Analyse des explorations haptiques de formes pour la conception d'un dispositif de suppléance perceptive dédié aux personnes aveugles

Amal Ali Ammar

▶ **To cite this version:**

Amal Ali Ammar. Analyse des explorations haptiques de formes pour la conception d'un dispositif de suppléance perceptive dédié aux personnes aveugles. Sciences de l'Homme et Société. Université de Technologie de Compiègne, 2006. Français. NNT : . tel-00168363

HAL Id: tel-00168363

https://theses.hal.science/tel-00168363

Submitted on 27 Aug 2007

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

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

Université de Technologie de Compiègne

Thèse
Pour obtenir le grade de
Docteur de l'UTC :
Spécialité : Sciences de l'Homme et Technologie de la Cognition et de la Coopération

Présentée et soutenue publiquement par
Amal ALI AMMAR

Analyse des explorations haptiques de formes pour la conception d'un dispositif de suppléance perceptive dédié aux personnes aveugles

Directeur de thèse
Olivier GAPENNE

Membres du Jury :
Denis CHENE
Daniel MELLIER
Pierre PASTRE
Philippe TRIGANO
Nadine VIGOUROUX

« Il s'agit d'un appareil dont la conception est très simple mais le maniement extrêmement compliqué car, il exige l'usage simultané des deux jambes, à la différence de la marche à pied qui permet de laisser une jambe au repos pendant que l'on avance l'autre. […] Par chance la bicyclette porte un frein de chaque côté du guidon. Quand on actionne les freins dans la descente, ils empêchent la bicyclette d'acquérir une vitesse croissante ou accélération. Dans la montée, les freins empêchent la bicyclette de repartir en arrière. »

Eduardo Mendoza
Sans nouvelles de Gurb
Editions du seuil

Remerciements

En premier lieu, je tiens à exprimer ma gratitude à Olivier GAPENNE, pour m'avoir donné la possibilité de participer à ce projet passionnant, pour sa sollicitude et pour son indéfectible présence pendant ces trois années de « suivi continu ».

Je souhaite témoigner ma reconnaissance à Charles LENAY, responsable du Groupe Suppléance Perceptive, pour l'ensemble des moyens mis à disposition dans la réalisation de cette étude.

Ce travail doit beaucoup à l'expertise et à la disponibilité de Marie Claude MIRANDA et de Jean SOLDNER.

Cette entreprise a été menée avec le concours du Centre Normandie Lorraine et grâce à l'active participation de son professeur de mathématiques Rahmani HAMDI.

Je garde un excellent souvenir de l'engagement, de l'enthousiasme et de la curiosité de Christopher MICHAUD, de Noémie JUEL, de Laure FALLER et de Noémie BLOT.

Je remercie vivement Katia ROVIRA et Christian BASTIEN qui m'ont prodigué leurs conseils avisés.

Les programmes de Dominique AUBERT, informaticien du Groupe Suppléance Perceptive, ont été d'une aide secourable et précieuse dans le traitement de données.

Merci à Nitiphan SRIBUNRUANGRIT et à Elodie BLOMME, pour nos séances de travail à la fois agréables et enrichissantes.

La présence fraternelle de mon amie Yusr Amamou a été d'un grand réconfort pendant les derniers mois de ma thèse.

Ma reconnaissance va également à Elise FAGE et Emmanuel ALBERT, pour leurs relectures, leur sens de la solidarité et leur soutien moral.

Cette étude a bénéficié du soutien financier de l' ACI Ecole et Sciences Cognitives.

RESUME

Si l'accès des personnes aveugles aux technologies numériques a été, ces dernières années, grandement facilité, cet accès reste cependant problématique compte tenu des difficultés importantes à interagir avec les objets graphiques. Dans ce contexte, le Groupe Suppléance Perceptive développe depuis plusieurs années une plate-forme haptique (Tactos) devant favoriser cette interactivité avec les objets graphiques. Le travail mené dans le cadre de cette thèse vise, sur la base d'un premier prototype, à la fois à définir les conditions de son appropriation et de son usage par des personnes aveugles et à proposer un ensemble de spécifications pour la conception des futures versions de Tactos. Notre analyse a plus particulièrement porté sur l'identification de stratégies exploratoires efficientes favorisant l'activité perceptive. La méthodologie employée, inscrite dans une approche constructiviste, met à l 'épreuve une démarche de conception minimaliste : le premier prototype est initialement restreint pour mieux caractériser des stratégies qui, à leur tour, servent à inspirer la conception. Une étude longitudinale, entreprise auprès de six partenaires aveugles, permet de systématiser l'analyse des capacités perceptives et leur évolution. Les résultats mettent en évidence le caractère décisif de la technique exploratoire et l'avantage d'une comparaison entre la situation traditionnelle de lecture de formes et les explorations médiatisées. Les pistes de conception envisagées associent à la fois technologie de suppléance, l'assistance à l'activité et l'enseignement de stratégies spécifiques.

MOTS-CLES : Explorations haptiques, Suppléance perceptive, Aveugles, Conception d'Interface Homme Machine

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION 13

2 CONCEPTION D'INTERFACES DE LECTURE POUR AVEUGLES : PERSPECTIVES ERGONOMIQUES, INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES ET CONNAISSANCES PSYCHOLOGIQUES 17

2.1 ERGONOMIE ET CONCEPTION DE TECHNOLOGIES POUR AVEUGLES 18
2.1.1 LES AVEUGLES ET L'ACCES AUX DONNEES TEXTUELLES ET GRAPHIQUES 18
2.1.1.1 Les technologies de lecture et d'écriture textuelle 19
2.1.1.2 L'accès au graphisme 24
2.1.1.3 L''interface graphique : usage et limites actuelles 28
2.1.1.4 Les aveugles et la pratique des mathématiques 36
2.1.2 APPROCHES THEORIQUES ET METHODOLOGIQUES POUR LA CONCEPTION D'INTERFACES DEDIEES A DES PERSONNES AVEC DES BESOINS SPECIFIQUES 41
2.1.2.1 Théorie de l'activité et genèse instrumentale 42
2.1.2.2 Interfaces tangibles et action située 47
2.1.2.3 Le Universal Design : un nouveau et vaste champ de recherches 50
2.2 DES PROTOTYPES DE RECHERCHE 60
2.2.1 TECHNOLOGIE TACTILE : L'INTERACTIVE TACTILE DISPLAY SYSTEM 60
2.2.2 TECHNOLOGIE A RETOUR DE FORCE : LE PHANTOM 63
2.2.3 TECHNOLOGIE A RETOUR DE FORCE ET TACTILE : LE PANTOBRAILLE 72
2.2.4 TECHNOLOGIE A RETOUR TACTILO-SONORE : TOUCHMELODY 77
2.2.5 INTERFACE NUMERIQUE DE PRODUCTION DE DESSINS TACTILES : TDRAW 79
2.2.6 UNE INTERFACE TACTILE DE PRODUCTION ET DE LECTURE DE DESSINS : MIMIZU 80
2.2.7 L'IDENTIFICATION DE STRATEGIE D'EXPLORATION : UNE HEURISTIQUE POUR LE CONCEPTEUR 83
2.3 ACTIVITE EXPLORATOIRE, COGNITION ET GRAPHISME 86
2.3.1 ACTION, GRAPHISME ET GENESE DES CONNAISSANCES MATHEMATIQUES 86
2.3.1.1 Activité sensori-motrice et connaissance selon Piaget 86
2.3.1.2 Le schème selon Vergnaud et la didactique des mathématiques 88
2.3.1.3 Les apports didactiques de la représentation graphique 92
2.3.1.4 Apprendre à lire des graphiques 93
2.3.1.5 Apport cognitif supposé du graphisme chez l'aveugle 96
2.3.2 COGNITION SPATIALE ET GRAPHISME CHEZ L'AVEUGLE 98
2.3.2.1 Perception directe et médiatisée de l'espace proximal et distal 102
2.3.2.2 La formation d'images mentales 111
2.3.3 STRATEGIES D'EXPLORATION HAPTIQUE ET RECONNAISSANCE DE FORMES 115
2.3.3.1 L'exploration d'objets tridimensionnels 115
2.3.3.2 La production et la lecture de formes bidimensionnelles chez l'aveugle 118
2.3.3.3 Stratégies d'exploration des formes bidimensionnelles chez l'aveugle 129
2.3.4 IMPLICATIONS POUR LA CONCEPTION DES DISPOSITIFS D'ACCES AU GRAPHIQUE 134

3 ETUDE POUR LA CONCEPTION DE L'APPROPRIATION ET DE L'USAGE D'UN DISPOSITIF DE SUPPLEANCE PERCEPTIVE (TACTOS) 139

3.1 SUPPLEANCE PERCEPTIVE ET CONCEPTION D'UNE INTERFACE HAPTIQUE : CONTEXTE TECHNOLOGIQUE ET ENJEUX THEORIQUES 140
3.1.1 TVSS ET OPTACON : DES TECHNOLOGIES DE REFERENCE 140
3.1.2 LE MINIMALISME : UN PRINCIPE POUR COMPRENDRE ET CONCEVOIR 148
3.1.3 CONNAISSANCE DE L'ACTION ET CONCEPTION : CHOIX D'UN CADRE D'ANALYSE 149
3.2 CONTEXTE DE L'ETUDE 154
3.3 SUJETS 156
3.3.1 LES PARTENAIRES AVEUGLES ADULTES 156
3.3.2 LES COLLEGIENS 157
3.4 LE MATERIEL 159
3.4.1 TACTOS 159
3.5 ETUDES EXPLORATOIRES ET PREPARATOIRES AUPRES DE DEUX ADULTES AVEUGLES 164
3.5.1 SEANCES DE TRAVAIL INTRODUCTIVES 164
3.5.2 DISCRIMINATION ANGLE/COURBE ET DE L'ORIENTATION 166
3.5.3 PERCEPTION DU NOMBRE DE L'ORIENTATION ET DE LA POSITION DES SECANTES 169
3.5.4 PERCEPTION DE L'ORIENTATION D'UNE SECANTE ET LOCALISATION D'UNE INTERSECTION 171
3.5.5 LOCALISATION ET LECTURE D'UNE FORME SIMPLE DANS UN REPERE 173
3.5.6 INTRODUCTION D'UNE ASSISTANCE A L'ACTIVITE 175
3.5.6.1 Evaluation du marquage sonore lors de la lecture de forme dans un repère 175
3.5.6.2 Evaluation du marquage sonore lors de la lecture de polygones 179
3.5.7 LOCALISATION D'UNE DROITE DANS UN REPERE ORTHONORME 181
3.6 ETUDE DE L'EXPLORATION ET DE L'IDENTIFICATION DE FORMES SUR PAPIER THERMOGONFLE AUPRES DE QUATRE COLLEGIENS AVEUGLES 185
3.6.1 METHODE 185
3.6.2 RESULTATS 189
3.6.2.1 Résultats globaux 189
3.6.2.2 Analyse individuelle 189
3.6.2.3 Les stratégies exploratoires 193
3.6.3 CONCLUSION ET PERSPECTIVES POUR LA CONCEPTION 194
3.7 ETUDE DE L'EXPLORATION ET DE LA REPRODUCTION DIFFEREE DE FIGURES GEOMETRIQUES SIMPLES AUPRES DES COLLEGIENS ET DES ADULTES AVEUGLES 197
3.7.1 METHODE 197
3.7.2 RESULTATS 205
3.7.2.1 Performances des collégiens 205
3.7.2.2 Performances des adultes 213
3.7.2.3 Evolution des performances des collégiens 216
3.7.2.4 Comparaison des performances en fonction du type de forme chez les collégiens 218
3.7.2.5 Caractéristiques de l'activité exploratoire chez les collégiens 220
3.7.2.6 Caractéristiques de l'activité exploratoire en fonction du type de forme chez les collégiens 223
3.7.2.7 Comparaison des adultes et des collégiens 224
3.7.3 CONCLUSION ET PERSPECTIVES POUR LA CONCEPTION 229

3.8 ETUDE DE L'EXPLORATION ET DE LA REPRODUCTION DIFFEREE DE FRISES, DE LETTRES ET DE FORMES CURVILIGNES AUPRES DES COLLEGIENS AVEUGLES 230
3.8.1 METHODE 230
3.8.2 RESULTATS 232
3.8.2.1 Résultats par sujet 232
3.8.2.2 Comparaison inter sujets 239
3.8.3 CONCLUSION ET PERSPECTIVES POUR LA CONCEPTION 244
3.9 ETUDE SUR LA RECONNAISSANCE ET LA CATEGORISATION DE FORMES 246
3.9.1 METHODE 247
3.9.2 RESULTATS 249
3.9.3 CONCLUSION ET PERSPECTIVES POUR LA CONCEPTION 251
3.10 EVALUATION DE L'USAGE DE TACTOS LORS D'UN COURS PARTICULIER DE MATHEMATIQUES 253
3.10.1 METHODE 253
3.10.2 DESCRIPTION DE L'INTERACTION PROFESSEUR/ELEVE 255
3.10.3 CONCLUSION ET PERSPECTIVES POUR LA CONCEPTION 259
3.11 APPLICATION POUR LA LECTURE DE DROITES DANS UN REPERE ORTHONORME 261
3.11.1 METHODE 261
3.11.2 RESULTATS 264
3.11.3 CONCLUSION ET PERSPECTIVES POUR LA CONCEPTION 266

4 CONCLUSION GENERALE 267

5 BIBLIOGRAPHIE 275

Liste des figures

Figure 1 : Alphabet braille français 20
Figure 2: ALVA Delphi Multimédia 440 21
Figure 3 : Scriba 40 22
Figure 4 : Pattern de design, d'après Zajicek (2004) 54
Figure 5 : Huit règles d'or selon Schneiderman (1998) 55
Figure 6: Etapes de conception pour une interaction non visuelle selon Kurze 56
Figure 7 : Les trois modes de présentation des objets d'après Kawai et Tomita (1996) 61
Figure 8 : Le PHANToM desktop 63
Figure 9 : Les trois patterns de lecture utilisés dans l'expérience de Ramstein (1996) 74
Figure 10 : Utilisation de TouchMelody dans la lecture d'un diagramme tactile 78
Figure 11 : Protocole de la première séance 81
Figure 12. : Figures sur papier thermogonflé présentées à l'émetteur et dessins réalisés par le récepteur. Les cases de gauche correspondent aux résultats de la première séance. 82
Figure 13 : Modèle du traitement haptique dit de la médiation visuelle d'après Lederman et al. (1990) 124
Figure 14 : Modèle du traitement haptique dit de l'appréhension directe (d'après Lederman et al., 1990) 125
Figure 15 : Le TVSS d'origine et sa version portable 141
Figure 16 : L'Optacon et son usage 143
Figure 17 : Dispositif de couplage sensori-moteur (d'après Lenay, Gapenne, Hanneton et Stewart, 1999) 148
Figure 18 : Ensemble du dispositif de suppléance perceptive (version III) 159
Figure 19 : Utilisation de Tactos par un voyant aveuglé 159
Figure 20 : a) Relation entre la matrice de champs récepteurs et la matrice de stimulateurs tactiles, b) principe du système de détection-stimulation. Schéma explicatif (d'après Sribunruangrit, 2004) 161
Figure 21 : Relation entre le champ récepteur et la stimulation tactile pendant l'exploration du triangle. Schéma illustratif (d'après Sribunruangrit, 2004) 162
Figure 22 : Interface Tactos 163
Figure 23 : Matrice M4 165
Figure 24 : Pourcentage d'utilisation des stratégies par sujet 194
Figure 25 : Evolution du nombre de dessins corrects chez chaque collégien 216
Figure 26 : Evolution du nombre de dessins précis chez chaque collégien 217

