes sont disponibles :

- le mode damier : dans ce mode, l'utilisateur peut librement explorer l'ensemble du damier d'hexagones. Chaque note est « affichée » avec un effet de retour de force, magnétisant le pointeur en son centre (figure 6.29). La note est jouée en même temps.
- le mode accord : ici, l'utilisateur peut isoler un accord, et n'explorer que celui-ci. C'est grâce à ce mode, que l'utilisateur peut progressivement appréhender la forme spécifique à une nature d'accord.

Le clavier permet de basculer entre les différents modes, ainsi que de choisir l'accord à explorer ou à étudier (quinte majeur, quinte augmentée, etc. voir la figure 6.25).

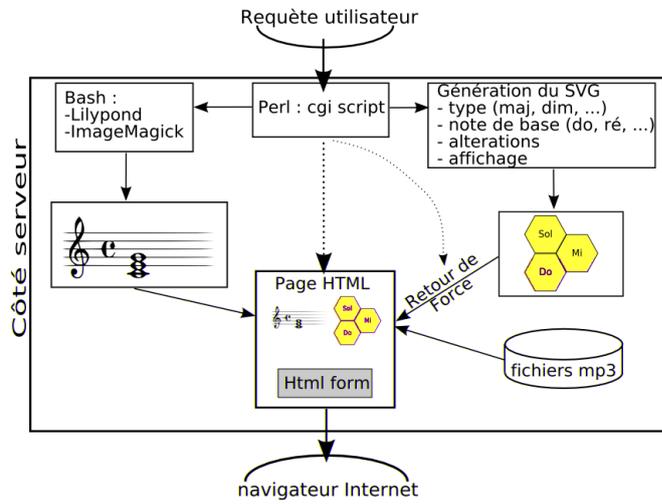


FIG. 6.28 – Survol du système

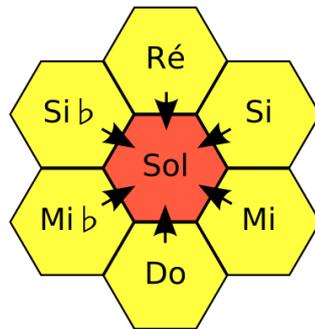


FIG. 6.29 – Une note et son retour de force

La dernière possibilité de ce prototype est la génération dynamique des accords sélectionnés, en notation musicale classique (sur une portée, en clé de sol). Ainsi, l'information musicale est disponible sous deux formes visuelles, dont une classique, et ce de manière à permettre l'apprentissage, le partage entre utilisateur de la souris et enseignant (voyant).

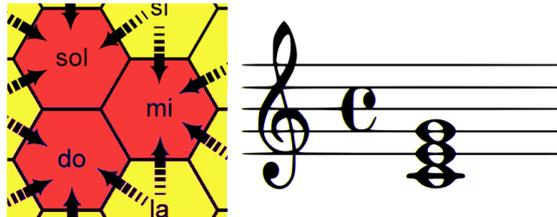


FIG. 6.30 – Le retour de force sur l’affichage hexagonal, et la notation musicale, dynamiquement générée

6.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre proposition de contexte d’utilisation d’une souris à retour de force dans un cadre d’accessibilité : la localisation relative, illustrée par la métaphore du levier de vitesse.

Deux protocoles de test nous ont permis d’entrevoir les possibilités et les limites de la localisation relative, à savoir :

- l’approche est probante en terme de mémorisation, tant que le nombre de zones haptiques reste raisonnable (< 9) ;
- l’effet de l’habitude d’utilisation de la souris est important ;
- le temps d’exploration sur une surface haptique est linéaire en n .

Nous avons également développé deux applications qui répondent aux critères énoncés et qui exploitent les possibilités de la localisation relative. Pour autant, c’est le périphérique en soi (la souris Wingman), qui limite le plus les prototypes réalisés.

Nous en concluons néanmoins, que la localisation relative est une approche viable, si ce n’est la seule, quant à l’utilisation des périphériques de pointage à retour de force, dans un cadre d’accessibilité.

Conclusion et perspectives

7.1 Des dispositifs, des interactions, de l'accessibilité

Du travail réalisé pour cette thèse, nous pouvons tirer plusieurs enseignements quant à nos questions initiales :

- L'utilisation de la modalité haptique détient un réel potentiel en matière d'interaction, en général, et en matière d'accessibilité, en particulier ;
- concernant le potentiel d'interaction, l'abus de retour de force réduit les performances ; pour autant, une modélisation dynamique de la force, permet de corriger en partie ce problème.
- les dispositifs de pointage à retour de force permettent d'améliorer l'accessibilité à l'information en l'absence du mode visuel, pour autant que l'on considère les limites de ces dispositifs (voir point suivant) ;
- la localisation relative, illustrée par la métaphore du levier de vitesse, restreint l'utilisation des dispositifs de pointage à retour de force à la prise de connaissance des positions, en évitant les informations de formes et de textures. Pourtant, sa mise en œuvre s'est avérée viable dans des domaines aussi varié que la géographie et la musique.

De plus, nous avons produit et utilisé un schéma de conception enseignant-élève basée sur MVC, dans un contexte Web. Les communications client-serveurs de ce schéma étant asynchrones (AJAX), il autorise une interaction continue sans re-chargement des pages.

7.2 Pour aller plus loin...

7.2.1 D'autres applications de la localisation relative

Nous pouvons imaginer d'autres utilisations à la localisation relative, en passant en revue quelques utilisations du formalisme XML.

- Chimie haptic : Le format de fichier CML (Chemical Markup Language) est l'implémentation XML de descriptions de molécules chimiques. Nous présentons en annexe (page 153) une feuille de style XSLT (le langage de transformation d'un formalisme XML en un autre) qui transforme un fichier CML décrivant une molécule en deux dimension, en un fichier SVG exploitable avec notre approche.
- Body'Haptic (figure 7.1) : L'approche est ici plus indirecte. Nous avons cherché à appliquer à la 3D, la localisation relative. Le SVG ne serait ici d'aucun secours, et nous nous sommes tourné vers son équivalent en 3D : le X3D. Du côté périphérique, c'est toujours un dispositif de pointage qui a été utilisé, mais tridimensionnel : le PHANTOM de Sensable.

Nous avons choisi comme champ d'application, l'exploration du corps humain. L'approche s'est encore avérée viable, mais ce sont les données qui sont plus difficile à obtenir. Le format X3D n'est de plus pas encore normalisé par le W3C, et son affichage dans un navigateur internet n'est possible que par l'utilisation de plugins dont le développement est plus ou moins avancé. Nous avons donc développé une application qui n'est pas en ligne pour tester, et en sommes resté à une exploration des os du corps humain.

- à plus long terme, les interfaces graphiques : le XUL de Mozilla et le XAML de Microsoft sont des applications du XML visant à décrire des interfaces graphiques. Nous n'avons pas plus développé dans ce sens ; cependant, l'approche semble possible.

7.2.2 D'autres dispositifs : les écrans tactiles à retour haptique

7.2.2.1 Motivations, justifications

Comme nous l'avons plusieurs fois noté, tout au long de ce document, nous avons souffert de la nature même des dispositifs que nous avons étudiés : les périphériques de pointage telles que la souris ou le PHANTOM.

L'idée est alors venue qu'une approche quasi magique viendrait d'un écran tactile disposant d'un retour de force. Écran tactile pour permettre l'interaction directe, avec pourquoi pas plus d'un doigt à la fois. Et la boucle kinesthésique serait réalisée directement sur le dispositif, et non pas au travers de celui-ci.