Figure 27 : Evolution du nombre de dessins compatibles avec l'exploration chez chaque collégien 217
Figure 28 : Nombre de dessins corrects par types de forme chez les quatre collégiens 218
Figure 29 : Nombre de dessins précis par type de forme chez les quatre collégiens 219
Figure 30 : Evolution du nombre d'explorations intégrales chez chaque collégien 220
Figure 31 : Evolution du nombre moyen de ruptures de contact chez chaque collégien 221
Figure 32 : Evolution du taux de contact moyen chez chaque collégien 221
Figure 33 : Evolution du temps d'accroche maximale moyen chez chaque collégien..... 222
Figure 34 : Evolution de la vitesse d'exploration chez chaque collégien 222
Figure 35 : Nombre de dessins corrects par sujet..... 224
Figure 36 : Nombre de dessins précis par sujet..... 225
Figure 37 : Nombre de dessins compatibles avec les traces de l'exploration par sujet 225
Figure 38 : Nombre moyen de ruptures de contact par sujet 226
Figure 39 : Taux de contact moyen par sujet 227
Figure 40 : Temps d'accroche maximale moyen par sujet..... 228
Figure 41 : Vitesse moyenne par sujet 228
Figure 42 : Matrice M2 231
Figure 43 : Nombre de dessins corrects par sujet et par type de forme 240
Figure 44 : Nombre de dessins précis par sujet et par type de forme..... 240
Figure 45 : Nombre de dessins compatibles avec les traces de l'exploration par sujet et par type de forme..... 241
Figure 46 : Nombre d'explorations intégrales par sujet et par type de figure..... 241
Figure 47 : Nombre moyen de ruptures de contact par collégien 242
Figure 48 : Taux de contact moyen par collégien 242
Figure 49 : Temps d'accroche maximale moyen par collégien..... 243
Figure 50 : Vitesse moyenne par collégien 243
Figure 51 : a) Boîtier de cellules braille (Version III), b) dispositif développé pour combiner les cellules braille et le stylet (stylet tactile) (D'après Sribunruangrit, 2004)..... 262
Figure 52 : a) Une seule droite (première session), b) intersection de deux lignes droites (deuxième session). (D'après Sribunruangrit (2004). 262
Figure 53 : Composants des axes principaux et les axes de référence (d'après Sribunruangrit, ibid.) 263
Figure 54 : a) Taux de bonnes réponses, b) temps mis pour trouver le point d'intersection et temps total. (D'après Sribunruangrit 2004)..... 265

Figure 55 : a) Taux de bonnes réponses de point d'intersection de deux droites, b) temps pour trouver le point d'intersection et temps total (d'après Sribunruangrit, 2004) 265
Figure 56 : Première version du stylet tactile 271
Figure 57 : Présentation du système œil-main, illustration (d'après Sribunruangrit, 2004) .. 272

Liste des tableaux

Tableau 1 : Nombre moyens de mots lus en une minute en fonction de chaque scénario et selon la situation manuelle qui convient le mieux au sujet (main dominante déplaçant la cellule) 76
Tableau 2 : « Educational program » (d'après Miletic et al, 1986) 146
Tableau 3 : Réponses verbales données par chaque sujet pour chacune des figures présentées 166
Tableau 4 : Figures utilisées au cours de la situation d'étude (taille réduite) 167
Tableau 5 : Exemples de dessins corrects (taille réelle) 168
Tableau 6 : Exemples de dessins dont l'orientation est correcte et l'aspect erroné (taille réelle) 168
Tableau 7 : Exemples de dessin dont l'orientation est erronée et l'aspect correct (taille réelle) 168
Tableau 8 : Nombre de réponses relatives à l'orientation et à l'aspect par sujet et par phase 169
Tableau 9 : Figures utilisées (taille réduite) au cours de la situation d'étude 2 169
Tableau 10 : Nombre de réponses par sujet et par phase 171
Tableau 11 : Exemples d'inversions produites (taille réduite) 171
Tableau 12 : Figures utilisées (taille réduite) 172
Tableau 13 : Nombre de réponses par sujet et par phase 172
Tableau 14 : Figures utilisées (taille réduite) 173
Tableau 15 : Nombre de réponses par sujet et par phase 174
Tableau 16 : Exemples de figures utilisées lors de la séance A (taille réduite) 176
Tableau 17 : Nombre de réponses par sujet et par phase à la séance A 176
Tableau 18 : Temps de réponse moyen (en secondes) par sujet et par phase à la séance A .. 177
Tableau 19 : Nombre de réponses par sujet et par phase à la séance B 177
Tableau 20 : Temps de réponse moyens (en secondes) ± écart type par sujet et par phase pour la séance B 178
Tableau 21 : Nombre de réponses correctes données par les deux sujets 178
Tableau 22 : Figures explorées par le sujet 1 (taille réduite) 179
Tableau 23: Nombre de réponses par sujet et par phase 180
Tableau 24: Nombre de réponses correctes données par les deux sujets en fonction du type de figure (bi ou uni-modal) toutes figures confondues 180
Tableau 25 : Temps moyen ± écart type, par sujet et par phase 180

Tableau 26 : Figures utilisées 182
Tableau 27 : Nombre de réponses par sujet 183
Tableau 28 : Temps moyen (en secondes) ± l'écart type, par sujet 183
Tableau 29: Figures test (taille réelle) 198
Tableau 30 : Exemples de tracé correct et incorrect 200
Tableau 31 : Exemples de tracés précis et imprécis 200
Tableau 32: Exemples de compatibilité et de non-compatibilité de l'exploration et la production 201
Tableau 33 : Exemples d'explorations intégrale et partielle 202
Tableau 34 : Illustrations des différents niveaux de couverture 202
Tableau 35 : Exemples de traces d'explorations comportant des pâtés 203
Tableau 36 : Exemples d'explorations avec boucles de sorties volontaires de fin de lignes . 204
Tableau 37 : Grille de codage des différents types de mouvements 205
Tableau 38 : Exemples de traces exploratoires du collégien 1 207
Tableau 39 : Exemples de traces exploratoires de la collégienne 2 209
Tableau 40 : Exemples de traces exploratoires de la collégienne 3 211
Tableau 41 : Exemples de traces exploratoires de la collégienne 4 212
Tableau 42 : Exemples des traces exploratoires de l'adulte 1 214
Tableau 43 : Exemples de traces exploratoires de l'adulte 2 215
Tableau 44: Exemples de tracés imprécis bien que corrects (cf. critères) 219
Tableau 45 : Exemples de frises utilisées lors de l'étude 231
Tableau 46 : Exemples de courbes utilisées lors de l'étude 231
Tableau 47 : Exemples de lettres utilisées lors de l'étude 232
Tableau 48 : Exemple d'une exploration incomplète ayant néanmoins donné lieu à un dessin correct et précis chez le collégien 1 233
Tableau 49 : Exemple d'une exploration incomplète ayant néanmoins donné lieu à un dessin correct et précis chez le collégien 1 233
Tableau 50 : Exemples d'explorations montrant très peu de traces hors figure 234
Tableau 51 : Exemples de traces exploratoires observées lors des deux études 236
Tableau 52 : Exemples de traces exploratoires de la collégienne 2 237
Tableau 53 : Exemples de traces exploratoires de la collégienne 4 239
Tableau 54 : Exemples de figures utilisées dans la tâche de reconnaissance (taille réduite). 247
Tableau 55 : Exemples de figures utilisées dans la tâche de tri spontané (taille réduite) 248
Tableau 56 : Exemples de figures utilisées dans la tâche d'appariement (taille réduite)..... 248

1 Introduction

Les technologies numériques constituent un nouveau vecteur de savoir, de partage et d'autonomie pour les personnes aveugles aussi bien dans le monde professionnel ou scolaire que dans la sphère privée. L'édition électronique et Internet ont ouvert de vastes perspectives d'accès aux documents par le biais des lecteurs d'écran. Par ailleurs, l'information, qui n'est plus localisée uniquement dans les lieux de savoirs traditionnels tels que les bibliothèques, devient consultable sur un mode personnalisé et à distance. Une puissance accrue de calcul et de stockage permet de conserver les documents plus facilement, mais également de les partager, de les modifier et de leur faire prendre des formes diverses: affiché sur un écran, embossé sur papier ou imprimé en braille (Burger, 2000). Dès lors, les aveugles ne sont plus tributaires des seuls livres en braille et des cassettes audio tandis qu'un potentiel de développement inédit s'offre à l'imagerie tactile. Par ailleurs, le monde scolaire favorise la diffusion des technologies numériques dédiées. Aujourd'hui, les jeunes aveugles utilisent des blocs-notes électroniques et ont une pratique de l'outil informatique.

Si le numérique possède des atouts, les interfaces graphiques actuelles continuent cependant de poser des problèmes d'utilisabilité et d'accessibilité aux aveugles. En particulier, le passage du DOS aux interfaces graphiques n'a pas procuré à ces derniers une qualité et un confort d'utilisation similaire à celui des voyants. La spatialisation de l'information et le recours au graphique ont clairement facilité l'interaction des voyants au détriment des utilisateurs aveugles. Dans l'accès au savoir, l'image sur support numérique est donc apparue comme une nouvelle frontière.

En outre, les aveugles sont longtemps restés en marge du monde des images. Le recours au graphique a fait une entrée tardive dans leur éducation. Or, le graphique s'avère être une technologie cognitive puissante largement exploitée notamment dans le domaine des mathématiques. En rendant les images interactives, les supports numériques en développent d'ailleurs la portée didactique. De leur côté, les recherches en IHM (Interaction Homme Machine) explorent la possibilité de rendre les images virtuelles accessibles aux aveugles. L'enjeu consiste alors à profiter de ce tournant technologique pour inviter les jeunes aveugles

à profiter des vertus didactiques du graphique sur support numérique. Comment leur aménager des conditions d'usage qui soient pertinentes et satisfaisantes ?

Le présent travail, de nature ergonomique, s'efforce d'apporter des éléments de réponse à cette question. Il s'inscrit dans un projet dont la vocation est de proposer un prototype d'interaction haptique (Tactos) qui permette à l'utilisateur aveugle de percevoir des objets graphiques simples présents à l'écran d'un ordinateur (Ali Ammar, 2003 ; Gapenne, Rovira, Ali Ammar & Lenay, 2003). Aussi, comme nous le verrons, Tactos trouve l'un de ses terrains d'élection dans l'enseignement de la géométrie et de l'analyse. Ce dispositif, qui a l'avantage de proposer un format modifiable à loisir et partageable en présence et à distance, viendrait s'ajouter « aux technologies traditionnelles » que sont les images en relief. Ce type de dispositif interpelle l'ergonomie en lui soumettant deux types de questionnements :

* Quelle démarche de conception adopter lorsque le couplage est inédit et s'adresse à un utilisateur aveugle ?
* Comment se réalisent les activités de lecture haptique de formes à travers une interface numérique ?

L'analyse des explorations via Tactos nous permet d'articuler ces deux problématiques. En effet, l'identification de stratégies exploratoires apporte des connaissances nouvelles sur les activités prothétisées tout en suggérant des spécifications pour l'interface en cours de développement.

Dans la mesure où la conception d'un dispositif pour aveugles exige, au préalable, une analyse des besoins et une investigation des difficultés rencontrées dans l'usage des systèmes existants, nous dresserons d'abord un bilan de l'accès aux données textuelles et graphiques (voir partie 2.1.1). Ensuite, nous envisagerons les approches et les outils que les spécialistes en IHM construisent et mobilisent pour pouvoir proposer des interfaces adaptées. Nous évoquerons les réalisations du Design for All et plus particulièrement les études menées autour des prototypes d'accès non visuel à l'image. Ces systèmes d'interaction haptique qui ouvrent de nouveaux possibles présentent à leur tour des limitations au regard des compétences acquises avec les outils traditionnels ou la manipulation d'objets du monde physique. Ils sont alors le lieu d'une conception en boucle : motivés par les lacunes des systèmes existants, ils sont, dans un second temps l'objet d'une phase évaluative qui peut prendre comme référence les techniques d'exploration des objets usuels. L'évaluation débouche alors sur des spécifications mais aussi sur de nouveaux domaines d'investigation. A

l'occasion de la conception de ces dispositifs, il est possible d'instituer des allers-retours entre les techniques constituées (y compris les techniques du corps) et les techniques en constitution. S'établit ainsi une confrontation fructueuse entre les connaissances théoriques actuelles et celles qui sont en construction pour penser les conditions de possibilité d'un couplage satisfaisant. Dans ce champ de recherche, les stratégies perceptives jouent un rôle clé de part leur caractère dual : elles sont un objet de recherche fondamentale et un matériau pour la conception. La spécification d'un dispositif dédié aux aveugles requiert des connaissances relatives à la psychologie cognitive de la perception haptique et, notamment, aux procédures d'exploration des formes bi et tridimensionnelles (ce que nous verrons dans la partie 2.3.3). Néanmoins ces connaissances doivent être mise en résonance avec les données issues de l'observation des sujets explorant des formes dans des conditions de couplage particulières, ce que nous nous sommes efforcés de mettre en œuvre dans notre travail.

Notre étude s'inscrit dans un paradigme constructiviste selon lequel i) la perception est un processus actif ii) qui repose sur la connaissance de lois de contingences reliant les actions aux sensations iii) laquelle connaissance est le résultat d'une genèse. En ce sens, l'appropriation de Tactos suppose la constitution d'une « nouvelle » modalité perceptive. L'émergence des percepts se produit sous l'effet de l'action propre du sujet et à l'issue d'un apprentissage. Considérant que cette constitution est possible même dans des conditions de couplage minimal (Lenay, 1997), nous mettons à l'épreuve une démarche minimaliste servant à la fois de principe épistémologique (la situation perceptive est simplifiée pour être mieux appréhendée) et de règle de design.

Le travail de recherche présenté ici prend corps dans une étude longitudinale entreprise auprès de six partenaires aveugles dont quatre collégiens. La méthodologie employée n'a pas comme objectif premier d'apporter des connaissances générales sur la lecture de formes chez l'aveugle mais d'élaborer un processus de conception au regard des performances et de l'activité déployée. Ce travail s'est déroulé en deux étapes. L'étape 1, de nature exploratoire et préparatoire, a été réalisée en collaboration avec deux adultes aveugles afin de déterminer si la lecture de formes mathématiques est possible. L'étape 2, dans la continuité de la précédente, s'est effectuée auprès de quatre collégiens aveugles. La temporalité de l'étude nous a permis de caractériser l'évolution des stratégies perceptives et leur éventuelle convergence chez les sujets. A travers les différentes situations d'interaction aménagées, il a été possible d'envisager une dynamique de conception associant l'étude des stratégies exploratoires, les performances et les contraintes/ressources permettant une évolution efficace

et maîtrisée de l'interface. Enfin, de façon à évaluer les acquis perceptifs des premières phases du projet, nous avons proposé aux sujets d'utiliser Tactos dans différentes situations dont un cours individuel de mathématiques.

2 Conception d'interfaces de lecture pour aveugles : perspectives ergonomiques, innovations technologiques et connaissances psychologiques

La conception d'interfaces satisfaisantes pour les personnes handicapées nécessite des connaissances théoriques et des réalisations concrètes dans des domaines tels que les sciences cognitives, les sciences de l'éducation, l'ergonomie, l'informatique et les neurosciences (Burger et Spérandio, 1993). L'ergonomie dont le projet est à la fois d'agir sur les situations et de penser les conditions d'un couplage humain/machine adapté à l'humain possède une prééminence dans cette entreprise. Issue de la psychologie cognitive et de la physiologie du travail, elle articule des savoirs de champs disciplinaires différents, tandis que la connaissance des activités instrumentées la dote d'un objet propre. Sous la poussée à la fois des besoins des utilisateurs non satisfaits et des innovations technologiques, elle développe ses connaissances empiriques, renouvelle ses concepts et affine ses méthodes d'intervention et d'investigation.