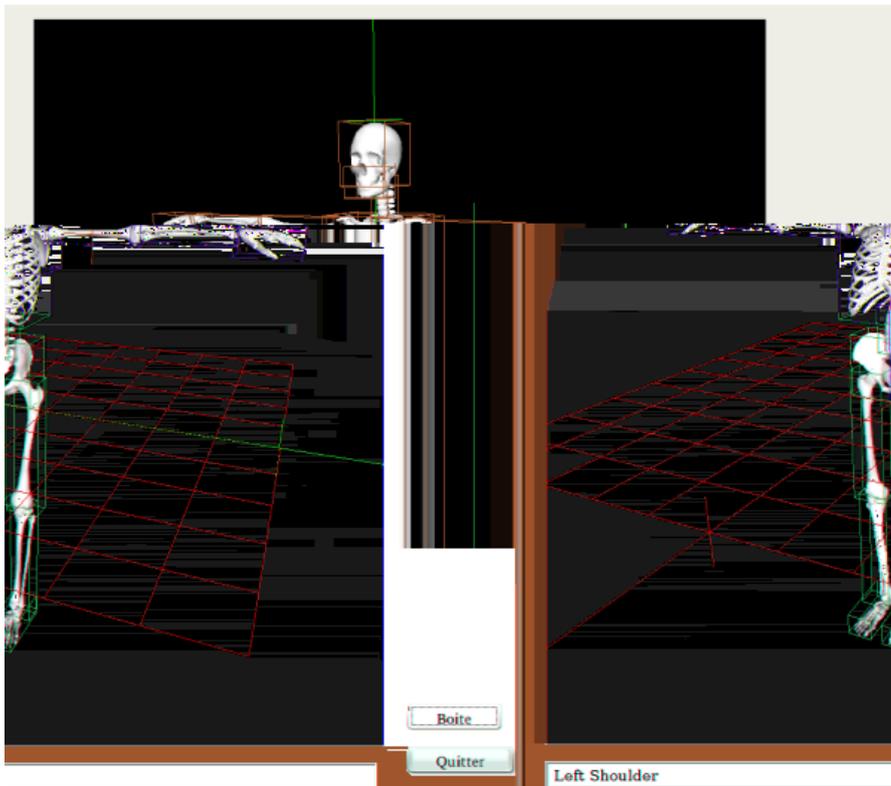


FIG. 7.1 – le prototype Body'Haptic

7.2.2.2 Réalisations industrielles récentes

La firme Alpine ¹ a proposé un écran tactile disposant d'un retour tactile (figure 7.2). Le rôle de ce dispositif est la manipulation de l'autoradio, sans avoir nécessairement besoin de regarder l'écran. Cette approche reprend exactement notre positionnement dans le domaine de l'accessibilité. Néanmoins, le dispositif n'est à priori pas programmable.



FIG. 7.2 – IVA-D300 (DVD/CD/MP3/WMA Receiver/Mobile Multimedia Station)

La société Immersion ², conceptrice de la souris que nous avons utilisée a également proposé récemment un écran tactile à retour tactile, le TouchScreen (figure 7.3). La société immersion est déjà spécialisée dans les périphériques à retour de force (manettes de jeu, souris, outils chirurgicaux), et le touchscreen semble particulièrement adapté aux domaines de la recherche dans l'interaction haptique. C'est le dispositif, qui selon nous, permettrait d'exploiter au mieux la localisation relative, avec d'autres possibilités, en matière de bi-manualité notamment.

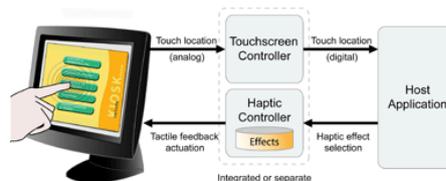


FIG. 7.3 – Immersion tactile touchscreen

Enfin, Tactiva ³, une start-up californienne a proposé le tactapad (figure 7.4). Ce dispositif propose la bi-manualité et le retour tactile. Néanmoins, il ne s'agit pour le

¹http://www.alpine-usa.com/products/leading_technology/leading_tech_iva-d300.htm

²<http://immr.client.shareholder.com/ReleaseDetail.cfm?ReleaseID=164236>

³<http://tactiva.com/tactapad.html>

moment que d'un prototype, non encore disponible sur le marché, et encore moins accessible dans un but de recherche. Il s'agit pourtant de la tentative la plus avancée, et la plus prometteuse en la matière.



FIG. 7.4 – le tactapad : peut-être le dispositif parfait ?

7.2.2.3 Problèmes subsistants

Toutes ces tentatives n'ont pas encore montré leur potentiel. D'après les caractéristiques techniques, il semblerait de plus que tous ces écrans manquent de précision, et ceci pourrait être préjudiciable : il faudrait par exemple qu'ils soient capables de rendre des caractères brailles, dans un but d'accessibilité.

7.2.3 Le mot de la fin

Au final, cette thèse illustre bien le domaine de l'interaction homme-machine, du fait de sa pluri-disciplinarité. Notre étude nous aura en effet amené à traiter des neurosciences, de génie logiciel, d'interaction haptique, de la problématique de l'accessibilité, des architectures logiciels en contexte Web avec la problématique de la communication client-serveur asynchrone, et enfin de la représentation des données (en passant d'une partition musicale à un plan d'hexagones).

Les multiples aspects de l'Interaction Homme-Machine auront été à la base du plaisir que j'ai eu à travailler sur cette thèse.

Liste des publications

Liste des publications

- BAPTISTE-JESSEL, N. et TORNIL, B. (2004). Using svg and a force feedback mouse to enable blind people to access graphical web based documents. *In 9th International Conference on Computers Helping People with Special Needs, Paris*, pages 228–235.
- JESSEL, N., TORNIL, B. et ENCELLE, B. (2002). BME Braille Music Editor : une solution pour l’accessibilité de l’information musicale par les non-voyants, Paris. *In Journée thématique BrailleNet 2002 : Livres et Cartables électroniques pour l’intégration scolaire des jeunes handicapés visuels, Paris (FRANCE)*.
- LANGOLFF, D., JESSEL, N., LEVY, D. et TORNIL, B. (2001). MFB (Music For the Blind) : automatic transcription and creation of musical scores into Braille . *In 6th European Conference for the advancement of assistive technology , Ljubljana, Slove-*
nie.
- TORNIL, B. (2004). Accessibilité à l’harmonie grâce à une souris à retour de force et une notation spatiale. *In Rencontre Jeune Chercheurs en Interaction Homme-Machine’04, Laca-*
nanau.
- TORNIL, B. et BAPTISTE-JESSEL, N. (2001a). Geogr’haptic : Using svg and a force feedback mouse to enable blind people to access geographic web based document. *In HCI International 2001 : 9th International Conference on Human-Computer Inter-*
action, New-Orleans, USA, pages 78–80.
- TORNIL, B. et BAPTISTE-JESSEL, N. (2001b). Utilisation d’une souris à retour de force pour présenter des documents géographiques à des non-voyants. *In IHM-HCI’2001, Lille*, volume 2, pages 61–62.

LISTE DES PUBLICATIONS

TORNIL, B. et BAPTISTE-JESSEL, N. (2004). Use of force feedback pointing devices for blind users. *In 8th ERCIM Workshop "User Interfaces For All", Wien, Austria*, pages 477–485. 50

TORNIL, B. et BAPTISTE-JESSEL, N. (2005a). Music haptic : Musical harmony notions for all with a force feedback mouse and a spatial representation. *In International Computer Music Conference, Barcelona, Spain*, pages 439–442.

TORNIL, B. et BAPTISTE-JESSEL, N. (2005b). Retour de force et performances lors d'une tâche de pointage. *In 17ème Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine, Toulouse*.

Bibliographie

Bibliographie

- ACCOT, J. et ZHAI, S. (1997). Beyond fitts' law : Models for trajectory-based hci tasks. *In Proceedings of ACM CHI 97 Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 295–302. 17
- ACCOT, J. et ZHAI, S. (1999). Performance evaluation of input devices in trajectory-based tasks : An application of the steering law. *In Proceedings of ACM CHI 99 Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 466–472. XIV, 40
- AKAMATSU, M. et MACKENZIE, I. S. (1996). Movement characteristics using a mouse with tactile and force feedback. *Human-Computer Studies*, 45:483–493. 66, 71
- APPELLE, S. (1991). Haptic perception of form : activity and stimulus attributes. *In* SCHIFF, A. H. M. . W., éditeur : *Psychology of touch*, pages 169–188. Lawrence Erlbaum Associate, Hillsdale, New Jersey. 9
- ASCHER, F., CORVEST, H., FOURNIER, R., COLINOT, J.-P. et MOBUCHON, P. (2002). Homere, système haptique pour une découverte virtuelle de l'espace. *In Livres et Cartables Electroniques pour l'Intégration Scolaire des Jeunes Handicapés Visuels*. 90
- BALAKRISHNAN, R. (2004). "beating" fitts' law : virtual enhancements for pointing facilitation. *International Journal of Human-Computer Studies*, 61:857–874. 64
- BASDOGAN, C., HO, C.-H. et SRINIVASAN, M. A. (2000). An experimental study on the role of touch in shared virtual environments. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 7:443–460. 58

- BAUDEL, T. (1995). *Aspects Morphologiques de l'Interaction Humain-Ordinateur : Étude de Modèles d'Interaction Gestuels*. Thèse de doctorat, Université de Paris Sud. XIV, 31, 35, 42, 44
- BAUDISCH, P., CUTRELL, E., ROBBINS, D., CZERWINSKI, M., TANDLER, P., BEDERSON, B. et ZIERLINGER, A. (2003). Drag-and-pop and drag-and-pick : techniques for accessing remote screen content on touch and pen-operated systems. *Proceedings of Interact*, page 57 ?64. 64
- BAXTER, W. V., SCHEIB, V. et LIN, M. C. (2001). dAb : Interactive haptic painting with 3D virtual brushes. In FIUME, E., éditeur : *SIGGRAPH 2001, Computer Graphics Proceedings*, pages 461–468. ACM Press / ACM SIGGRAPH. xv, 60
- BEAUDOUIN-LAFON, M. (1997). Ingénierie des systèmes interactifs. [http ://www-ihm.lri.fr/~mbl/ENS/IHM/ecole-in2p3/Cours/index.html](http://www-ihm.lri.fr/~mbl/ENS/IHM/ecole-in2p3/Cours/index.html). 30
- BELGHIT, I. (2002). *Codage Bidirectionnel du Geste en Réseau : Amélioration d'ergonomie du télégeste, sur réseau à retard, par utilisation de prédicteurs statistiquement pertinents*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier de Grenoble. 59
- BERTHOZ (1997). *Le Sens du Mouvement*. Éditions Odile Jacob. 8
- BLANCH, R., GUIARD, Y. et BEAUDOUIN-LAFON, M. (2004). Semantic pointing : improving target acquisition with control-display ratio adaptation. In *Proceedings of the ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 519–525. 65
- BRaille MUSIC EDITOR (2002). web site at : [http ://www.dodiesis.com/](http://www.dodiesis.com/). 122
- BRANDAO, P. . W. (1999). Computers in music education. In *Proceedings of the AISB'99 Symposium on Musical Creativity*,. AISB. 122
- BROOKS, F. J., OUH-YOUNG, M., BATTER, J. et JEROME, A. (1990). Project grope ? haptic display for scientific visualisation. *Computer Graphics*, 24(4):177–185. 45, 65
- BURDEA, G. (1996). *Force and touch feedback for virtual reality*. Wiley-Interscience ; 1 edition (August 3, 1996). XIX, 11
- BURDEA, G., ZHUANG, J., ROSKOS, A., SILVER, D. et LANGRANA, N. (1992). A portable dextrous master with force feedback. *Presence-Tele-operators and Virtual Environments*, 1(1):18–27. MIT Press, Cambridge, MA. 47
- BUXTON, W. (1983). Lexical and pragmatic considerations of input structures. *Computer Graphics*, 17(1):31–37. 38

-
- BUXTON, W. (1986). Chunking and phrasing and the design of human-computer dialogues. *In Proceedings of the IFIP World Computer Congress*, pages 475–480, Dublin, Ireland. XIV, 43
- CADOZ, C. (1994). *Les réalités virtuelles*. Dominos, Flamarion. 23, 73
- CALAS, A. (1998). *Précis de Physiologie*. Doin, Paris. XIX, 7
- CALLAHAN, J., HOPKINS, D., WEISER, M. et SHNEIDERMAN, B. (1988). An empirical comparison of pie vs. linear menus. *Proceedings of the ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 95–100. 64
- CARD, S., MACKINLAY, J. et ROBERTSON, G. (1991). A morphological analysis of the design space of input devices. *ACM Transactions on Information Systems*, 9(2):99–122. XIV, 38, 39
- CARD, S., MORAN, T. et NEWELL, A. (1983). *The Psychology of human computer interaction*. Hilglade N.J. Lawrence Erlbaum. 34, 36
- CASIEZ, G. (2004). *Contribution à l'étude des interfaces haptiques. Le DigiHaptic : un périphérique haptique de bureau à degrés de liberté séparés*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille. xv, 14, 47, 55
- CASTAING, J. (2004). Musicdraw : to make music learning attractive. *In Forth MUSIC-NETWORK Open Workshop : <http://www.interactivemusicnetwork.org/>*, Barcelona, Spain. Universitat Pompeu Fabra. 122
- CHOLEWIAK, R. et COLLINS, A. (1991). Sensory and physiological bases of touch. *In HELLER, M. et SCHIFF, W., éditeurs : The Psychology of Touch*, pages 23–60. Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ. 11
- COLWELL, C. (1998). Haptic virtual reality for blind computer users. *In Proceedings of ASSETS'98, Third International Conference on Assistive Technologies*, pages 92–99. 88
- COLWELL, C. (2001). *Non-visual access to the World Wide Web : evaluation of design guidelines and haptic devices*. Thèse de doctorat, University of Hertfordshire. 8, 91
- COUTAZ, J. (1990). *Interfaces homme-ordinateur*. Dunod. XIV, 35
- COUTAZ, J. et CAELEN, J. (1991). A taxonomy for multimedia and multimodal user interface. *Proceedings 1 st ERCIM Workshop on Multimodal Human-Computer Interaction*, INESC:143–148. 32