Nous considérerons dans ce chapitre 2 l'ensemble de savoirs nécessaires à la conception d'interfaces pour aveugles. En premier lieu, nous présenterons les dispositifs existants données empiriques relatives à leur usage. Puis nous envisagerons alors les approches et les paradigmes de la conception susceptibles de mieux répondre aux spécificités des utilisateurs aveugles. Ensuite, et plus spécifiquement, nous nous intéresserons aux prototypes de lecture haptique de formes bi et tridimensionnelles pour aveugles. Enfin, la formalisation des conditions d'usage et d'appropriation de ces dispositifs nous conduira à interroger, à travers une revue de la psychologie cognitive, d'une part, l'impact cognitif des images et, d'autre part, l'activité perceptive haptique.

2.1 Ergonomie et conception de technologies pour aveugles

2.1.1 Les aveugles et l'accès aux données textuelles et graphiques

Nous proposons tout d'abord de situer le contexte technologique dans lequel évoluent les aveugles. D'une part, cette prise de connaissance participe de notre compréhension des usages des sujets aveugles qui ont collaboré à l'étude et d'autre part, elle nous permet de penser la conception de notre dispositif Tactos en conjonction et en complémentarité avec ces technologies.

Il existe actuellement des dispositifs dédiés qui, couplés avec des équipements informatiques standards, permettent aux aveugles de lire le contenu textuel d'un écran d'ordinateur. On nomme ainsi technologie d'assistance[1] *« toute pièce d'équipement ou produit d'un système modifié ou fait sur mesure qui est utilisé afin d'accroître, de maintenir ou d'améliorer les capacités fonctionnelles des individus ayant des déficiences. »* Les plus utilisés dans la communauté des aveugles sont sans doute les appareils de prise de notes, les lecteurs d'écran fonctionnant avec synthèse vocale et/ou terminal braille. Grâce à ces systèmes, les aveugles à l'école ou au travail ont pu accéder à un vaste ensemble de documents et accroître de façon importante la qualité et la quantité de leur production écrite. Ces technologies sont également utilisées dans la navigation internet. En outre, le World Wide Web Consortium (W3C) a élaboré un ensemble de recommandations afin de promouvoir l'accessibilité d'Internet.

Si les capacités de stockage du numérique, les possibilités d'échange et de transformation ont été dans une certaine mesure mises à profit grâce aux technologies d'assistance, des problèmes d'utilisation persistent lors de l'usage de ces dispositifs. Nous verrons que les problèmes liés plus particulièrement aux aspects graphiques des interfaces actuelles sont de deux ordres :

* Ces technologies ne permettent pas aux aveugles de percevoir les graphiques présents à l'écran d'un ordinateur
* L'utilisation des systèmes d'exploitation actuels fait appel à la manipulation directe des objets de l'interface. Ces objets interactifs sont pour la plupart matérialisés

[1] www.uqtr.uquebec.ca/laridi/documents/PolyhandicapYves_fichiers/frame.htm. Ce terme correspond à ce que Gapenne, Lenay & Boullier (2001) nomme suppléance.

graphiquement et disposés dans un espace bi-dimensionnel. Leur manipulation directe demeure inaccessible aux aveugles.

2.1.1.1 Les technologies de lecture et d'écriture textuelle

Selon Descargues (2000), l'évolution des techniques destinées aux aveugles est passée par trois grandes étapes :

1. L'invention du braille en 1829 et sa diffusion.
2. L'apparition des supports sonores de masse tels que les magnétophones à bande puis à cassettes, qui ont concurrencé l'impression braille.
3. L'accès à l'information numérique.

Aujourd'hui ces différentes techniques co-existent et offrent aux aveugles des supports de connaissance variés et complémentaires. Nous présentons à la suite et brièvement les principaux outils dont se saisissent les aveugles pour lire et produire des données textuelles.

- ***Lecture et écriture braille***

Plus approprié au toucher, le braille a, dans les écoles pour aveugles, évincé les caractères tactiles mis au point par Valentin Haüy. Louis Braille, père éponyme de cet alphabet, s'est inspiré du système qu'avait imaginé Barbier de la Serre pour permettre aux soldats de lire dans l'obscurité. Lui-même utilisateur de cette technique qui reposait sur un principe de codage matriciel, Braille l'a amélioré et simplifié en construisant son alphabet autour d'un signe de base de six points[2] (voir Figure 1).

[2] L'informatique actuelle contribue à la généralisation du braille huit points qui permet de représenter 256 signes, soit de multiplier par quatre le nombre de combinaisons possibles.

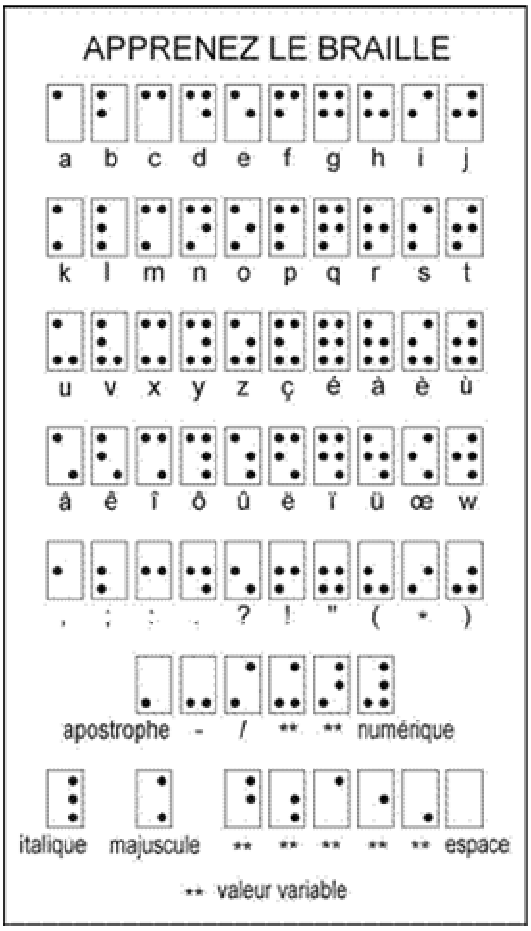


Figure 1 : Alphabet braille français[3]

Comme la pulpe du doigt ne peut percevoir qu'une lettre à la fois, le déchiffrage d'un texte en braille s'effectue de façon séquentielle (dans la section 2.3.3.3 seront présentés différentes stratégies de lecture du braille). L'apprentissage du braille impose aux jeunes aveugles une lourde charge d'apprentissage (Tobin, Greaney & Hill, 2000). En outre, chez les braillistes expérimentés les vitesses de lecture sont inférieures à celles de voyants lisant des textes en noir. L'étude de Lorimer (1977, cité par Tobin et al., ibid.) nous apprend qu'un adolescent aveugle de 13 ans lit, en moyenne, 35 mots à la minute, alors qu'un voyant du même âge lit, en moyenne, 103 mots d'un texte imprimé.

La technique traditionnelle d'écriture braille consiste à déplacer une réglette amovible qui correspond à une fenêtre de trois lignes braille sur une tablette gravée de points braille. Une

[3] www.inlb.qc.ca/braille/alphabet.aspx

feuille de papier est insérée entre la tablette et la réglette. Les lettres sont formées à l'aide d'un poinçon dans l'espace défini par la réglette. Les lettres en relief apparaissent au verso de la feuille. Comme la lecture du braille s'effectue de gauche à droite, l'écriture procède de droite à gauche. Le système manuel d'écriture avec poinçon et tablette fut jadis concurrencé par la Perkins, machine mécanique d'impression d'un texte en relief. Ces deux technologies tendent aujourd'hui à être remplacées par les blocs-notes électroniques. Le braille, s'est montré particulièrement adapté aux nouvelles technologies et a continué à s'imposer par *« sa flexibilité et ses capacités à représenter tous les langages naturels ainsi que les notations musicales scientifiques et mathématiques »* (Tobin, Greaney & Hill, 2000, p. 245).

L'électronique a permis l'affichage éphémère du code braille. Les plages braille, constituées d'un ensemble de cellules électroniques, sont utilisées comme périphérique (voir Figure 2) avec un ordinateur standard ou alors intégrées dans un appareil de prise de notes (voir Figure 3). La technologie piézo-électrique[4] diffusée dans les années 1970, a réduit la taille, le poids et la consommation des cellules. Aujourd'hui, une barrette braille est composée d'une ligne de 20 à 80 cellules à six ou huit points. Un barreau de quartz piézo-électrique qui se déforme et un dispositif mécanique commandent la montée et la descente de petites tiges qui composent les signes de l'alphabet braille. Au-dessus des cellules braille se trouvent des boutons de désignation qui permettent comme une souris de pointer et de cliquer.

Figure 2: ALVA Delphi Multimédia 440[5]

Un bloc notes électronique[6] tel que le Scriba[7] dispose de 40 cellules braille et huit touches pour la saisie, chacune correspond à un picot braille. La position de ces touches est calquée

[4] L'interface Tactos, au centre de ce projet, mobilise également cette technologie pour la stimulation tactile.

[5] www.cecia.com

[6] Signalons que les collégiens aveugles qui ont participé à notre étude sont tous équipés de ce type de dispositifs.

[7] www.eurobraille.fr

sur la conformation des mains. Un autre pavé et un système de menu déroulant servent à la navigation dans les documents. Il dispose d'un petit écran dont le contraste et l'inclinaison ont été augmentés pour améliorer la communication avec les voyants. Ce bloc note comporte plusieurs applications en interne:

* Un traitement de texte,
* Un éditeur de tableaux,
* Une calculatrice,
* Un agenda.

Ce type d'appareil est fortement utilisé aussi bien dans le contexte scolaire que professionnel.

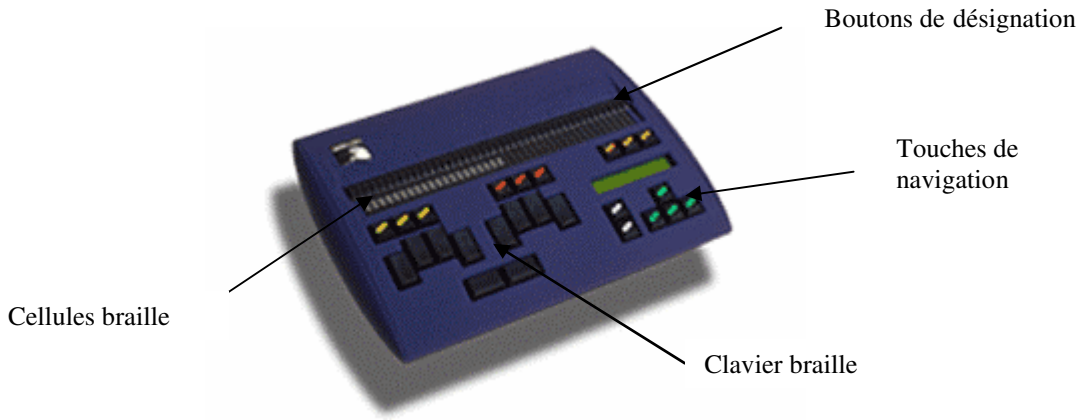


Figure 3 : Scriba 40

- ***Les lecteurs d'écran***

Un lecteur d'écran est un logiciel qui permet de parcourir la page écran de l'ordinateur et d'accéder à tout type de contenus textuels affichés. Il autorise ainsi l'utilisation des applications principales. La plupart des lecteurs d'écran offrent à la fois une lecture en mode vocal et une lecture en mode braille. Les aveugles ont coutume d'utiliser la synthèse vocale pour la lecture de texte et la plage braille pour le repérage dans la page. Les deux techniques sont ainsi complémentaires: *«tandis que le braille est stable sous les doigts, la prise de parole est fugitive mais elle ne mobilise pas les mains ni le corps. Elle permet une prise de connaissance rapide du texte au vol. Le braille offre l'avantage d'une plus grande précision dans la restitution, en particulier pour ce qui concerne l'orthographe, mais des messages vocaux peuvent compléter l'information en braille »* (Burger, 2000, p. 310). Jaws for Windows et Windows Eyes sont les lecteurs d'écran les plus utilisés.

JAWS For Windows[8] intègre une synthèse vocale et braille. Par un système de commande spécifique à Jaws, la synthèse vocale lit le texte affiché à l'écran. Le logiciel Jaws est vendu avec des cassettes de formation. L'utilisateur doit avoir au préalable une bonne maîtrise de Windows et connaître un nombre important de raccourcis claviers.

Windows Eyes[9] est le principal concurrent de Jaws. Moins cher, il est fourni avec un manuel d'utilisation à la fois plus complet et plus accessible. Son nombre illimité d'installations le rend plus flexible et plus stable. Néanmoins pour un usage intensif des applications Microsoft tels qu'Excel, Power Point, ou les tableaux de Word, Jaws est plus recommandé[10].

- ***Des normes pour un web accessible[11] : les recommandations du World Wide Web Consortium (W3C)***

Les recommandations élaborées dans le cadre de la WAI (Web Accessibility Initiative) ont donné lieu à une première version officielle 1.0 en 1999[12]. La version 2.0[13] est actuellement en cours d'élaboration. Les recommandations cherchent à promouvoir l'accès à l'information aux utilisateurs handicapés et ce quels que soient :

1. les logiciels utilisés : outils bureautiques, les technologies d'assistance, lecteurs multimédias ou encore téléphones mobiles.
2. les contingences de l'environnement : dans un lieu bruyant, peu ou trop éclairé, en gardant les mains libres.

Ces recommandations se présentent sous la forme de 14 directives (voir annexe 1) qui s'adressent à la fois aux auteurs de pages web, aux concepteurs de sites et aux développeurs. Elles portent ainsi sur les conditions à respecter pour que :

* Le contenu des images puisse être dispensé à des utilisateurs aveugles (ou à des utilisateurs voyants se trouvant dans l'impossibilité matérielle de visionner leur écran) : *« fournir, des alternatives équivalentes au contenu auditif et visuel »*.

[8] www.freedomscientific.com/fs_products/software_jaws.asp

[9] www.handialog.com/we/produit.htm

[10] Kaufman, http://www.pulsedata.com/about/MarketNews_AUS_May03.asp#windows

[11] Etant donné que le logiciel Tactos est conçu pour fonctionner dans l'environnement Internet, dans le cadre de cours de mathématiques en ligne, nous nous sommes également penchés sur les mesures en faveur de l'accessibilité.

[12] www.w3.org/TR/WAI-WEBCONTENT/

[13] www.w3.org/TR/WCAG20/

* Les objets graphiques tels que les tableaux possèdent les balises nécessaires pour être interprétées par les logiciels de consultation existants.

* La recherche d'information soit facilitée grâce à des indications sur le contexte et l'orientation.

Cette initiative s'est vue renforcée par la création de dispositifs spécifiques comme les navigateurs spécialisés qui filtrent l'information graphique et qui proposent généralement des commandes de lecture (Stephanidis, Paramythis, Sfyrakis, Savidis, 2001 ; voir également Braillesurf[14] et Brookstalk[15])

Après avoir examiné les possibilités d'accès au texte, considérons à présent les possibilités d'accès au graphique. Aujourd'hui encore, l'accès à l'image ne peut faire l'économie de l'impression en relief et les outils traditionnels, comme la planche molle, prévalent dans l'éducation des aveugles.

2.1.1.2 L'accès au graphisme

- ***Une pratique récente***

Le papier thermogonflé et la planche molle sont aujourd'hui les principaux moyens utilisés pour la lecture et la production de dessins en relief[16]. Leur introduction est relativement récente ; elle date des années 60. Même après la diffusion de l'écriture Braille, les livres pour aveugles ont été pendant longtemps privés d'illustrations. La pratique du dessin fut également très faible jusqu'à ce que la fondation suédoise pour aveugle mette au point, et à un coût réduit, un kit de traçage de formes en relief qui comprend un stylo bille et une feuille de plastique posée sur une planche en caoutchouc. Ce kit, ainsi que les machines qui produisent des lignes en relief par la technique courante du thermogonflage (voir définition plus loin), ont changé radicalement la situation des aveugles vis à vis du graphique. Les cartes tactiles, les diagrammes et autres illustrations ont pu enfin être utilisés comme support pédagogique et ludique. Un recensement fait mention d'un fond de 3000 documents produits par différents établissements avec des techniques variées et qui couvrent principalement les disciplines

[14] www.snv.jussieu.fr/inova/bs4/index.htm

[15] www.brookes.ac.uk/schools/cms/research/speech/btalk.htm

[16] Les adolescents qui ont participé à l'étude sont tous équipés du kit avec planche molle et feuilles en plastiques. Leurs professeurs de mathématiques et de sciences physiques réalisent pour eux des graphiques sur papier thermogonflé.

scientifiques des collèges et lycées Le Bris (2000)[17]. Les techniques (Bessigneul, 2001)[18] les plus répandues sont les suivantes :

* Le thermogonflage exploite la capacité de dilatation de l'air et le contraste entre le noir et le blanc. Le blanc réfléchit les rayonnements tandis que l'absorption calorifique par le noir forme les reliefs.

* Le gaufrage, procédé d'impression dit « à sec » permet d'obtenir différents niveaux de relief.

* Le moulage s'effectue par l'injection de résines polymérisables dans un moule usiné en creux.

* La découpe réalise des encoches dans un livre afin de faciliter les liens entre le sommaire et les chapitres.

* Le thermoformage consiste à plaquer sur un modèle en volume une feuille de plastique ramollie puis à la refroidir et à la rigidifier.

* Enfin le collage juxtapose des matériaux de différentes textures.

Ces images, de qualité satisfaisante, sont généralement produites à la demande par des structures locales directement en contact avec les usagers.

Actuellement le numérique et l'embossage tactile sont fréquemment couplés (Gardner & Bulatov, 2004). Le SVG, un nouveau langage XML encouragé par les recommandations du W3C, attribue aux images en relief un titre et une description qui peuvent être restitués par un lecteur d'écran. Il est possible d'embosser un graphique au format SVG grâce à la technologie Tiger puis de le positionner sur une tablette tactile et enfin de sélectionner des objets en exerçant une pression sur le dessin en relief. Cette technique qui consiste à augmenter les graphiques par de l'audio a été initiée par Parkes (1988, 1998) et a été testée par des utilisateurs aveugles (Landau 2003). Il s'agit d'un prototype de recherche qui est donc très loin d'avoir fait son apparition dans les foyers et les collèges ; nous consacrerons des développements ultérieurs à ce type de technologies dans le chapitre 2.2 .

- ***Une pratique limitée***

Malgré la bonne volonté des acteurs impliqués dans la production d'images tactiles, les ressources sont modestes et les aveugles restent très peu familiers du graphisme. Dans le

[17] http://www.braillenet.org/colloques/Bnet2000/actes/lebris.htm

[18] http://www.braillenet.org/Tbook/gauf.htm

meilleur des cas, un élève aveugle accède à 1/1000 des images présentes dans les manuels scolaires Le Bris (2000)[17]. Les différentes études qui traitent de la lecture de dessins en relief font part de la naïveté des sujets aveugles :

« Tous les sujets étaient en mesure d'identifier des dessins simples comme un cercle, un carré, un triangle, un V et une ligne. En revanche, ils disaient n'avoir eu aucun apprentissage du dessin, même si l'utilisation de feuilles en plastique pour dessiner des lettres ou des cartes leur était familière »[19] (Kennedy, 1993, p. 59).

«Antérieurement à cette étude, aucun des sujets n'avait tenté d'identifier des dessins en relief. […]. Seul un petit nombre d'entre eux avait eu une expérience restreinte des cartes tactiles à l'école »[19] (Heller, 1989, p.383).

«*Le commentaire d'un sujet aveugle congénital adulte qui examinait des dessins en relief pour la première fois nous a inspiré cette expérience. Ce sujet connaissait l'existence de notions telles que la perspective de ¾, mais n'avait aucune idée de ce en quoi elle pouvait consister.»*[19] (Heller, Kennedy & Joyner, 1995, p.1050).

« Aucun des aveugles précoces qui ont participé à l'étude n'avaient eu d'expérience antérieure des dessins en perspective »[19] (Heller, Brackett, Sroggs, Steffen, Heatherly & Salik, 2002, p. 749).

Le fait que le dessin apparaisse comme une activité éminemment visuelle expliquerait le peu de tentatives réalisées pour rendre les images accessibles aux aveugles. Quand un objet tridimensionnel est représenté sur un espace à deux dimensions, les déformations qu'il subit seraient difficilement concevables par les aveugles qui ignorent généralement les lois de l'espace projectif. Les images présentent plus de ressemblance avec les objets tels qu'ils sont perçus visuellement que les dessins en relief avec l'expérience perceptive tactile de ces mêmes objets (Hatwell, 2003). D'autres psychologues insistent au contraire sur le caractère universel du dessin en affirmant que les lois qui gouvernent la configuration des dessins en relief sont en principe identiques dans la vision et dans le toucher, les objets en image étant reconnus sans apprentissage par les nourrissons et les primates supérieurs (Kennedy, Gabias & Nicholls, 1991). Kennedy et ses collègues ont ainsi mis en évidence des règles universelles de représentation graphique comme l'occlusion des objets et la représentation des contours.

[19] Traduction personnelle

D'étonnantes capacités picturales ont été observées chez l'aveugle (Millar, 1991) Les aveugles feraient occasionnellement usage de la perspective, en recourant à la convergence ou au rétrécissement des côtés pour représenter un objet perçu de biais. Nous traiterons de façon beaucoup plus approfondie de la question de la production et de la lecture de dessin en relief chez l'aveugle dans la partie 2.3.2. En nous appuyant sur ces études, nous défendrons la pertinence de l'usage accru du graphique dans l'éducation des jeunes aveugles.

Les aveugles sont longtemps restés en marge du monde des images. Leur accès aux catégories conceptuelles (tableaux, listes, graphes) associées à la technique d'écriture[20] est demeuré partiel. La méconnaissance de l'utilité des images dans le développement cognitif des aveugles ainsi que les contraintes matérielles imposées par leur production semblent être à l'origine de leur de leur faible diffusion. Le passage à l'interface graphique n'a fait que prolonger une situation ancienne. Les technologies actuellement disponibles ne permettent pas encore aux aveugles de percevoir directement les images qui s'affichent à l'écran d'un ordinateur.

- ***L'accès au contenu graphique de l'ordinateur***

Actuellement, les objets graphiques de l'interface (icônes, boutons) peuvent être signalés par la synthèse vocale Jaws **:** l'activation du « curseur Jaws » autorise l'utilisateur à explorer tout l'écran en passant d'un objet graphique à l'autre, ou d'un mot à l'autre[21]. Cette prise de connaissance linéaire se fait pas à pas ; elle est donc longue et fastidieuse. Sur Internet, le nom ou descriptif des images pourra être lu par la synthèse si le concepteur du site a bien fourni une alternative textuelle à cet élément non-textuel, soit respecté la première directive des recommandations du W3C (World Wide Web Consortium, 1999). Néanmoins, cet accès à l'image ne se fait que sur un mode descriptif, ces dispositifs n'ouvrent pas sur l'expérience singulière de la perception de l'image, comme c'est par exemple le cas lors de l'exploration d'un dessin en relief. La diffusion des images tactiles par le biais d'Internet se heurte à un obstacle technique majeur Le Bris (2000)[17]: *« il n'existe pas pour l'instant de périphériques adaptés comme pour la restitution d'un texte ; la consultation d'une image ne peut se faire qu'après tirage sur un support matériel ce qui modifie beaucoup la relation à l'information au regard de la situation du texte».*

[20] Ces catégories conceptuelles participent d'une rationalité particulière que Goody (1979) a nommé « raison graphique ».

[21] www.freedomscientific.com/fs_products/software_jaws.asp

2.1.1.3 L"interface graphique : usage et limites actuelles

Un des changements majeurs dans le développement d'interfaces réside dans le passage de l'interface textuelle à l'interaction graphique (Dourish, 2001) Ce type d'interaction a été conçu à la suite de nombreux travaux dont ceux de Kay (1993) qui se sont appuyés sur l'approche théorique du développement définie par Piaget (voir partie 2.3.1). Tout comme le passage de l'interaction symbolique à l'interaction textuelle a été plus qu'un changement de langage, l'interface graphique ne s'est pas contentée de substituer les icônes aux mots, elle a apporté de nouvelles dimensions (au sens propre comme au figuré) à l'interaction. L'interaction se produit dans un espace bi-dimensionnel plutôt que dans un flux unidimensionnel de caractères. L'interface graphique se caractérise par l'usage de l'espace, l'information prend possession de tout l'écran, le lieu de l'action et de l'attention peut alors se déplacer d'une zone de l'écran à l'autre ou se trouver à des endroits différents comme dans le cas du multifenêtrage. *« La tâche de gestion de l'information est devenue gestion de l'espace »* (Dourish, 2001, p.11) l'interface graphique fait ainsi appel aux aspects suivants :

* L'attention périphérique : par exemple la barre d'état située en bas de l'écran donne des informations utiles pour la gestion des activités mais qui ne sont pas capitales.

* La reconnaissance de pattern et le raisonnement spatial : la capacité humaine à reconnaître des patterns au sein d'un arrangement spatial suggère de nouvelles façons de présenter l'information et de disposer des éléments pour qu'ils forment une entité informationnelle globale. Les techniques de représentation graphique à l'œuvre dans les graphes et les tableaux et qui, à la fois, classent et qualifient le contenu des collections peuvent être réinvesties lors de la transcription de l'information dans un espace bi-dimensionnel.

* La densité informationnelle : un dessin ou un graphe a bien souvent le mérite de pouvoir rassembler, sous une forme succincte, l'information contenue dans un texte de « mille mots ». Comme l'interaction graphique ne se contente pas d'être purement graphique, elle offre un cadre où textes et objets graphiques se complètent dans un espace bi-dimensionnel.

* Les métaphores visuelles : la valeur ajoutée de l'interface graphique prend également place dans de nouvelles possibilités d'actions et dans le contexte où ces actions s'effectuent. La métaphore du bureau constitue le parangon de la manipulation directe. Les objets présentés explicitement et sous une forme qui s'inspire de l'aspect d'objets tangibles se prêtent à un répertoire d'actions analogue aux activités opératoires courantes (ouvrir, fermer, déplacer, supprimer). La manipulation directe parachève les avantages de l'interaction graphique.

Dourish (ibid.) conclut que, même si l'évolution des interfaces a été chaotique, elle a néanmoins suivi les progrès technologiques et les modèles informatiques. Les dispositifs

techniques font appel à un plus large éventail d'habiletés humaines. Dès lors, les ordinateurs deviennent plus facilement accessibles, moins exigeants en apprentissage et s'intègrent mieux à notre vie quotidienne. L'interface graphique est aujourd'hui le mode d'interaction dominant. En ce qui concerne les interfaces pour aveugles, bien des pistes restent à creuser si l'on souhaite procurer à ces utilisateurs une richesse d'interaction similaire. Malheureusement, la qualité des interfaces actuelles demeure faible comparée à celle des interfaces graphiques (Spérandio, 1993). Assurément la manipulation directe via les icônes dispense les utilisateurs de la connaissance d'une syntaxe complexe, leur permet d'atteindre un meilleur niveau de performance (moins d'erreurs, tâches accomplies plus rapidement), facilite l'apprentissage et leur procure plus de satisfaction. Les représentations physiques, spatiales ou visuelles sont beaucoup plus aisées à retenir et à manipuler que les représentations numériques ou textuelles (Jacko, Dixon, Rosa, Scott & Pappas, 1999). La gestion de l'interaction repose sur la perception de l'espace et des couleurs. Elle est facilitée par l'emploi de la souris qui repose sur une coordination entre la vision et l'haptique. En conséquence, elle s'avère non adapté aux aveugles. Il existe néanmoins des souris tactiles comme Virtouch[22] ou vibrante comme Logitech iFeel Mouse[23], cependant les données empiriques permettant de juger de leur apport son quasi inexistantes.

Afin de cerner les difficultés rencontrées par les utilisateurs aveugles nous évoquerons dans les paragraphes suivants des résultats d'études qui ont portés sur trois contextes différents d'utilisation. La première étude, réalisée par Aaronson et Gabias (1987) auprès d'une population d'aveugles et de malvoyants, s'intéresse aux problèmes généraux posés par l'interface graphique. La deuxième, plus locale, a été menée par Kurniawan et Sutcliff (2003) autour d'un lecteur d'écran. Enfin, l'étude de Theofanos et Redish (2003) interroge les liens entre l'accessibilité des sites web et leur utilisabilité.

- ***Classes de problèmes posés par l'interface graphique et les technologies d'assistance***

Aaron et Gabias (1987) relèvent sept types de problèmes. Des études plus récentes (Griffith, 1990 ; Burger 1993 ; Burger & Pican, 1995 ; Descargues, 2000 ; Beumer, Wiethoff et Attema, 2004) nous apprennent que cette typologie est toujours d'actualité.

[22] www.skerpel.com/mouse.htm

[23] www.dansdata.com/ifeel.htm

1. ***Utilisabilité limitée des produits :*** le sens avec lequel Aaronson et Gabias (ibid.) emploient cette notion est plus restreint que son acception actuelle (voir annexe 2). Par utilisabilité limitée, ils désignent les problèmes de compatibilité ou d'interférence entre les dispositifs. Comme nous le révèle le rapport Descargues (2000), ces écueils semblent persister. Les produits ne sont pas toujours proposés après évaluation des besoins de la personne. La logique commerciale prévaut parfois sur la logique d'utilisabilité. Les prestations de services peu intégrées assurent mal le suivi des utilisateurs. Les formations dispensées aussi bien par les fournisseurs d'accès que par les centres de rééducation professionnelle sont, au final, assez décevantes. Les utilisateurs ne disposent pas toujours des compétences informatiques suffisantes pour faire face aux défaillances des systèmes. Ils doivent maîtriser à la fois les nouvelles applications informatiques et leurs adaptations. L'évolution des techniques ne fait qu'accroître les besoins en formation et allonger les listes d'attente des centres de réhabilitation. Beumer, Wiethoff et Attema (2004) préconisent en ce sens de dispenser une aide en ligne et de développer des méthodes de formation efficaces.

2. ***Information incomplète ou non fiable :*** Certains caractères ne sont pas reconnus ou mal restitués par la barrette braille ou la synthèse vocale, ce qui a pour inévitable conséquence de gêner la compréhension.

3. ***Perception limitée :*** Cette notion fait référence aux loupes logicielles avec une résolution insuffisante ou aux synthèses vocales à l'intelligibilité limitée. Notons que des formations sont souhaitables pour que les utilisateurs se familiarisent avec la prosodie des synthèses vocales.

4. ***Astreinte mnésique plus importante jouant à la fois sur la mémoire à court terme et à long terme :*** La ligne de braille éphémère permet de représenter au mieux 40 caractères à la fois. Ainsi, les utilisateurs n'ont accès qu'à quatre ou huit mots par séquence et doivent garder en mémoire, les données précédentes afin d'intégrer les mots dans des phrases et les phrases dans des paragraphes. Précisons également que le double jeux de commande (commandes de lecture écran et commandes propres à l'application logicielle) nécessitent des efforts de mémorisation à court terme et à long terme (Burger, 1993).