- CUTKOSKY, M. et HOWE, R. (1990). Human grasp choice and robotic grasp analysis. In VENKATARAMAN, S. et IBERALL, T., éditeurs : *Dextrous Robot Hands*, pages 5–31. Springer Verlag, New York. 26
- DENNERLEIN, J. T., MARTIN, D. B. et HASSER, C. (2000). Force-feedback improves performance for steering and combined steering-targeting tasks. In *CHI '00 : Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 423–429. ACM Press. 66
- DENNERLEIN, J. T. et YANG, M. C. (2001). Haptic force-feedback devices for the office computer : Performance and musculoskeletal loading issues. *Human Factors*, 43(2):278–86. 66
- DUFRESNE, A., MARTIAL, O. et RAMSTEIN, C. (1995). Multimodal user interface system for blind and 'visually occupied' users : Ergonomic evaluation of the haptic and auditive dimensions. In *Proceedings of IFIP International Conference Interaction'95, Lillehammer, Norway*, pages 163–168. 81, 89
- EBERHARDT, S., NEVEROV, M., WEST, T. et SANDERS, C. (1997). Force reflection for wimps : A button acquisition experiment. In *Sixth Annual Symposium on Haptic Interfaces, International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Dallas Texas*. 66, 71
- FAINETEAU, H., GENTAZ, E. et VIVIANI, P. (2003). The kinaesthetic perception of euclidean distance : a study of the detour effect. *The Experimental Brain Research*, 152(2):166–172. 25, 94
- FITTS, P. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47:381–391. 15, 64, 123
- FLASH, T. et HOGAN, N. (1985). The coordination of arm movements : an experiment confirmed mathematical model. *The Journal of Neuroscience*, 5(7):1688–1703. 19, 20
- FOLEY, J. D., WALLACE, V. L. et CHAN, P. (1984). The human factors of computer graphics interaction techniques. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 4(11):13–48. 38
- FRITZ, J. P. et BARNER, K. E. (1996). Design of haptic graphing method. In *Proceedings of RESNA-96 Annual Conference, Salt Lake City, USA*, pages 158–160. 86, 88
- FRITZ, J. P. et BARNER, K. E. (1999). Design of a haptic visualisation system for people with visual impairments. In *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, pages 372–384. 86

-
- FUCHS, P. et MOREAU, G. (2003). *Le Traité de la Réalité Virtuelle*, volume 1, chapitre Fondements et interfaces comportementales. Ecole des Mines de Paris, 2 édition. 13
- GARDNER, J. A. et BULATOV, V. (2001). Smart figures, svg, and accessible web graphics. *In Proceedings of Technology And Persons With Disabilities Conference 2001, Los Angeles*. 50, 87, 119
- GIBSON, J. J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Boston : Houghton Mifflin. 9
- GOERTZ, R. (1952). Fundamentals of general-purpose remote manipulators. *Nucleonics*, 1010 (11:36–42). 44
- GRANT, A., THIAGARAJAH, M. et SATHIAN, K. (2000). Tactile perception in blind braille readers : A psychophysical study of acuity and hyperacuity using gratings and dot patterns. *Perception and Psychophysics*, 62:301–31. 80
- GREGORY, A., EHMANN, S. et LIN., M. C. (2000). intouch : Interactive multiresolution modeling and 3d painting with a haptic interface. *In Proceedings of IEEE Virtual Reality Conference 2000*. 58
- HARDWICK, A., FURTHER, S. et RUSH, J. (1998). Tacile display of virtual reality from the world wide web - a potential access method for blind people. *Display*, 18, Issue 3:151–161. 87
- HASSER, C. et GOLDENBERG, A. (1998). User performance in a gui pointing task with a low-cost force-feedback computer mouse. *In Seventh Annual Symposium on Haptic Interfaces, International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Anaheim, CA*. 66, 71
- HATWELL, Y. (1993). Non-visual human-computer interactions. *In Colloque INSERM / John Libbey Eurotext Ltd*, volume 228, pages 13–35. 80
- HATWELL, Y. (1994). *Traité de psychologie expérimentale*. Paris, P.U.F. 6
- HELLER, M. (1989). Texture perception in sighted and blind observers. *Perception and Psychophysics*, 45:49–54. 80
- HOLLAND, S. (1987). Direct manipulation tools for novices based on new cognitive theories of harmony. *In Proceedings of 1987 International Computer Music Conference*, pages 182 –189. 122
- HOLLAND, S. (1992). *Multimedia Interface Design in Education*, chapitre Interface Design for Empowerment : A case study from music. Springer Verlag. 122

BIBLIOGRAPHIE

- HOLLAND, S. (1999). Artificial intelligence in music education : a critical review. In MIRANDA, E., éditeur : *Readings in Music and Artificial Intelligence, Contemporary Music Studies*, volume 20. Harwood Academic Publishers, The Netherlands. 122
- HOWELL, P., CROSS, I. et WEST, R., éditeurs (1985). *Musical Structure and Cognition*. Academic Press, London. 122
- HYMAN, R. (1953). stimulus information as a determinant of reaction time. *Journal of Experimental Psychology*, 45:423–432. 111
- IMMERSION CORPORATION (2005). web site at : <http://www.immersion.com>. 47, 67
- JACKO, J. et SEARS, A., éditeurs (2002). *The Human-Computer Interaction Handbook : Fundamentals, Evolving Technologies and Emerging Applications*. Lawrence Erlbaum & Associates, New Jersey. XIV, 34
- JANSSON, G. (2000). The haptic sense interacting with a haptic display. Paper presented to the Swedish Symposium on Multimodal Communication, Stockholm,. 53
- JANSSON, G. et K., B. (1999). The PHANToM used without visual guidance. In *The first PHANToM Research Symposium*, Heidelberg, Germany. 53
- KALAWSKY, R. (1993). *The Science of Virtual Reality and Virtual Environments*. Addison-Wesley Ltd, UK. 11
- KEATES, S., HWANG, F., LANGDON, P. et CLARKSON, J. (2002). The use of cursor measures for motion-impaired computer users. *Universal Access in the Information Society*, 2(1):18–29. 73
- KURTENBACH, G. et BUXTON, W. (1991). Issues in combining marking and direct manipulation techniques. In RHYNE, J. R., éditeur : *Proceedings of the 4th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pages 137–144, Hilton Head, South Carolina, United States. XIV, 43
- LACQUANTINI, F. a. et VIVIANI, P. (1983). The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements. *Acta Psychologica*, 54:115–130. 19
- LAMBERT, j.-p., GOSSSELIN, f., RODET, x., PASCAL, m. et ROLAND, c. (2005). the phase project : haptic and visual interaction for music exploration. In *International Computer Music Conference*, Barcelona. XV, 60
- LANGRANA, N., BURDEA, G., LANGE, K., GOMEZ, D. et DESHPANDE, S. (1994). Dynamic force feedback in a virtual knee palpation. *J. of Artificial Intelligence in Medicine*, 6:321–333. 57

-
- LECOLINET, E. et MOURET, G. (2005). Tactiball, tactipen, tactitab ou comment « toucher du doigt » les données de son ordinateur. *In IHM2005, 17^e conférence francophone sur l'interactio homme-machine*. 52
- LEDERMAN, S. et KLATSKY, R. (2004). Haptic identification of common objects : Effects of constraining the manual exploration process. *Perception & Psychophysics*, 66(4):618–628. 53
- LEDERMAN, S. et TAYLOR, M. (1972). Fingertip force, surface geometry and the perception of roughness by active touch. *Perception and Psychophysics*, 12(5):401–408. 25
- LEDERMAN, S. J., KLATZKY, R. L. et BAJCSY, R. (1987). Haptic exploration in humans and machines : An initial overview. Rapport technique, Office of Naval Research. 24, 27, 53
- LONGUET-HIGGINS, H. (1962a). Letter to a musical friend. *Music Review*, pages 244–248. 121
- LONGUET-HIGGINS, H. (1962b). Second letter to a musical friend. *Music Review*. 121
- LOOMIS, J. M. et LEDERMAN, S. J. (1986). Tactual perception. *In* K. R. BOFF, L. Kaufman, . J. P. T., éditeur : *Handbook of perception and human performance*, pages 31–41. Wiley / Interscience, New York. 8, 9, 24
- MACKENZIE, I. S. (1992). Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction. *Human-Computer Interaction*, 7(1):91–139. 16, 68
- MACKENZIE, I. S., KAUPPINEN, T. et SILFVERBERG, M. (2001). Accuracy measures for evaluating computer pointing devices. *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI 2001*, pages 9–16. XIV, 40, 41
- MANGHI, E. (2001). *les Composantes Visuelles dans les Représentations Mentales d'itinéraire*. Thèse de doctorat, LIMSI-CNRS, Orsay. 80
- MARTIAL, O. (1998). Représentation mentale et multimodalité dans l'interaction humain-ordinateur pour des utilisateurs aveugles. *Actes du 6^{ème} Colloque ERGO IA ? 98*, pages 9–18. 80
- MCGUFFIN, M. et BALAKRISHNAN, R. (2002). Acquisition of expanding targets. *In Proceedings of the ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 57–64. 64
- MCNEILL, D. (1992). *Hand and mind : what gestures reveal about thought*. Chicago, USA : University of chicao press. 23, 73