5. ***Tâches sensori-motrices perturbées :*** Burger (1993) critique l'idée selon laquelle le clavier ne poserait pas de problème aux aveugles. Outre l'exigence de l'apprentissage, des contraintes se posent au moment où l'utilisateur repositionne ses mains sur le clavier après avoir parcouru la barrette braille, lorsqu'il découvre un nouveau clavier et quand les touches clés sont mal positionnées.

6. ***Feed-back lent et peu fiable :*** Pour avoir accès à l'information présentée à l'écran, les aveugles doivent procéder à des actions séquentielles. Si une personne sans problème visuel repère automatiquement, par le regard, à la fois la position physique (dans l'écran) et contextuelle du curseur (dans le document) au moins deux opérations sont nécessaires à un aveugle : l'une pour connaître la position du curseur et l'autre pour lire le mot (Griffith, 1990).

7. ***Temps supérieurs dans la réalisation des tâches :*** ce point est la résultante des points précédemment mentionnés. En effet, la manipulation rapide et aisée des objets de l'interface fait appel aux pleines capacités visuelles à savoir :

* La discrimination des couleurs et des contours
* Le suivi d'objets en mouvement (par exemple le pointeur souris)
* Le filtrage d'informations dont l'utilité est moindre
* La détection de phénomènes inattendus grâce à la vision périphérique (Burger & Pican, 1995)

- ***Evaluation d'un lecteur d'écran***

Constatant qu'il existait peu d'études sur l'utilisabilité des lecteurs d'écran, Kurniawan et Sutcliff (2003) ont soumis à évaluation un logiciel nommé LooKOut développé par leurs soins. Les auteurs ont établi une typologie des problèmes rencontrés ayant vocation à généralisation. Cinq sujets aveugles (trois aveugles de naissance et deux aveugles tardifs) ayant une pratique informatique supérieure à 12 ans ont exploré librement, lors d'une séance filmée, le logiciel en ne disposant que d'instructions limitées sur son utilisation. L'analyse de l'interaction pointe les difficultés suivantes :

1. Interférence avec les connaissances antérieures, soit entre les raccourcis Windows et ceux du lecteur d'écran traditionnel des utilisateurs.
2. Mauvaise qualité de feed-back : réponse pauvre ou lenteur du feed-back. Pas d'indication sur la fin de tâche. Titre de la fenêtre, de barre de menu, de la boîte de dialogue et icône active non lus.
3. Restitution vocale imparfaite : ruptures dans le discours et non respect de la ponctuation.
4. Charge mnésique : raccourcis clavier difficiles à retenir

Suggestions des utilisateurs

Le niveau d'expertise des utilisateurs les amène à émettre des commentaires que Kurniawan et Sutcliff (ibid.) ont ainsi catégorisés :

* Des raccourcis efficients pour lire un paragraphe entier, marquer des pauses, ou avoir des informations sur la taille et le style des caractères.
* Flexibilité dans le choix des informations sonores et vocales, qui en outre se doivent de rester discrètes : possibilité de contrôler la verbosité, possibilité de désactiver la synthèse vocale pour des raisons de confidentialité
* Adaptabilité du logiciel : des applications destinées à tous et d'autres modulables en fonction du niveau d'expertise

- Fiabilité : éviter (dans la mesure du possible) que le logiciel provoque des arrêts intempestifs du système

- Optimisation de l'utilisation : fournir des informations sur la présentation, la disposition du bureau, le changement de police, un curseur virtuel pour s'entraîner aux raccourcis et explorer les menus sans pour autant exécuter de programme, enfin formuler des questions de confirmation plus courtes.

- ***Accessibilité et utilisabilité***

Dans la plupart des pays occidentaux, des dispositions légales et un ensemble d'associations ont encouragé le respect des normes d'accessibilité. La Section 508 du Rehabilitation Act impose aux sites fédéraux 16 standards d'accessibilité et l'Euro Accesibility[24] qui gère plus de 25 associations issues de 15 pays est chargée d'élaborer une méthodologie commune de validation et d'évaluation (Van Bastelaer, 2004). En France, l'article 47 de la loi n°2005-102 du 11 février 2005 pour l'égalité des droits et des chances, la participation et la citoyenneté des personnes handicapées stipule que *« les recommandations internationales pour l'accessibilité de l'Internet doivent être appliquées pour les services de communication publique en ligne »*[25].

Les recommandations du W3C sont des conditions nécessaires de l'accessibilité. Elles constituent un ensemble de règles indispensables. Cependant, l'étude de Theofanos et Redish (2003), parce qu'elle la relie à l'utilisabilité, montre qu'elles ne sont pas suffisantes. Comme la simple satisfaction des critères d'accessibilité n'a pas suffi à rendre les sites utilisables, la *« Communication Technologies Branch of The United States National Cancer Institute »* a ainsi mené une enquête auprès de personnes présentant un handicap visuel afin de :

- Comprendre les relations entre accessibilité et utilisabilité

- Comprendre comment les aveugles et les malvoyants utilisent les sites web

- Développer des recommandations pour l'accessibilité et l'utilisabilité

- Evaluer l'utilisabilité de sites web destinés aux aveugles et aux malvoyants.

Entre novembre 2002 et février 2003, a été analysée l'activité de navigation de 16 aveugles qui s'aidaient de leur lecteur d'écran habituel (13 Jaws, 3 Windows-Eyes). Au cours de sessions de deux heures, les sujets ont dû tester différents scenarii : visite sur des sites

[24] www.euroaccessibility.org

[25] http://www.legifrance.gouv.fr/WAspad/UnTexteDeJorf?numjo=SANX0300217L

imposés ou libres, utilisation d'application, de formulaires, de liens à ancrage, recours aux moteurs de recherche et de FAQ. Les observations les ont conduits à élaborer en tout 32 recommandations relatives aux trois points suivants :

1. Utilisation du lecteur d'écran
2. Gestion de la navigation
3. Saisie de formulaires

Le lecteur d'écran

Le premier point nous apprend que le parcours rapide des pages est une stratégie privilégiée. L'évaluation de la pertinence d'un lien se fait alors en fonction des premiers mots entendus. Cette technique permet de limiter la charge de travail car les sujets doivent par ailleurs gérer le navigateur, le lecteur d'écran et l'exploration du site. Les sujets ne connaissent pas ou n'utilisent pas toutes les fonctionnalités des lecteurs d'écran. En dépit de leur optimisation, ces derniers commettent toujours des erreurs de prononciation. Enfin, bon nombre d'utilisateurs précisent qu'ils ne souhaitent pas que le site contienne une version texte spéciale.

Les recommandations portent ainsi sur la formulation pertinente des liens, le choix de commandes mnémotechniques, la conception d'une structure de document claire et évidente ou encore l'apprentissage. Les auteurs vont jusqu'à conseiller aux concepteurs d'adjoindre au logiciel des exercices d'entraînement et des démonstrations.

La navigation

Theofanos et Redish (2003) ont observé systématiquement la navigation web chez les sujets malvoyants et aveugles. La plupart souhaitent accéder directement au contenu de la page mais seulement la moitié d'entre eux connaissent l'existence du lien qui permet d'effectuer directement cette action. Les sujets naviguent de lien en lien ou activent la liste de l'ensemble des liens. Comme la fonction recherche ne balaie pas toute la page (elle opère à partir de la position du curseur dans un sens ou dans l'autre) et qu'en outre elle ne lit pas le texte incorporé dans l'image, des mots-clés recherchés peuvent ainsi échapper aux utilisateurs. Par ailleurs, ils sont induits en erreur lorsque la commande « ALT TAG », qui permet de lire le titre d'une image, énonce un contenu différent du commentaire qui accompagne cette dernière. Des sujets effectuent de nombreuses fautes de frappe, ce qui ne facilite pas la

recherche. Les liens ancrés fonctionnent bien uniquement si la page est systématiquement rafraîchie. Certains sujets «sautent » de titre en titre.

Les auteurs insistent à nouveau sur une bonne formulation des liens et des titres qui doivent de façon concise refléter leur contenu et, dans la mesure du possible, se différencier les uns des autres. Elles suggèrent ainsi de positionner des mots-clés au début de titre ou de liens. Les fonctions recherche gagnent à être améliorées par une aide à la frappe (le moteur de recherche de Google est cité en exemple) et par une exploration exhaustive de la page.

La saisie de formulaire

La première «épreuve » consiste à trouver le formulaire. Bien que le curseur virtuel de Jaws (spécialement conçu pour la navigation web) et le fait d'appuyer sur la touche F permettent d'accéder directement au formulaire, aucun sujet n'a agi de la sorte. Lors de la saisie, l'utilisateur bascule sans cesse du mode lecture au mode écriture, ce qui le contraint à des allers-retours entre l'intitulé et le champ correspondant. Bien que le formulaire soit programmé pour éviter cet écueil (en mode édition la touche tab déclenche également la lecture de l'intitulé), le lecteur d'écran en mode édition n'accède pas aux informations situées entre les champs. Les auteurs conseillent, entre autres, aux concepteurs de compléter les inspections automatiques[26] de sites web par une vérification du contenu accessible avec le lecteur d'écran.

• *Conclusion*

La vie professionnelle des aveugles a été grandement facilitée par les technologies numériques. Concrètement ces apports se manifestent par:

1. La possibilité de lire un nombre plus important de documents et d'écrire en toute autonomie.
2. L'échange de données avec les voyants.

« J'ai pu disposer d'un terminal VisioBraille connecté à un micro ordinateur ce qui a complètement transformé ma vie professionnelle et ouvert d'énormes perspectives : ce matériel me permet d'utiliser actuellement tous les logiciels bureautiques et statistiques

[26] Il existe des outils logiciels pour effectuer un audit de l'accessibilité des pages Web en fonction des recommandations du W3C. Appelés également *« inspecteurs »*, ils listent les points de priorité non satisfaits, les erreurs de programmation, les risques de non-compatibilité entre logiciels. Le plus célèbre des inspecteurs est sans doute Bobby (bobby.watchfire.com)

standard sous Windows, de travailler sur plusieurs ordinateurs centraux, d'utiliser des outils tels que le Minitel, la messagerie électronique et bientôt Internet. Il me permet de suivre des stages de formation à l'utilisation de logiciels informatiques avec mes collègues voyants d'animer moi-même de tels stages et de travailler en équipe avec les voyants » (De Roquefeuil ; citée par Chazal, 1999, p. 275).

Ce changement majeur dans l'accès au document serait dû à deux points essentiels :

1. Le partage d'une même source qui dispense d'un autre système de production. La transcription des textes en Braille était dévolue jusque là à des centres spécialisés. Loin d'être rendu inutile le rôle de ces centres est amené à évoluer.

2. La transformation des documents est réalisée par un terminal sous contrôle de l'utilisateur final. Dès lors, l'information peut prendre une forme qui lui soit adaptée. « *Ainsi un lecteur aveugle se distinguera moins par son handicap que par des options de personnalisations différentes, réalisées par des modules logiciels s'inscrivant dans le même système informatique général » et « Si un appareil de mesure est capable d'afficher ses résultats sur une imprimante externe, il peut tout aussi bien piloter un système d'affichage sonore ou tactile »* (Weygand ; cité par Chazal, ibid., p. 271).

En dépit des potentialités introduites par l'informatique, les aveugles continuent de se heurter à des limitations tenaces. En effet, et quels que soient la date et les contextes d'usage, les recoupements sont nombreux entre les analyses d'Aranson et Gabias (1987), Burger (1993), Kurniawan et Sutcliff (2003) et Theophanos et Redish (2003). Ainsi, il existe des problèmes purement techniques :

* Manque de compatibilité entre les différents logiciels utilisés,
* Non respect des recommandations du W3C
* Prosodie imparfaite des lecteurs d'écran.

Néanmoins, les contraintes majeures rencontrées (mémorisation des raccourcis clavier et du lieu d'action, séquentialité des actions) proviennent d'un accès limité à la spatialisation de l'information réalisée par l'interface graphique. En outre, les images affichées et ce, quel que soit leur statut (objets de l'interfaces, illustrations, illustrations interactives), n'apportent aucune ressource et privent parfois les aveugles des contenus pertinents (images sur Internet, applications multifenêtres). Dans ce cas, l'aveugle demeure en grande partie tributaire de la bonne volonté de son entourage. Comme le mentionne De Roquefeuil (citée par Chazal, ibid., p. 275): *« Le métier de statisticien est tout à fait accessible aux aveugles s'ils savent se faire aider pour la lecture de certains documents ou la réalisation de graphiques. »*

La pratique des mathématiques qui fait usage de graphiques, d'expressions bidimensionnelles et qui est amenée à recourir de plus en plus aux technologies numériques représente ainsi le domaine où le besoin de solution se fait particulièrement ressentir.

2.1.1.4 Les aveugles et la pratique des mathématiques

- ***Problèmes posés par la pratique des mathématiques***

Aujourd'hui encore, les aveugles se heurtent à des problèmes notables au cours des quatre situations suivantes (Stöger, Miesenberger & Batusic, 2004) :

1. L'accès à la littérature mathématique (les manuels, le matériel pédagogique, les articles)
2. La préparation des documents mathématiques
3. La navigation dans les expressions
4. La réalisation des exercices : effectuer des calculs, résoudre des problèmes, réaliser des opérations formelles.

Si les deux premières situations trouvent des aménagements satisfaisants, la troisième fait l'objet de développements encore rudimentaires. Quant à la quatrième, elle est quasiment ignorée. En effet, les possibilités de carrière en mathématiques chez les étudiants aveugles subissent encore les limitations dues à la manipulation d'équations complexes (Karshmer, 2004). Par ailleurs, il n'existe pas de solution qui s'intègre dans un système global d'apprentissage et de dialogue et qui s'adresse à des utilisateurs internationaux dont le niveau de handicap peut varier (Karshmer, ibid.). Depuis une dizaine d'années, de multiples projets en Amérique du Nord, en Europe et en Asie, cherchent à doter les aveugles d'équipements qui assurent la compatibilité entre les différents formats utilisés pour encoder les écritures mathématiques (formats numériques, typographiques et braille) et d'outils qui autorisent les étudiants à naviguer dans des équations complexes.

Les codes de notations braille varient suivant les pays. Les codes Marburg (1946) et Nemeth (1972) sont utilisés respectivement en Allemagne, aux Etats Unis et en Italie. Avec les codes français et anglais et l'ItalBra, ils partagent la particularité de disposer de règles contextuelles afin de limiter l'expansion des formules. En contrepartie, ils sont lourds et complexes à retenir. Le code français a été modifié en 2001 pour faciliter sa traduction et il est encore trop tôt pour évaluer son impact (Moço & Archambault, 2004). En mathématiques, il existe un

clivage important entre les formats de présentation et les formats de contenus. Les premiers mettent l'accent sur l'aspect physique, leur structure répond aux propriétés visuelles (ou physiques) de la formule et les seconds rendent explicite sa structure sémantique. Le logiciel de traitement de texte LaTex[27], et la plupart des notations braille appartiennent à la première catégorie. OpenMath[28], norme récente de représentation des objets avec leur sémantique relève de la seconde (Pontelli & Palmer, 2004).

Pour favoriser la conversion et l'interprétation des différents formats, le W3C a développé un langage à marquage issu du XML et spécialement dédié aux formules mathématiques. Sa syntaxe simple et concise code à la fois la notation (MathML Presentation Mark-Up) et le contenu (MathML Content Mark-Up). L'usage de MathML s'est répandu aussi bien dans des associations comme *l'American Mathematical Society* et *The OpenMath Group* que dans les applications logicielles (Pontelli & Palmer, 2004). Enfin, l'apparition d'outils de conversion entre le TeX/LateX et MathML a également contribué à sa progression. Malgré ces nombreuses initiatives, l'accessibilité des formules mathématiques nécessite de plus amples recherches.

Les expressions mathématiques s'inscrivent dans un espace bi-dimensionnel, leur interprétation repose sur la connaissance de règles de présentation spatiales, ce qui rend leur restitution difficile sur un mode linéaire (Pontelli & Palmer, 2004). La conversion en braille de certains caractères mathématiques passe par des séquences spéciales, particulièrement nombreuses dans le braille six points, ce qui rend la lecture et l'écriture des formules d'autant plus fastidieuses. Ce problème se renforce avec les réticences qu'éprouvent les professeurs de mathématiques à apprendre les notations mathématiques braille[29] (Karshmer, 2002[30] ; Crombie, Lenoir, McKenzie & Barker, 2004).

Stöger, Miesenberger et Batusic (2004) décrivent étape par étape l'activité d'un élève aveugle qui développe une expression mathématique à l'aide d'un ordinateur équipé d'une barrette braille. De cette analyse ils dégagent un certain nombre de difficultés :

---

27 http://www.latex-project.org/

28 http://www.openmath.org/cocoon/openmath//index.html

[29] A ce propos, signalons l'existence du logiciel READMATH, distribué par Eurobraille et initialement développé par Rahmadi Hamdi, professeur de mathématiques au centre Normandie Lorraine, qui permet de transcrire en noir et de mettre en forme les formules en braille. http://www.eurobraille.fr/WAI/readmath.htm

[30] http://www.snv.jussieu.fr/inova/villette2002/res5.htm

* Des allers-retours permanents entre l'exercice et le résultat,
* La nécessité de se souvenir des positions des différents éléments,
* Le besoin de garder des termes de référence en mémoire,
* La mémorisation de produits partiels qui doivent être ajoutés au résultat,
* Des recherches bidirectionnelles de part et d'autre du terme de références.

Ils en déduisent que l'environnement de travail en mathématiques « MaWen » (Mathematical Working Environment) doit assister l'élève dans la réalisation des tâches précédemment identifiées comme problématiques et alléger en priorité la charge mnésique. Ils proposent quelques mesures concrètes comme l'attribution d'une fenêtre spéciale aux résultats intermédiaires, l'automatisation de la juxtaposition d'un résultat partiel à proximité du résultat final, le contrôle des retours en arrière avec mise en évidence de la position à partir de laquelle le calcul reste à effectuer, la disparition des éléments traités ou une mention pour indiquer qu'ils l'ont déjà été. Néanmoins, ces fonctions sont des ajustements locaux pour une tâche bien précise. Pour un environnement d'apprentissage plus étendu, de nouveaux outils sont à concevoir. En effet, il existe des habiletés visuelles qui sous-tendent l'activité mathématique des voyants, nous verrons dans la partie 2.3.1.4 que l'utilisation appropriée d'une figure mathématiques passe par ce que Stevens et Hall (1998) appellent une *« perception disciplinée »*. Le projet MaWen (Stöger et al., ibid.) cherche à expliciter ces habiletés afin de les structurer dans des fonctionnalités qui forment le noyau de l'environnement d'apprentissage. Si, de manière générale, l'accessibilité est largement initiée, l'utilisabilité est pour le moment très loin d'être garantie. Concernant uniquement la lecture et l'interprétation des formules, Ferreira et Freitas (2004) relèvent plusieurs difficultés :

1. Le déficit de connaissances et d'études sur la lecture de formules mathématiques
2. Des navigateurs dont les ressources sont insuffisantes pour gérer les différents formats mathématiques (les codes braille et les logiciels tels que TeX/LateX)
3. Des analyses syntaxiques complexes d'expressions mathématiques
4. L'identification automatique d'éléments lexicaux et non lexicaux requiert une conversion dans un texte simple. Elle est entravée par l'usage de caractères et de présentations provenant d'une autre culture.
5. La synthèse vocale alliée au module de conversion exige des capacités de traitement importantes pour une lecture rapide

6. La nécessité de mécanismes de navigation spécifiques aux formules qui permettent la répétition ou la lecture personnalisée des contenus.

D'après Pontelli et Palmer (2004) les solutions techniques doivent répondre alors aux besoins suivants :

* possibilité de représenter toutes les constructions mathématiques en braille,
* choix dans la notation braille utilisée,
* présence simultanée de la traduction braille et de l'expression graphique de la formule.

Si on ajoute la nécessité d'offrir un accès direct aux images affichées au sein d'une interface d'utilisation aisée alors le cahier des charges s'alourdit considérablement.

- ***Le rôle ambigu du graphisme chez le mathématicien aveugle***

Dans *« Les aveugles aux travail »* de Chazal (1999), les mathématiciens aveugles décrivent la manière originale avec laquelle ils exercent leur métier. Leur capacité d'abstraction les aide à dépasser les difficultés concrètes induites par la cécité. «*Après une scolarité jusqu'en classe de troisième en milieu spécialisé, j'ai été intégré dans un lycée ordinaire où j'ai passé le baccalauréat. Cette période révéla mes aptitudes certaines pour les mathématiques et la physique, matières dans lesquelles je me classais toujours parmi les premiers. Je poursuivis mes études supérieures à l'université de Marseille où j'obtins un DEUG de mathématiques, puis une licence et une maîtrise informatique »* (Léon ; cité par Chazal, 1999, p. 259).

Giroux (cité par Chazal, ibid.) évoque les mathématiciens aveugles qui ont marqué l'histoire de la discipline comme Nicolas Sauderson qui a perdu la vue dans sa petite enfance et qui, dix ans après Newton, a occupé la chaire de mathématiques à Cambridge. Sans nier pour autant la place du dessin dans l'activité des mathématiciens, Giroux (cité par Chazal, ibid.) soutient que *« les mathématiques sont une activité indifférente à la cécité […] L'activité mathématique est purement intellectuelle, consiste à manier des concepts et non des objets, suit toute règle de conduite la logique et ignore superbement la matière environnante […] Les figures n'ont aucune signification propre et ne sont que la réduction schématique de la pensée, qui sert , selon le cas, à synthétiser une observation clé, à fixer l'attention du regard ou à pallier un langage déficient pendant que l'ont discute soit avec les autres, soit avec soi-même »* (p. 269).

Cependant, les contingences matérielles actuelles ne facilitent pas toujours l'apprentissage des élèves aveugles: « *il faut un véritable don pour les mathématiques pour vaincre les difficultés*

que pose l'écriture braille dans ce domaine » (Weygand ; cité par Chazal, ibid., p. 271). Un des obstacles majeurs réside dans la consultation des documents (Charlin, Giroux ; cités par Chazal, ibid.). L'aide d'autrui se révèle parfois indispensable. Ainsi, Jacques Charlin, enseignant en mathématique, demande à un de ses élèves d'écrire sous sa dictée le cours au tableau. Si l'exercice exige une figure complexe, il lui prête un modèle. Enfin, la correction se fait à voix haute.

Les dernières avancées technologiques leur semblent prometteuses, même si la lecture des formules mathématiques est gourmande en ressources informatiques : *« évidemment, le codage, très précis donc assez lourd, des formules mathématiques, rend la lecture un peu fastidieuse mais il semble que des programmes récents se préoccupent d'améliorer le confort »* (Giroux, cité par Chazal, ibid., p. 268). De son côté, Jacques Charlin *« fonde l'espoir sur un logiciel qui devrait bientôt permettre aux utilisateurs d'un terminal braille d'avoir accès au traitement de texte scientifique TEX tant pour l'écriture que pour la lecture »* (cité par Chazal, ibid., p.185).

Ces témoignages nous enseignent que, pour les aveugles qui excellent dans la discipline mathématiques, l'usage limité du graphique n'a pas constitué d'entrave cognitive. Les attentes technologiques exprimées portent essentiellement sur la lecture de formule, la demande d'un accès aux figures mathématiques sur format numérique n'apparaît pas spontanément dans leur propos. Cependant, il serait intéressant d'examiner si ces mathématiciens se passent totalement de la médiation graphique dans leurs activités. En effet, ces propos d'experts sont très loin de refléter la situation de l'ensemble des aveugles qui pratiquent les mathématiques. Le temps consacré à la phase empirique (pendant laquelle l'élève peut s'aider d'une figure ou un schéma) qui conduit à la formalisation mathématique du problème varie en fonction des capacités d'abstraction des apprenants (que ces derniers soient aveugles ou voyants). Nous nous intéresserons aux apports didactiques de la représentation graphique dans la partie 2.3.1.3..

Dans cette partie 2.1.1 nous avons identifié deux aspects de l'interaction homme machine qui sont la source d'une inégalité dans l'accès à l'information : il s'agit de la lecture des images et de la manipulation directe d'objets spatialisés (icônes, tableaux, expressions mathématiques). Ces déficits constatés, voyons quelles approches théoriques et méthodologiques peuvent être mobilisées dans la conception d'interfaces dédiées à des utilisateurs avec des besoins spécifiques.

2.1.2 Approches théoriques et méthodologiques pour la conception d'interfaces dédiées à des personnes avec des besoins spécifiques

Dans ce chapitre, nous nous pencherons sur des approches de la conception inscrites dans une approche constructiviste et nous examinerons les recherches méthodologiques en faveur de la conception d'interfaces pour handicapés en général et pour aveugles en particulier. Nous entendons par constructivisme un paradigme qui développe les idées suivantes :

* La connaissance se construit dans la relation qui lie l'humain à son milieu et non dans la mise en correspondance entre des symboles formels et des classes de situation d'un monde réel prédéterminé

* Ce processus d'élaboration passe par le corps et ses schèmes d'action. L'activité sensori-motrice joue un rôle crucial dans la genèse des connaissances y compris des connaissances abstraites.

Il n'existe pas, à notre connaissance, d'études qui revendiquent ces deux dimensions : choix théorique du constructivisme et méthodologie orientée vers la conception d'interface pour aveugles. Si les études du Universal Design développent une conception centrée utilisateur, laquelle a été défendue par Norman (1986, 1989) lors d'une critique du cognitivisme, leurs choix théoriques sont rarement explicités ou ne se démarquent pas de ce paradigme.

- ***Vers une approche anthropocentrée de la conception***

Le cognitivisme a longtemps été le paradigme dominant pour penser l'interaction entre l'homme et la machine. Cette approche qui prend le traitement de l'information comme métaphore de la cognition a été remise au sein de la communauté des HCI (Human Computer Interaction) à la fin des années quatre-vingts (Norman 1986, 1989). Ainsi, le Kittle House Manifesto (Caroll, 1991) appelle à une refondation de la psychologie des HCI. Si, dans les années soixante-dix, les méthodes de laboratoire ont connu, dans le champ des HCI, un succès mitigé, les théories computationnelles se sont révélées d'une portée encore plus limitée. En effet, ces théories négligent l'activité des sujets en situation et proposent souvent des méthodes d'évaluation à posteriori lesquelles arrivent trop tard et se montrent donc d'un faible secours en matière de conception. En outre, ces évaluations ont lieu sur une durée courte et n'observent que les habiletés acquises à l'issue des premières heures d'utilisation. Les aspects

développementaux relatifs à la fois à l'usage et aux compétences des opérateurs ne sont pas pris en considération (Rabardel, 1995 ; Bannon & Bodker, 1991).

Les théories de l'activité et de l'action située, qui sont des alternatives au cognitivisme, vont ainsi s'intéresser à la façon dont les artefacts vont modifier les usages et comment ces derniers prennent place dans un contexte socio-organisationnel. La démarche, que nous avons employée (voir 3.1) relève d'une épistémologie proche de ces alternatives.

2.1.2.1 Théorie de l'activité et genèse instrumentale

Béguin et Rabardel (2000) reviennent sur les mérites des théories de l'activité et proposent une approche médiationnelle et développementale des technologies contemporaines. Nous exposons à la suite leur cadre théorique ainsi que les résultats d'une étude qu'ils ont menée lors de l'introduction d'un logiciel de Conception Par Ordinateur (CAO). Cette étude aborde, à travers une approche constructiviste, une activité médiatisée qui vient se substituer à une activité de production de schémas sur support papier. Elle offre, de ce fait, une double parenté avec notre propre étude (voir partie 3).

- ***Théories de l'activité***

Béguin et Rabardel (2000) soulignent la nécessité de concevoir à partir d'une approche anthropocentrée. Dans le sillage des théories de l'activité, ils proposent un cadre d'analyse où les instruments sont appréhendés comme des artéfacts mais également comme *« des réalités psychologiques et sociales. »* Le concept *« d'activité de travail »*, central en Ergonomie de Langue Française, a été introduit par Ombredane (1955) et Faverge (1970). Les travaux de ces derniers s'inspirent à la fois de la psychologie de Wallon et de Piaget et des théories computationnelles d'origine anglo-saxonne. Les théories de l'activité, nées en Union soviétique dans les années 1920 (Vygotski, 1930, 1931 ; Luria 1979 ; Leontiev 1972, 1981 ; Rubinstein, 1958), ont également alimenté des courants de recherches en psychologie du travail et en anthropotechnologie (Rabardel, 1991 ; Clot, 1995, 1999 ; Wisner, 1997).

D'après Béguin et Rabardel (2000), les théories de l'activité offrent un équipement conceptuel pour penser la conception bien que des recherches soient encore nécessaires pour que les apports de ces théories soient transposables dans le domaine des sciences de la conception. Leur objectif consiste alors à construire à partir de ces théories *« des méthodes pour agir efficacement sur la conception des instruments* » (ibid., p.36).

Les théories de l'activité considèrent l'instrument comme *« un médiateur »* (Kaptelinin, 1996) à travers lequel les opérateurs agissent (Bodker, 89). Une approche développementale s'avère pertinente pour comprendre comment l'instrument modifie la situation et comment s'exerce l'activité des utilisateurs. Ces derniers adaptent, modifient ou encore détournent les artéfacts. Il s'agit pour Béguin et Rabardel (2000) de rendre compte de cette inventivité. Les connaissances produites sont alors réinvesties dans la conception.

Or, il existe deux façons d'envisager les processus de conception (Norman, 1991) :

1. on peut mettre au premier plan le développement technique (*« system view »*), l'activité des opérateurs est alors contingente
2. ou placer les activités psychologiques et sociales au cœur de la conception (*«personal view »*).

L'approche développementale s'inscrit dans la deuxième tradition. Béguin et Rabardel (2000) appliquent une méthode de conception héritée de l'approche développementale à travers une étude consacrée à l'introduction d'un logiciel de C.A.O destiné au génie électrique. Cette étude présente également un intérêt méthodologique dans la mesure où elle organise un parallèle entre une situation traditionnelle et une situation nouvelle. Nous verrons, par la suite, que ce procédé est également à l'œuvre dans la conception des prototypes d'accès non-visuels aux objets graphiques (voir section 2.2).

- ***Introduction d'un nouvel outil de CAO et genèse instrumentale***

L'étude a été réalisée à la demande d'une entreprise afin de rendre compte de l'utilisation non optimale du logiciel de CAO. Au lieu d'exécuter toute la conception avec le système de CAO, les opérateurs réalisent les schémas sur le papier puis le saisissent à l'aide de l'informatique. Afin de comprendre la persistance du support papier dans la nouvelle activité, un parallèle est établi entre la situation ancienne et la situation informatisée. Il est ainsi demandé à l'un des opérateurs de concevoir de façon traditionnelle puis de réaliser cette activité avec le support informatique. Les deux situations ont été filmées. Les observables suivants ont permis de contraster les deux situations :

1. indices comportementaux : verbalisations spontanées et orientations du regard
2. déroulement de la production afin de révéler *« la dynamique d'élaboration des spécifications par le concepteur »*. Sont alors analysés : *« l'ordre de production des signifiants et la nature de la production (production de signifiants nouveaux versus modification telles que les rayures, et les productions nouvelles consécutives à des*

rayures) » (ibid., p. 38). Des entretiens pendant lesquels l'opérateur est confronté avec sa propre activité ont également été réalisés.