BIBLIOGRAPHIE

- MEYER, D., SMITH, J., KORNBLUM, S., ABRAMS, R. et WRIGHT, C. (1988). Optimality in human motor performance : ideal control of rapid aimed movements. *Psychological Review*, 95:340–370. XIII, 21
- MILLER, T. et ZELEZNIK, R. (1999). The design of 3d haptic widgets. *In SI3D '99 : Proceedings of the 1999 symposium on Interactive 3D graphics*, pages 97–102, New York, NY, USA. ACM Press. 54
- MINSKY, M. (1995). *Computational Haptics : The Sandpaper System for Synthesizing Texture for with a Force-Feedback Haptic Display*. Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology. 46
- NORMAN, D. A. (1988). *The Psychology of Everyday Things*. Basic Books, New York. TS 171.4.N67. 36
- OFFEN, D. et THOMLINSON, B. (2001). Good vibrations : Using a tactile mouse to convey page layout information to visually impaired computer users. *In Proceedings of CSUN'S Sixteenth Annual International Conference : "Technology and Persons with Disabilities"*, Los Angeles. 86
- O.M.S. (1980). *International Classification of Impairments, Disabilities and Handicaps - A Manual of Classification Relating to the Consequences of Disease*. Genève : WHO (World Health Organization). 78
- RAMSTEIN, C. (1996). Combining Haptic and Braille Technologies, Design Issues and Pilot Study. *In ASSET'96, ACM/SIGCAPH. In 2nd Annual ACM Conference on Assistive Technologies, Vancouver, BC, Canada*, pages 37–44. 89
- RAMSTEIN, C., MARTIAL, O., DUFRESNE, A., CARIGNAN, M., CHASSÉ, P. et P., M. (1996). Touching and Hearing GUIs : Design issues for the PC-Access System. *In ASSET'96, ACM/SIGCAPH. In 2nd Annual ACM Conference on Assistive Technologies, Vancouver, BC, Canada*, pages 2–9. 86
- REENSKAUG, T. M. H. (1979). Models - views - controllers. Rapport technique, Xerox PARC. 101
- REINKENSMeyer, D., PAINTER, C., YANG, S., ABBEY, E. et KAINO, B. (2000). An internet-based, force-feedback rehabilitation system for arm movement after brain injury. *In Proceedings of CSUN's 15th Annual International Conference, "Technology and Persons with Disabilities"*, Los Angeles, CA. 57
- REVESZ, G. (1950). *Psychology and art of the blind*. New York : Longmans. 9
- REZNIK, M. (1997). Structure et fonctions du système nerveux cutané. *Nouv Dermatol*, 16:14 ?15. XIII, 10

-
- ROSENBAUM, D. (1991). *Human Motor Control*. Academic Press, San Diego, CA. 21, 22
- ROSENBERG, L. (1994). *Virtual Fixtures*. Thèse de doctorat, Stanford University. 61
- ROSENBERG, L. (1997). Feelit mouse : Adding a realistic sense of feel to the computing experience. 89
- SALLNÄS, E.-L. et ZHAI, S. (2003). Collaboration meets fitts'law : Passing virtual objects with and without haptic force feedback. 58
- SEOW, K. (1995). Physiology of touch, grip and gait. In WEBSTER, J., éditeur : *Tactile Sensing for Robotics and Medicine*, pages 13–40. John Wiley & Son, New York. 11
- SHERIDAN, T. (1992). Musings on telepresence and virtual presence. *Presence-Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1):120–126. MIT Press. 44, 61
- SHIMOGA, K. (1992). Finger force and touch feedback issues in dextrous telemanipulation. In NASA, éditeur : *Proceedings of NASA-CIRSSE International Conference on Intelligent Robotic Systems for Space Exploration*, Greenbelt, MD. 10
- SIEKIERSKA, E., LABELLE, R. et O'NEIL, L. (2001). Tactile mapping project at canadian federal mapping agency - mapping services branch. In COMMITTEE, S., éditeur : *20e Conférence cartographique internationale - Mapping the 21st Century (la cartographie au 21e siècle)*. société de géodésie, photogrammétrie et cartographie., pages 2932–2942, Beijing, Chine. 117
- SILE O'MODHRAIN, M. et GUILLEPSIE, R. (1996). The moose : A haptic user interface for blind persons. In *Proceedings of the Third WWW6 Conference, Santa Clara, California*. 89
- SJÖSTRÖM, C. (2001). Designing haptic computer interfaces for blind people. In *Sixth International Symposium on Signal Processing and its Applications*, volume 1, pages 68 – 71, Kuala Lumpur, Malaysia., IEEE. 89
- SJÖSTRÖM, C. (2002). *Non-Visual Haptic Interaction Design*. Thèse de doctorat, Certec - Division of Rehabilitation Engineering Research, Department of Design Sciences, Lund Institute of Technology. 88, 92
- STEEDMAN, M. (1972). *The formal description of musical perception*. Unpublished phd, University of Edinburgh, University of Edinburgh. 122, 123
- STURMAN, D. (1992). *Whole Hand Input*. Thèse de doctorat, Media Art and Sciences, MIT. 35

BIBLIOGRAPHIE

- TAYLOR, M., LEDERMAN, S. et GIBSON, R. (1973). Tactual perception of texture. *In* CARTERETTE, E. & Friedman, M., éditeur : *Handbook of Perception*, volume III, pages 251–272. Academic Press, New York. 25
- TOCCATA (2002). Optek systems. web site at : <http://members.optusnet.com.au/terryk/toccata.htm>. 122
- TORNIL, B. et BAPTISTE-JESSEL, N. (2004). Use of force feedback pointing devices for blind users. *In User Interfaces for All*, pages 479–486. 50
- TRUILLET, P. (1999). *Modélisation de coopérations intermodales : application à l'interaction non visuelle*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse 3. XX, 82
- van DAM, A. (1997). Post-wimp user interfaces. *Communications of the ACM*, 40(2): 63–67. 33
- VIVIANI, P. et FLASH, T. (1995). Minimum-jerk, two-thirds power law, and isochrony : Converging approaches to movement planning. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 21(1):32–53. 19
- WALL, S. (2000). *An investigation of temporal and spatial limitations of haptic interfaces*. Thèse de doctorat, University of Reading. XIII, 13, 25, 53
- WALL, S. et HARWIN, W. (2000). Quantification of the effects of haptic feedback during motor skills tasks in a simulated environment. *In Proceedings of the 2nd PHANToM Users Research Symposium*, pages 61–69, Zurich, Switzerland. 66, 71
- WELFORD, A. (1960). The measurement of sensory-motor performance : Survey and reappraisal of twelve years' progress. *Ergonomics*, 3:189–230. 16
- WILLIAMS, R. L., SRIVASTAVA, M., CONASTER, R. et HOWELL, J. N. (2004). Implementation and evaluation of a haptic playback system. *Haptics-e, The Electronic Journal of Haptics Research*, 3(3). 59
- WORDEN, A., WALKER, N., BHARAT, K. et HUDSON, S. (1997). Making computers easier for older adults to use : area cursors and sticky icons. *In Proceedings of the ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, page 266–271. xv, 64, 65
- YU, W., CHEUNG, K. et BREWSTER, S. (2002). Automatic haptic graph construction. *In Proceedings of EuroHaptics 2002*, pages 128–133, Edinburgh, UK. 88