Analyse de l'activité de conception sur papier

Le concepteur produit sur papier une première approximation graphique d'une structure électrique appelée minute. Au sein de cette activité, ont été identifiées cinq périodes qui se caractérisent chacune par *« une organisation invariante de l'action de conception »* (ibid., p.39). Chacune de ces périodes présente un cycle de deux phases :

1. Phase générative : l'opérateur prend connaissance des propriétés de l'objet électrique puis les transpose sur le schéma.
2. Phase évaluative et itérative : la production est évaluée, modifiée puis vérifiée.

Cette organisation cyclique peut être qualifiée de schème de conception.

Analyse de l'activité de conception informatique

Dans cette situation, l'opérateur n'a pas la possibilité de mettre en œuvre le schème précédemment identifié. Six périodes de production du graphique sont identifiées, mais celles-ci sont spécialisées. Les trois premières sont uniquement génératives tandis que les trois autres ne sont qu'évaluatives ou itératives. La conception à l'écran impose à l'opérateur deux tâches qui peuvent entrer en conflit :

* Une tâche de conception caractérisée par une forte incertitude
* Une tâche de saisie qui, au contraire, exige une grande certitude

Contrairement au logiciel de CAO, le support papier permet de gérer de façon souple l'incertitude inhérente à la tâche de conception. *«C'est la nécessité de maintenir intact le schème de conception instrumenté qui entraîne le dédoublement de la tâche en deux sous-tâches : celle de conception sur papier puis celle de saisie sur informatique »* (ibid., p. 41).

La situation de conception « *papier* » met en évidence le caractère mixte de l'instrument médiateur qui possède à la fois une composante *« artefact »* (papier, crayons, gomme, signes et symboles de production graphique) et une composante *« schème » (« le schème de conception instrumentée »).*

En outre, trois formes de médiations peuvent être distinguées :

1. La médiation pragmatique : *« l'instrument permet au concepteur de produire des évolutions du système électrique »* (ibid., p. 43)

2. La médiation épistémique : *« l'instrument permet au sujet de prendre connaissance des caractéristiques de l'objet »* (ibid., p.43)

3. La médiation heuristique : elle *« permet au sujet de gérer sa propre activité »* (ibid., p.43).

Ainsi, l'objet technique n'acquiert le statut d'instrument que par les usages qu'il incorpore tandis que l'instrument est à envisager selon les différents types de finalité qui peuvent lui être attribués.

- ***Perspectives pour la conception***

Cette approche de l'instrument éclaire les processus développementaux dont les catachrèses constituent une illustration emblématique. Ces dernières se produisent quand un schème habituellement associé à un artefact se porte vers un autre artefact. Par exemple, enfoncer un clou à l'aide d'une chaussure. Les catachrèses n'opèrent pas seulement un détournement ; elles témoignent de la contribution des opérateurs à l'élaboration de leurs propres instruments. *« La genèse instrumentale »* rend à la fois compte des évolutions que l'activité des opérateurs fait prendre à l'artefact, et de l'émergence de schèmes d'utilisation. Deux processus qui émanent du sujet et contribuent alors à la constitution des instruments : l'instrumentation et l'instrumentalisation. L'instrumentation désigne l'émergence et l'évolution des schèmes. L'instrumentalisation concerne l'évolution de l'artefact. On peut s'appuyer sur ces deux dimensions pour concevoir.

Schèmes d'utilisation et conception

Le schème[31] d'utilisation est selon Rabardel (1991, 1995) *« une organisation active de l'expérience vécue, qui intègre le passé et qui constitue une référence pour interpréter des données nouvelles »* (Béguin & Rabardel, 2000, p.45). Les schèmes sont assimilateurs, dans le sens où un même schème peut s'appliquer à plusieurs artéfacts. Ils sont également accommodateurs car ils peuvent se transformer sous l'influence d'une nouvelle situation. Ils recèlent à la fois une dimension privée et une dimension sociale car les schèmes s'élaborent dans un espace partagé. Ils peuvent être transmis d'un utilisateur à l'autre ou être suggérés par les modes d'emploi.

[31] La définition originelle du schème est présentée dans la parte 3.3.1.

Les dimensions du schème ainsi que ses propriétés sont à considérer lors de la conception, aussi bien en amont qu'en aval de la démarche. L'analyse des processus d'assimilation et d'accommodation se montre particulièrement pertinente lors de l'évaluation ou de l'introduction de l'artefact. Comme ces processus s'élaborent parfois lentement, il faut alors recourir à une démarche proactive en s'appuyant sur les schèmes sociaux existants. Loin de constituer un frein à l'innovation, cette approche infléchit la conception pour mieux répondre à l'activité des opérateurs (ou des utilisateurs) ainsi qu'à leurs besoins.

Instrumentalisation et conception

Ce concept est relatif à toutes les évolutions que peuvent subir les artefacts : sélection, regroupement, transformation, attribution de fonctions. Le processus *« prend appui sur des caractéristiques et propriétés propres de l'artefact, et leur donne un statut en fonction de l'action en cours et de la situation »* (Béguin et Rabardel, 2000, p.47). Plutôt que de proposer des systèmes adaptables (les utilisateurs ne disposent pas toujours des ressources pour découvrir les bonnes adaptations), la solution souhaitable consiste plutôt à s'inspirer des artefacts issus des processus d'instrumentalisation. En effet, ces derniers révèlent les potentialités d'usage induites par les artefacts.

Conception et genèse instrumentale

La créativité et l'inventivité des opérateurs sont constitutives de la genèse instrumentale. Aussi, celles-ci doivent être confrontées à celle des concepteurs lors des cycles de conception. Les genèses instrumentales peuvent prendre place au sein du processus de conception afin que s'articulent conception institutionnelle et *« conception dans l'usage. L'expérimentation de l'artefact dans l'usage, réalisée dans des situations suffisamment significatives, et sur des périodes suffisamment longues, met les principes de conception à l'épreuve, révèle les besoins et les problèmes quotidiens des utilisateurs, et ouvre sur des potentialités nouvelles. L'organisation du processus de conception gagne donc en efficacité lorsqu'elle alterne conception et usage »* (ibid., p. 50).

En faisant de l'instrument une réalité mixte qui, au delà de sa matérialité, encapsule des usages, l'approche instrumentale met en lumière l'activité médiatisée et ses transformations. Cette caractérisation nous semble a fortiori pertinente pour concevoir des systèmes destinés à des populations avec des besoins spécifiques. En effet, les situations d'interaction entre un

aveugle et un dispositif présentent une grande singularité voire un caractère inédit (dans le cas des prototypes) et relèvent d'autant les exigences de l'analyse de l'activité.

Egalement dans une perspective médiationnelle, la réflexion de Dourish (2001) investit les avancées technologiques comme la réalité virtuelle et la réalité augmentée. Comme ces modalités d'interaction sont employées dans les prototypes destinés aux personnes aveugles pour les inviter à des manipulations directes d'objets graphiques, considérons les approches théoriques qui permettent d'appréhender les interfaces tangibles et leur conception.

2.1.2.2 Interfaces tangibles et action située

Les technologies actuelles impliquent davantage d'aptitudes et d'habiletés humaines. Cependant, les prototypes sont développés de façon opportuniste, encouragés par la technologie des capteurs et la création de nouveaux effecteurs. En outre, il n'existe pas de théorie de l'interaction tangible ce qui a conduit certains chercheurs à s'intéresser à la façon dont les systèmes interactifs se manifestent dans notre environnement et s'incarnent dans nos activités quotidiennes. Pour penser l'interaction tangible et sa dimension sociale (« *social computing* »), Dourish (ibid.) se place sous le paradigme de l'action située. « Maquis » foisonnant, selon Béguin et Clot[32] , car il emprunte à la fois à la phénoménologie, à la sociologie (Ecole de Chicago, ethnométhodes et phénoménologie sociale) à l'anthropologie cognitive, à la psychologie et aux sciences de l'ingénieur.

Interfaces tangibles

Dourish (2001) emploie l'expression *« computation tangible » (« tangible computing »)* avec un sens générique pour parler d'une computation qui ne se cantonne plus seulement au bureau et tente de s'intégrer à l'expérience quotidienne du monde physique et social. Trois tendances s'en dégagent :

1. La computation se distribue entre des appareils localisés dans un même environnement.
2. Il est possible « d'augmenter » des outils traditionnels comme le papier, les stylos, en les rendant réactifs aux données de l'environnement.
3. La création d'un environnement physique où l'interaction s'effectue à travers des artefacts physiques plutôt qu'avec les interfaces graphiques traditionnelles.

Par ailleurs, le « tangible computing » présente trois propriétés majeures :

[32] http://www.activites.org/v1n2/html/beguin.fr.html

1. Dans cette forme d'interaction, il n'y a pas qu'un seul point de contrôle. Une même action va se réaliser à travers la coordination de plusieurs artefacts.

2. L'interface tangible rend obsolète les interactions séquentielles qui sont une conséquence de l'unicité du point d'action. Si l'interaction devient tangible, alors le champ des actions possibles ne saurait s'inscrire uniquement dans la succession linéaire des boîtes de dialogue.

3. Dans la conception d'interfaces tangibles, on peut s'appuyer sur les propriétés physiques des artefacts pour suggérer leur usage. Ces affordances peuvent guider l'utilisateur pas à pas et induire un schème d'action séquentiel plus facilement exploitable par la computation.

Etant donné que ces usages s'élaborent dans un espace partagé, les interactions sociales sont également à prendre en considération dans la conception d'interface tangible.

« Le social computing »

Cette expression désigne selon Dourish (ibid.) l'ensemble des activités de recherches qui tentent d'intégrer des connaissances d'ordre sociologique à la conception de systèmes interactifs. Bien qu'issues de courant théoriques variés (ethnographie, ethnométhodologie). Ces recherches partagent trois caractéristiques :

1. Elles s'intéressent à l'organisation des conduites humaines plutôt qu'aux tendances sociales

2. Elles privilégient l'étude des activités réelles à l'élaboration de modèles

3. Enfin, elles adoptent une approche anthropologique de recueil et d'interprétation de données

L'interaction tangible et le *« social computing »* relèvent d'un même programme de recherche car ils partagent les mêmes principes fondateurs. Les deux approches exploitent notre familiarité avec l'environnement et le fait que notre appréhension du monde se déroule à travers l'exploration de nos opportunités d'action. Autrement dit, on ne peut établir de séparation épistémologique entre l'individu et le monde dans lequel il vit et agit, ou encore isoler les processus mentaux du contexte. Or, aujourd'hui encore, dans le domaine de l'IHM, prévaut ce *« naïf cognitivisme cartésien »* (ibid.) qui dissocie la pensée qui opère selon des règles formelles et postule l'existence d'un monde extérieur prédéterminé. Il n'est pas possible de reproduire la cognition humaine par des formalismes logiques puisque celle-ci est inséparable de notre présence corporelle. Cette expérience sensible émerge à travers l'action et notre exploration du monde, notamment de ses affordances physiques, s'effectue par

l'action. L'idée centrale de l'approche de Dourish (ibid.) réside dans ce qu'il nomme *« l'embodiement »*. Il voit en Gibson (1966, 1979) l'un des inspirateurs de ce concept. Gibson qui a donné naissance, dans les années 50, au courant de la psychologie écologique, a longtemps étudié la perception visuelle en lien avec l'activité locomotrice de l'organisme vivant, ce qui l'a amené à critiquer l'approche classique qui sépare perception et action, organisme percevant et environnement. Dans sa définition originelle, l'affordance est un trait de l'artefact ou de l'environnement qui rend possible certains types d'actions pour l'être vivant doté de l'équipement approprié (Gibson, 1979). Ce concept, revisité par Norman (1989, 1999), a eu une grande audience dans la communauté de IHM (voir annexe 2). Il est alors employé pour désigner la propriété d'un objet à suggérer son usage.

A partir de cette réflexion qui articule conceptualisation des interfaces tangibles et action située, Dourish (2001) dégage six principes de conception :

1. La computation est un média : la signification est échangée et partagée à travers des technologies interactives et la computation en est l'élément central. Cette idée assez ancienne puise ses origines dans les travaux de Seymour Papert (1993) et Alan Kay (1993) qui, inspirés par les théories de l'apprentissage, ont vu dans l'ordinateur une matrice de l'apprentissage (voir annexe 3).

2. Il existe différents niveaux de signification : les artefacts véhiculent aussi les signifiants d'un sens social ou des éléments dans un système de pratique. Même si le rôle du concepteur est capital, la création et l'attribution de la signification ne relèvent pas de sa seule initiative.

3. Les utilisateurs et non les concepteurs créent et communiquent la signification.

4. Les utilisateurs et non les concepteurs réalisent le couplage : Traditionnellement, deux responsabilités incombent au concepteur : la première concerne l'artefact dans sa forme et sa fonction, la deuxième son usage. Cependant, le processus par lequel les utilisateurs adaptent et s'approprient les systèmes est plus rarement étudié. L'approche traditionnelle se contente de gérer l'interaction à travers le contrôle des paramètres de l'artefact.

5. L'artefact participe au monde qu'il représente : Dourish (ibid.) propose un modèle de l'artefact qui dépasse la traditionnelle séparation entre la représentation et l'objet. D'après lui, ces entités ne siègent pas dans deux mondes différents mais participent d'une unique réalité.

6. « L'embodiement » transforme les actions en signification : la signification réside non pas dans le système mais dans la façon dont il est utilisé et s'intègre lui même dans un système plus vaste.

Trois recommandations viennent compléter l'ensemble de ces principes :

1. Lors de la conception d'un nouveau dispositif tenir compte des croyances, des conventions et des pratiques associées à la technologie

2. Concevoir pour différents niveaux de participation

3. Considérer comment une communauté exprime ses valeurs à travers l'outil et comment ces dernières évoluent

L'approche théorique de Dourish (ibid.) peut être rapprochée de la conceptualisation de Béguin et Rabardel (2000). En effet, elle développe une approche anthropocentrée et considère l'instrument comme une médiation qui comporte à la fois une dimension psychologique et une dimension sociale. Cependant, la trame conceptuelle proposée n'apparaît pas, en première approximation, aussi opératoire que le cadre d'analyse de Béguin et Rabardel (2000). En outre, l'action située a tendance à expliquer l'activité du sujet par des invariants qui lui sont extérieurs (structure de l'objet, du système, pratiques, institutions etc.) Elle ne permettrait pas alors, d'après Béguin et Clot[33] de *« rendre compte du développement de l'activité ni du rapport entre ce qui est donné dans la situation de travail et ce qui se crée dans la situation par les acteurs ».*

Parmi les autres travaux qui défendent une conception anthropocentrée ou plus exactement une conception centrée utilisateur[34], le champ de recherches de l'Universal Design nous intéresse particulièrement car il aborde explicitement la question du handicap. Les études à caractère méthodologiques (modèles et méta modèle pour la conception, grilles d'évaluation) donnent lieu à de nombreuses recherches dans cette communauté. En outre, ces recherches qui concernent des populations avec des besoins spécifiques contribuent au développement théorique et pratique de l'ensemble de la discipline (Griffith, 1990).