- YU, W., KANGAS, K. et BREWSTER, S. (2003). Web-based haptic applications for blind people to create virtual graphs. *In Proceedings of 11th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems*, pages 318 – 325, Los Angeles, CA, USA. 88
- YU, W., MCALLISTER, G., STRAIN, P., KUBER, R. et MURPHY, E. (2005). Improving web accessibility using content-aware plug-ins. *In CHI Extended Abstracts 2005*, pages 1893–1896. 90
- YU, W., RAMLOLL, R. et BREWSTER, S. (2001). Haptic graphs for blind computer users. *Lecture Notes in Computer Science*, 2058:41–49. 50, 87
- ZHAI, S., MILGRAM, P. et BUXTON, W. (1996). The influence of muscle groups on performance of multiple degree-of-freedom input. *Proceeding of CHI '96*, pages 308–315. 41, 94

8.1 La feuille de style XSL pour transformer du CML en SVG

```
<xsl:stylesheet
  version="1.0"
  xmlns:xsl="http://www.w3.org/1999/XSL/Transform" >

  <xsl:output
    method="xml"
    indent="yes"
    doctype-public="-//W3C//DTD SVG 1.0//EN"
    doctype-system=
"http://www.w3.org/TR/2001
/REC-SVG-20010904/DTD/svg10.dtd"/>

  <xsl:template match="/">
    <svg
xmlns="http://www.w3.org/2000/svg"
viewBox ="-10 -10 20 20">
      <xsl:apply-templates/>
    </svg>
  </xsl:template>
```

```
<!--le template pour les atomes :
      on lit les coordonnées x2, y2 et le nom a de l atome-->

<xsl:template match="atom">
  <xsl:call-template name="coord">
    <xsl:with-param name="a"
      select="string"/>
    <xsl:with-param name="x2"
      select="float[@builtin='x2']"/>
    <xsl:with-param name="y2"
      select="float[@builtin='y2']"/>
  </xsl:call-template>
</xsl:template>

<!--le template pour les liaisons atomiques :
      on lit les ids des 2 atomes, et le type de de liason ord-->

<xsl:template match="bond">
  <xsl:call-template name="makeBond">
    <xsl:with-param name="id"
      select="@id"/>
    <xsl:with-param name="id1"
      select="string[1]"/>
    <xsl:with-param name="id2"
      select="string[2]"/>
    <xsl:with-param name="ord"
      select="string[3]"/>
  </xsl:call-template>
</xsl:template>

<!--le template de creation d un cercle pour un atome-->

<xsl:template name="coord">
  <xsl:param name="id">foo</xsl:param>
  <xsl:param name="a">H</xsl:param>
  <xsl:param name="x2">0</xsl:param>
  <xsl:param name="y2">0</xsl:param>
  <xsl:choose>
    <xsl:when test="$a='C' " >
```

```

<circle id="{ $id} "
xmlns="http://www.w3.org/2000/svg"
cx="{ $x2} "
cy="{ $y2} "
r="0.3"
style="fill:#00F0D0;
      stroke:#000000;
      stroke-width:0.027014193;
      stroke-miterlimit:4.0000000;
      stroke-dasharray:none"/>
</xsl:when>
<xsl:when test="$a='N' " >
<circle id="{ $id} "
xmlns="http://www.w3.org/2000/svg"
cx="{ $x2} "
cy="{ $y2} "
r="0.35"
style="fill:#F0D0D0;
      stroke:#000000;
      stroke-width:0.027014193;
      stroke-miterlimit:4.0000000;
      stroke-dasharray:none"/>
</xsl:when>
<xsl:when test="$a='O' " >
<circle id="{ $id} "
xmlns="http://www.w3.org/2000/svg"
cx="{ $x2} "
cy="{ $y2} "
r="0.4"
style="fill:#D000F0;
      stroke:#000000;
      stroke-width:0.027014193;
      stroke-miterlimit:4.0000000;
      stroke-dasharray:none"/>
</xsl:when>
<xsl:when test="$a='H' " >
<circle id="{ $id} "
xmlns="http://www.w3.org/2000/svg"
cx="{ $x2} "
cy="{ $y2} "
r="0.05"
style="fill:#00D0FF;
      stroke:#000000;

```

```
        stroke-width:0.027014193;
        stroke-miterlimit:4.0000000;
        stroke-dasharray:none"/>
    </xsl:when>
    <xsl:when test="$a='Na' " >
<circle id="{ $id} "
xmlns="http://www.w3.org/2000/svg"
cx="{ $x2} "
cy="{ $y2} "
r="0.55"
style="fill:#D000FF;
        stroke:#000000;
        stroke-width:0.027014193;
        stroke-miterlimit:4.0000000;
        stroke-dasharray:none"/>
    </xsl:when>
    <xsl:when test="$a='Cl' " >
<circle id="{ $id} "
xmlns="http://www.w3.org/2000/svg"
cx="{ $x2} "
cy="{ $y2} "
r="0.85"
style="fill:#D0FFD0;
        stroke:#000000;
        stroke-width:0.027014193;
        stroke-miterlimit:4.0000000;
        stroke-dasharray:none"/>
    </xsl:when>
    <xsl:otherwise>
<circle id="{ $id} "
xmlns="http://www.w3.org/2000/svg"
cx="{ $x2} "
cy="{ $y2} "
r="0.2"
style="fill:#A0FFA0;
        stroke:#000000;
        stroke-width:0.027014193;
        stroke-miterlimit:4.0000000;
        stroke-dasharray:none"/>
    </xsl:otherwise>
</xsl:choose>
<text
xmlns="http://www.w3.org/2000/svg"
```

```
x="{ $x2 }"
y="{ $y2 }"
style="fill:#000;text-anchor: start;font-size:0.4pt">
  <xsl:value-of select="$a"/>
</text>
</xsl:template>
```

```
<!--le template de creation
des lignes pour les liaisons-->
```

```
<xsl:template name="makeBond">
  <xsl:param name="id">foo</xsl:param>
  <xsl:param name="id1">foo1</xsl:param>
  <xsl:param name="id2">foo2</xsl:param>
  <xsl:param name="ord">1</xsl:param>
```

```
<!--on retrouve ici les coordonnees
des atomes dont on connait l id-->
```

```
<xsl:variable name="X1"
select="//molecule
/atomArray/atom
[@id=$id1]/float[@builtin='x2']"/>
<xsl:variable name="Y1"
select="//molecule
/atomArray/atom
[@id=$id1]/float[@builtin='y2']"/>
<xsl:variable name="X2"
select="//molecule
/atomArray/atom
[@id=$id2]/float[@builtin='x2']"/>
<xsl:variable name="Y2"
select="//molecule
/atomArray/atom
[@id=$id2]/float[@builtin='y2']"/>
```

```
<xsl:choose>
  <xsl:when test="$ord=1" >
<line id="{ $id }"
  xmlns="http://www.w3.org/2000/svg"
  x1="{ $X1 }"
  y1="{ $Y1 }"
```

```
        x2="{ $X2} "  
        y2="{ $Y2} "  
        style="fill:#fff;  
stroke:#000000;  
stroke-width:0.047014193;  
stroke-miterlimit:4.0000000;  
stroke-dasharray:none"/>  
    </xsl:when>  
    <xsl:otherwise>  
<line id="{ $id} "  
    xmlns="http://www.w3.org/2000/svg"  
    x1="{ $X1} "  
    y1="{ $Y1} "  
    x2="{ $X2} "  
    y2="{ $Y2} "  
    style="fill:#f00;  
stroke:#000;  
stroke-width:0.167014193;  
stroke-miterlimit:4.0000000;  
stroke-dasharray:none"/>  
    </xsl:otherwise>  
</xsl:choose>  
  
</xsl:template>  
  
</xsl:stylesheet>
```

8.2 Les technologies utilisées

8.2.1 Pour les périphériques à retour kinesthésique

Technologie	Description	Avantages	Inconvénients
Moteurs électromagnétiques	Produit un couple grâce à 2 champs magnétiques créés par 2 bobines ou une bobine et un aimant.	<ul style="list-style-type: none"> – Simple à contrôler – Propre, silencieux – Conception et installation facile 	<ul style="list-style-type: none"> – Composants lourds – Puissance faible sur les petites distances – Dissipation de la chaleur – Forces statiques
Hydraulique	Un fluide hydraulique est pressurisé par un générateur, contrôlé par des servo-valves et acheminé aux activateurs	<ul style="list-style-type: none"> – Forces, puissance en sortie, rigidité et bande passante 	<ul style="list-style-type: none"> – Masse importante – Maintenance (gestion des liquides) – Conception ardue – Prix
Pneumatique	Un gaz (couramment de l'air) est pressurisé par un générateur, contrôlé par des servo-valves et acheminé aux activateurs	<ul style="list-style-type: none"> – Force statiques – Assez légers – Maintenance assez simple 	<ul style="list-style-type: none"> – Faible bande passante – Faible rigidité pour la mise en action – Faible puissance
Technologie	Description	Avantages	Inconvénients

Technologie	Description	Avantages	Inconvénients
Piézoélectrique	Transcrit les vibrations du moteur piézoélectrique en forces utilisables tels que les couples ou les forces à basses vitesses	<ul style="list-style-type: none"> – Grandes forces pour les petites vitesses, dans un petit volume 	<ul style="list-style-type: none"> – Nécessite gestion ardue de la précision – Bruit gênant et potentiellement dangereux
Magnéto-restrictive	Les dispositifs magnéto-restrictifs changent de forme sous l'effet d'un champ magnétique	<ul style="list-style-type: none"> – Grandes forces pour les petites vitesses, dans un petit volume 	<ul style="list-style-type: none"> – Bruit gênant et potentiellement dangereux – Dissipation de la chaleur – Nécessite une gestion ardue de la précision
Alliage à mémoire de forme (SMA : Shape Memory Alloy)	Les fils et les ressorts de SMA se contractent quand ils sont chauffés et s'étendent pendant qu'ils se refroidissent sous l'effort	<ul style="list-style-type: none"> – Bon rapport puissance/masse 	<ul style="list-style-type: none"> – Peu efficace pendant une contraction – Dissipation de la chaleur – Bande passante limitée
Technologie	Description	Avantages	Inconvénients

8.2.2 Pour les périphériques à retour tactile

Technologie	Description	Avantages	Inconvénients
Cristaux piézoélectriques	Les changements du champ électrique provoquent la contraction et l'extension des cristaux	– Bonne résolution spatiale	– Restreint aux fréquences sonores
Pneumatique	Plusieurs formes : – jets d'air – anneaux d'air – ballons d'air – tableaux de ballons d'air	Faible masse sur la main	Faibles résolutions spatiale et temporelle Faible bande passante
Alliage à mémoire de forme	Les fils et les ressorts de SMA se contractent quand ils sont chauffés et s'étendent pendant qu'ils se refroidissent sous l'effort	– Bon rapport puissance/masse	– Dissipation de la chaleur – Faible efficacité pendant la contraction
Solénoïde	Une bobine magnétique applique une force à un piston métallique	– bande passante – équilibre des forces	– Non linéaire – nécessite un dispositif de contrôle – Lourd
Technologie	Description	Avantages	Inconvénients

Technologie	Description	Avantages	Inconvénients
Voice coil (haut-parleur)	Une bobine magnétique vibre afin de transmettre un signal de basse amplitude et haute fréquence à une peau	<ul style="list-style-type: none"> – Haute résolution temporelle – taille relativement réduite 	<ul style="list-style-type: none"> – Faible résolution spatiale – Taille du dispositif peu flexible
Pompe à chaleur	Dispositif semi-conducteur qui déplace l'énergie thermique pour chauffer ou refroidir la peau	<ul style="list-style-type: none"> – pas de matière fluide à utiliser 	<ul style="list-style-type: none"> – Faibles résolutions spatiale et temporelle – Encombrant – Faible bande passante
Technologie	Description	Avantages	Inconvénients

8.3 Le PHANTOM

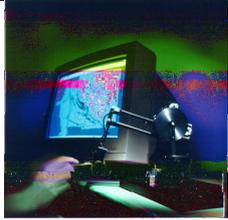
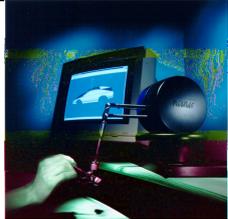
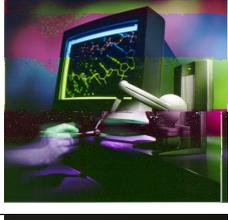
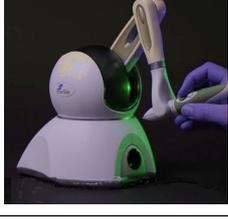
C'est le périphérique le plus populaire sur le marché, utilisé par de nombreux laboratoires dans le cadre de la recherche sur l'interaction haptique. Il est décliné en 6 versions que nous allons détailler dans le tableau 8.4.

8.4 La *Web Accessibility Initiative (WAI)* du *World Wide Web Consortium (W3C)*

Le *World Wide Web Consortium*, abrégé W3C¹, est un consortium fondé en octobre 1994 pour promouvoir la compatibilité des technologies du *World Wide Web* telles que HTML, XHTML, XML, CSS, PNG, SVG et SOAP. Le W3C n'émet pas des normes, mais des recommandations.

Le consortium laisse le soin aux fabricants de suivre les recommandations. Contrairement à l'Organisation internationale de normalisation ou d'autres corps internationaux de standardisation, le W3C ne possède pas de programme de certification, et beaucoup

¹W3C : <http://www.w3.org>

	Modèle	Degrés de liberté (in/out)	Espace de travail (H x L x P)	Forces (en pic / continues)
	Premium 1.0	6/3	18 x 25 x 13 cm	8.5 / 1.4 N
	Premium 1.5	6/3	27 x 37.5 x 19.5 cm	8.5 / 8.5 / 1.4 N
	Premium 3.0	6/3	59 x 84 x 41 cm	22 / 3 N
	6 DoF	6/6	16 x 13 x 13 cm	8.5 / 1.4 N
	Desktop	6/3	12 x 16 x 7 cm	6.4 / 1.7 N
	Omni	6/3		3.3 / 0.88 N

TAB. 8.4 – La gamme des PHANTOMS

de standards ne définissent pas formellement un niveau de conformité. Ils sont ainsi souvent implantés partiellement.

Concernant l'accessibilité, le W3C a créé des recommandations à travers le projet WAI (*Web Accessibility Initiative*) en 1996. Ces recommandations s'adressent à tous les distributeurs de contenu numérique par Internet : navigateurs, documents HTML, logiciels d'édition de HTML, logiciel de publication de site Web créant le code HTML.

Les recommandations de la WAI actuellement en vigueur sont :

- les *Authoring Tool Accessibility Guidelines* (ATAG) qui posent les règles d'accessibilité pour les outils d'édition :

« Cette spécification fournit les règles pour les développeurs d'éditeurs Web. Elle a deux objectifs :

- assister les développeurs dans la conception des outils d'édition qui permettent de produire un contenu web accessible ;
- assister les développeurs dans la création d'interface d'édition accessible.

Les outils d'édition peuvent rendre possible, encourager et assister les utilisateurs ("auteurs") dans la création d'un contenu Web accessible à travers des messages d'invité et d'alerte, des fonctions de vérification et de correction, des fichiers d'aides et des outils automatisés. Il est aussi important que toutes personnes puissent rédiger du contenu autant qu'elle puissent accéder à celui-ci. Par conséquent, les outils utilisés pour créer cette information doivent être eux-même accessibles. L'adoption de ces règles contribuera à la prolifération d'un contenu Web qui pourra être lu par une plus large proportion de lecteurs et à la prolifération d'outil d'édition qui pourront être utilisés par une plus large proportion d'auteurs. »²

- les *Web Content Accessibility Guidelines* (WCAG) montrent comment rendre un site web accessible,³
- les *User Agent Accessibility Guidelines* (UAAG), enfin, posent les règles pour l'accessibilité des agents utilisateurs.

1. Les composants logiciels et la documentation qui ensemble se conforment aux conditions requises par ce document. C'est l'utilisation la plus courante du terme dans ce document et c'est celle trouvée dans les points de contrôle ;
2. Tout logiciel qui récupère et restitue un contenu Web pour les utilisateurs. Cela peut comprendre les navigateurs Web, les lecteurs de média, les modules d'extension et d'autres programmes (y compris les technologies d'as-

²tiré de <http://www.la-grange.net/w3c/atag10/>

³tiré de <http://www.la-grange.net/w3c/WAI-WEBCONTENT-TECHS/>

sistance) qui participent à la récupération et la restitution d'un contenu Web.
4

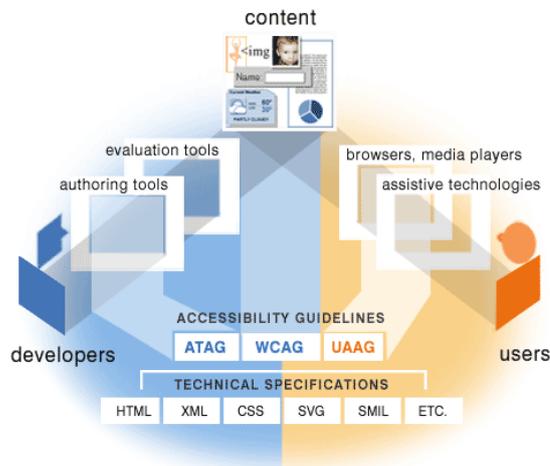


FIG. 8.1 – WAI, ATAG, WCAG et UAAG

8.5 Asynchronous Javascript and XML : AJAX

Classiquement, les applications Web permettent aux utilisateurs d'effectuer des choix (suivre un lien, remplir et valider un formulaire). Une requête est alors envoyée au serveur HTTP, qui agit en fonction de l'action et des données reçues, et retourne une nouvelle page (figure 8.2). Ce fonctionnement consomme inutilement une partie de la bande passante, une grande partie du code (X)HTML étant commune aux différentes pages de l'application. Et parce qu'une requête au serveur HTTP doit être réalisée à chaque interaction avec l'application, le temps de réponse de l'application dépend fortement du temps de réponse du serveur HTTP. Cela conduit à des interfaces utilisateurs plus lentes que leurs équivalents natives.

Les applications utilisant les techniques AJAX quant à elles peuvent envoyer des requêtes au serveur HTTP pour récupérer uniquement les données nécessaires en utilisant la requête HTTP XMLHttpRequest. Les applications sont alors plus réactives, la quantité de données échangées entre le navigateur et le serveur HTTP étant fortement réduite. Le temps de traitement de la requête côté serveur est également légèrement réduit, une partie du traitement étant réalisé sur l'ordinateur d'où provient la requête (figure 8.3).

⁴tiré de <http://www.yoyodesign.org/doc/w3c/uaag/cover.html>

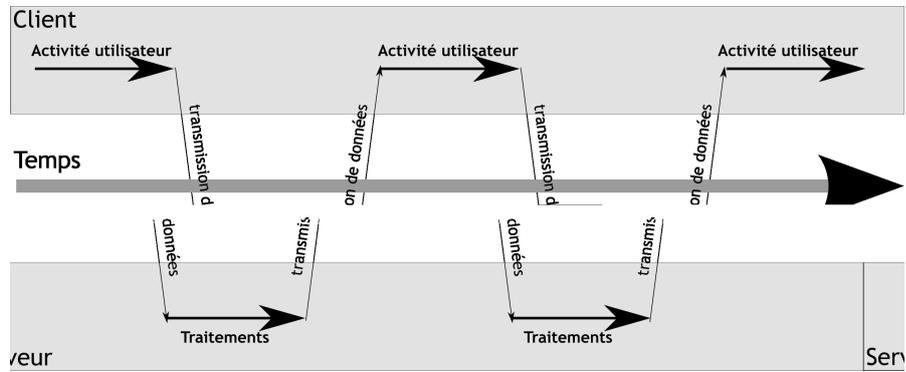


FIG. 8.2 – Modèle classique de l'interaction Web (synchrone)

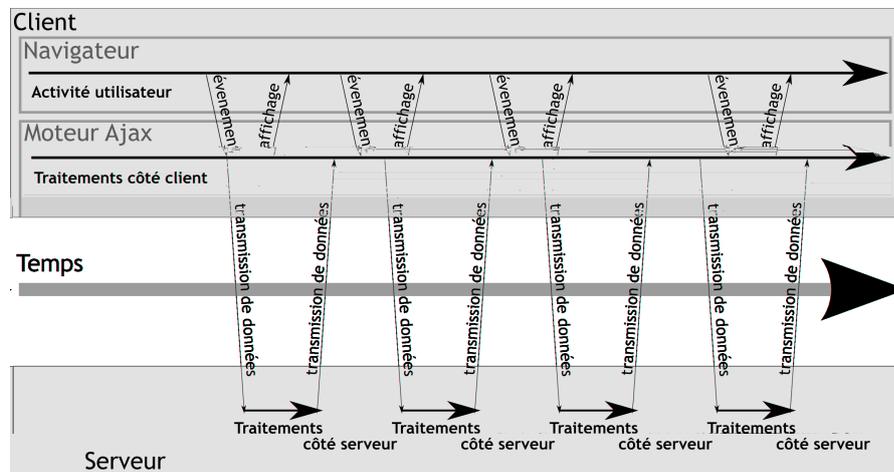


FIG. 8.3 – Modèle d'interaction AJAX (asynchrone)