2.1.2.3 Le Universal Design : un nouveau et vaste champ de recherches

Les initiatives récentes en faveur d'une conception destinée à tous les utilisateurs, quel que soit leur type ou leur degré de handicap, apparaissent sous les divers labels de: « Universal Design », « Design for all » (DfA), « Universal Design For All », « Accessible design » ou encore « Inclusive Design ». Selon Bülher et Stephanidis (2004), l'ensemble de ces initiatives

[33] http://www.activites.org/v1n2/html/beguin.fr.html

[34] L'approche anthropocentrée est selon Béguin et Rabardel (2000, p. 1) *« une approche où les objets sont délibérément conçus à partir de l'activité des opérateurs et pour être au service de leur activité »*. La conception centrée utilisateur cherche à adapter l'interface aux caractéristiques de l'utilisateur mais n'attribue pas nécessairement à l'activité un rôle fondamental.

recèle néanmoins des disparités. Ainsi, certains appréhendent le DfA comme une démarche politiquement correcte qui consiste à adjoindre au système quelques particularités pour utilisateurs spéciaux. Pour les autres, dont font partie les auteurs, le DfA donne un nouveau souffle au design. Cette deuxième vision entend hisser la conception centrée utilisateur au rang d'une philosophie du design qui respecte les valeurs de l'utilisateur et intègre le champ des habiletés humaines, les besoins et les préférences dans la conception de tous les dispositifs et environnements informatisés. L'acceptabilité et l'individualisation viendraient se substituer aux adaptations pour utilisateurs avec des besoins spécifiques. La commercialisation d'adaptations de systèmes standard vient toujours en décalage de l'évolution des technologies. Cette attitude réactive est certes louable mais ne saurait être pleinement satisfaisante. Bühler et Stéphanidis (ibid.) préconisent une stratégie proactive qui ne peut qu'encourager la recherche dans les domaines concernés et reposer sur une responsabilité partagée. Si, aujourd'hui, l'importance et les enjeux du DfA ne sont plus à démontrer, sa réalisation demeure très exigeante. Comme nous allons le voir par la suite, les nombreuses voies empruntées reflètent bien l'envergure de cette entreprise.

- ***Du User Centred Design (UCD) au Design for All***

Le DfA se situe dans le prolongement du UCD. Le UCD met l'utilisateur au cœur du processus de conception notamment dans les phases évaluatives. Norman, à la fin des années 80, avait prônée une conception centrée utilisateur. Après en avoir exposé les concepts et les idées phares dans DOET (Design of Everyday Things) (1989), il a conclu sa démonstration par sept recommandations en faveur de l'UCD.

1. Utiliser les connaissances contenues dans l'esprit et dans l'objet
2. Simplifier la structure des tâches
3. Rendre les choses visibles
4. Offrir un bon mapping[35]
5. Exploiter le pouvoir des contraintes naturelles et des contraintes artificielles
6. Tenir compte des erreurs dans la conception

[35] Ce terme désigne la relation entre deux choses, soit par exemple entre des mouvements de contrôle et leurs effets sur le monde. Un mapping naturel tire profit des analogies physiques et des standards culturels et se prête immédiatement à la compréhension. Le volant repose sur un bon mapping : une rotation vers la droite entraînera le véhicule dans cette même direction.

7. Quand tout le reste échoue standardiser.

Cependant, les contraintes supplémentaires que pose le DfA révèlent toute sa complexité. A cette approche correspondent différents niveaux de prise en charge du handicap (Newell & Gregor, 2001):

* La conception dite «standard » qui occupe une position dominante et qui s'adresse à un utilisateur supposé sans handicap sensoriel, moteur ou mental,
* La conception de systèmes exclusivement réservés aux personnes avec un handicap,
* L'Universal Design qui s'adresse à tous les utilisateurs, quelles que soient leurs caractéristiques.

Newell et Gregor (ibid.) ne cachent pas leur scepticisme ; le Universal Design, aussi valable et utile soit-il, reste une mission difficile. Adapter un produit à des utilisateurs avec un certain type de handicap risque de le rendre peu praticable par l'utilisateur ordinaire et totalement inutilisable par un utilisateur avec un autre handicap. Il existe bien évidemment des arguments contraires notamment dans le cadre de l'accessibilité web, où le respect des critères ne pénalise nullement l'internaute valide. Néanmoins, les difficultés suivantes se posent bel et bien et établissent des distinctions entre le UCD et Le DfA:

* L'hétérogénéité des profils et la nécessité de les définir précisément
* Le recrutement d'utilisateurs représentatifs
* De possibles conflits d'intérêt en matière d'accessibilité et d'utilisabilité entre personnes présentant différents types et niveaux de handicap. Par exemple, les sols texturés fournissent des indications aux aveugles mais ne facilitent pas le passage des fauteuils roulants.
* Des situations où le DfA ne semble pas approprié (par exemple la conduite automobile est, à l'heure actuelle, inenvisageable chez l'aveugle)
* La prise en compte des différents outils utilisés

- ***Le User Inclusive Design (UID)***

Newell et Gregor (2001) suggèrent de rebaptiser le Universal Design en un label plus réaliste « User Sensitive Inclusive Design ». Une démarche « inclusive » paraît davantage à la portée des développements techniques. Ainsi, le terme « centré » gagne à être remplacé par « sensible » eu égard à l'hétérogénéité des utilisateurs. L'User Sensitive Inclusive Design se doit d'être un état d'esprit plutôt que l'application mécanique de recommandations du DfA.

Bien que plus modeste, le Inclusive Design n'en est pas moins difficile à mettre en œuvre dans l'industrie. A travers huit projets industriels, Dong, Keates, Clarkson et Cassim (2003) ont analysé les écarts entre les modèles théoriques et la pratique. La participation des utilisateurs finaux en cours de conception et les évaluations itératives se heurtent à des contraintes financières et temporelles ; les entreprises s'interrogent sur la valeur et la faisabilité de la démarche. Les démarches employées dans le cadre du DBA (Design Business Administration) Design Challenge n'ont pas fait apparaître explicitement de phase évaluative. Les avis ont été recueillis de façon informelle et les produits ont été évalués par des proches ou des collègues. Des designers ont testé des produits disponibles sur le marché pour en sonder les problèmes potentiels.

Dong et al. (2003) attribuent le déficit de relations entre d'une part les utilisateurs et d'autre part les clients et les designers aux points suivants :

* L'évaluation ne fait pas partie des pratiques habituelles des designers
* La gestion du projet est tributaire des ressources financières allouées
* Les focus groups peuvent être contradictoires et leur fiabilité n'est pas garantie
* Les designers craignent de commettre des impairs à l'encontre des personnes handicapés lors de leurs échanges professionnels.

Les cabinets de consultants se sont répartis équitablement entre ceux dont la démarche embrasse tout le marché et ceux qui visent prioritairement les personnes handicapées. La première approche est qualifiée de bottom-up. La seconde, top-down, opère généralement dans le champ des aides spécifiques mais comporte le risque de négliger les personnes dont le niveau de handicap est modéré. L'idée de l'inclusive design pénètre progressivement les projets industriels.

Cette recherche confirme que l'implantation de l'UID dépend aussi des méthodes et outils mis à la disposition des designers. Ces outils et méthodes sont eux mêmes à concevoir. Zajicek (2004) a ainsi élaboré un outil pour aider les ingénieurs à réaliser une conception centrée utilisateur.

- ***Outil d'aide à la conception pour l'UCD***

Se référant aux travaux de Newell et Gregor (2001), Zajicek (2004) rappelle les limites de l'UCD. Son cadre d'analyse (voir Figure 4) est censé aider les concepteurs à articuler les

données empiriques et la conception. Elle regrette que des versions diluées des résultats expérimentaux alimentent les énoncés simplistes des directives de conception. Rien n'est précisé à propos des buts de l'expérimentation et de ses fondements théoriques. Les directives du W3C qui existent sous ces deux formes peu satisfaisantes sont révélatrices des difficultés concernant la bonne formulation des recommandations. Le travail du designer sera facilité si les recommandations sont organisées et accompagnées de leurs motifs ainsi que d'exemples illustratifs. La conception de systèmes vocaux pour personnes âgées a ainsi conduit à l'élaboration d'un ensemble de patterns mais la démarche est généralisable à d'autres situations. Le pattern décrit un élément de design en mentionnant sa finalité et son mode de réalisation. Par exemple, les questions de « la boucle de récupération des erreurs » ou encore celle du « message de confirmation » sont traitées dans le cadre suivant :

Pattern ID :
Pattern name :
Problem :
Context :
Forces :
Solutions :
Synopsis :
Evidence :
Example :
Rationale :
Confidence :
Literature :
Related patterns :
Author :
Creation date :
Revision number :
Last modified :

Figure 4 : Pattern de design, d'après Zajicek (2004)

Ce type de modèle aurait aussi vocation à concilier le design spécifique et le DfA. Les *« patterns design »* ont, jadis, fait leur preuve en architecture et industrie du logiciel (Alexander, 1979 ; cité par Zajicek, ibid.). Les communautés de pratique (selon l'expression de Lave & Wenger, 1991) doivent être encouragées à développer leurs propres patterns et à

les utiliser spécifiquement pour des problèmes particuliers. Ces patterns sont censés orienter les concepteurs, stimuler les discussions entre eux et, idéalement, entre eux et les utilisateurs.

Après avoir exposé des méthodes génériques de Design pour personnes avec un handicap, considérons plus précisément les règles de conception et les recommandation destinées aux interfaces pour aveugles/

- ***Règles de conception et recommandations pour des interfaces dédiées aux aveugles***

Le débat entre règles génériques de UCD pouvant s'appliquer aux interfaces et principes de conception ad hoc est évoqué par Christian (2000)[36]. Les huit règles d'or de Schneiderman (1998) viennent en complémentarité de recommandations plus spécifiques (Figure 5).

1. Faire un effort de cohérence interne.
2. Rendre possibles les raccourcis pour les utilisateurs réguliers.
3. Fournir des informations sur ce que fait le système.
4. Organiser le contenu et construire des dialogues qui marquent le contenu des étapes.
5. Fournir une rétroaction permettant d'éviter les erreurs et permettre une prise en charge simple.
6. Rendre les actions réversibles
7. Donner aux utilisateurs le sentiment qu'il contrôle le système
8. Réduire la charge cognitive de la mémoire à court terme

Figure 5 : Huit règles d'or selon Schneiderman (1998)

En dépit de préoccupations croissantes en matière de DfA et de l'élaboration d'aides au design, il existe peu de travaux directement consacrés aux principes de conception et aux modèles utiles à la définition d'interfaces pour aveugles, et encore moins pour les dispositifs haptiques et tactiles (Christian, ibid.). Comme nous le verrons dans la section suivante, les technologies pour aveugles semblent privilégier la modalité sonore : l'essentiel des projets sur les logiciels mathématiques portent sur la lecture vocale de formules alors que la modalité tactile offre un potentiel de développement des plus prometteurs : proximité plus grande avec les objets présentés par l'interface, indépendance linguistique.

Parmi ces recommandations spécifiques, il nous faut mentionner celles de Kurze[37] lesquelles s'adressent à l'interaction des aveugles avec l'interface graphique (Figure 6). Cette approche

[36] http//www.Otal.umd.edu/UUGuide/Kevin/.

[37] www.inf.fu-berlin.de/~kurze/publications/guidelin/guidelin.htm

bien que linéaire a le mérite de recenser les alternatives technologiques pour accéder aux graphiques (aussi bien audio que tactile).

1. Decide on the *purpose* of the graphics/interaction.
2. Choose the *communication channel(s)* you want to use (tactile, acoustical, other).
3. Choose the *information structure* for the output
    - text
        - Braille and/or
        - speech
    - non-speech sound
        - musical or
        - "ecological" (real world) sounds
    - tactile graphics
        - interactive (e.g. with a touchpad)
        - perceptive only
    - any combination of the above
4. Get the *model* (underlying abstract structure) of the visual graphic
5. Select or construct an appropriate *computer system*
    - hardware (only interaction components listed)
        - speech synthesiser
        - sound generator (synthesiser, MIDI, PCM-sample player, ...)
        - 3-D sound system
        - Braille output device (Braillex, GUIDE, ...)
        - tactile printer (for dots ...)
        - swellpaper system (printer and heater)
        - touchpad (or Nomad-like extension)
        - other devices ...
    - software
        - general purpose screen reader
        - regular application systems for sighted people (enhanced by a screen reader)
        - special application system (not necessarily combined with a screen reader)

Figure 6: Etapes de conception pour une interaction non visuelle selon Kurze

Des commentaires de Kurze nuancent et complètent ces étapes :

* Le choix de l'alternative ne se pose pas toujours.

* Le but d'un graphique dans un contexte précis ne peut être identifié de façon automatique, il faut alors recourir à la médiation humaine.

* En toutes circonstances, un modèle de l'information visuelle est nécessaire. Ce modèle doit dépendre à la fois du type de graphique et de son rôle.

* Si l'information graphique ne s'accompagne pas d'informations comme dans le cas d'une photographie scannée alors un modèle de la scène est à construire.

Christian (2000)[36], à son tour, propose cinq recommandations :

1. Utiliser la modalité tactile dans le guidage de l'interaction : Le retour de force peut servir à marquer la séparation entre items dans un menu ou à simuler un champ de gravité à proximité des boutons radios. Les dispositifs haptiques doivent répondre à l'utilisateur de deux façons : l'intensité du retour d'effort doit varier d'un utilisateur à l'autre et la direction de la force exercée doit dépendre de la direction dans laquelle l'utilisateur manipule l'effecteur.

2. Considérer des modèles prédictifs alternatifs : La loi de Fitts (1954) qui est un modèle standard en terme de pointage de cible, ne permet pas de prédire des temps de réussite avec les dispositifs tactiles et audio. Cette loi nous apprend que le temps nécessaire à un utilisateur pour déplacer sa souris vers une cible à partir d'un point de départ augmente avec la distance qui le sépare de la cible. De même, plus la cible est petite, plus le mouvement est long et difficile à exécuter. Cette loi n'est pas appropriée car les aveugles ne connaissent pas la position de la cible. En outre, celle-ci ne fait pas cas des objets qui se situent entre le point de départ et la cible (Friedlander, Schlueter, Mantei, 1998).

3. Tenir compte de la diversité chez les utilisateurs aveugles.

4. Rendre accessible l'interface et pas seulement le contenu de l'écran.

5. Favoriser les échanges avec la communauté des voyants. L'autonomie n'est pas la seule finalité ; les interfaces sont une opportunité d'intégration des aveugles dans un espace de travail commun. Cette nécessité se fait également ressentir en matière de logiciels éducatifs pour aveugles.

Les études empiriques réalisées jusque là sur les technologies pour aveugles ont donné lieu à peu de recommandations. Les projets les plus aboutis et les plus fédérateurs (regroupant plusieurs laboratoires) concernant les logiciels de mathématiques consistent pour la plupart à proposer des outils de conversion et des lecteurs de formules mathématiques, l'accès direct au graphique n'est pas envisagé.

- ***Quelques réalisations du Universal Design en faveur de l'accès aux contenus mathématiques***

Traducteurs automatiques

Dans les années 1990, des projets de traducteurs automatiques de documents numériques vers le braille ont vu le jour. LaBradoor (conversion de LaTex vers le Marburg) (Miesenberger, Batusic & Stoëger, 1998)[38] et Mavis (LaTex vers le Nemeth) (Karshmer, 2002[39]) présentent

[38]http://www.jussieu.fr/inova/publi/ntevh/labradoo.htm

[39] http://www.snv.jussieu.fr/inova/villette2002/res5.htm

aussi l'avantage d'aider les professeurs de mathématiques à préparer leurs supports pédagogiques et les dispensent de l'apprentissage du braille. Plus récemment, le Multi-Langage Mathematical Braille Translator, développé au sein du projet Vickie (Visually Impaired Children Kit for Inclusive Kit ; Archambault & Burger, 2002) est un outil de conversion automatique du braille dont le but est de traduire, dans les deux sens, des formules de différentes notations braille (deux codes braille français, les codes anglais et irlandais) en Latex et MathML (Moço & Archambault, 2004). De même, le iGroup UMA (international Group for Universal Math Access) a orienté ses recherches vers le développement d'une technologie d'inter-conversion entre les différents formats numériques (Pontelli & Palmer, 2004). Enfin, *AudioMath* a pour finalité de convertir les expressions qui ne sont pas reconnues par les lecteurs d'écran en langage MathML.

Lecteurs d'expressions mathématiques

Le développement de lecteurs et de navigateurs d'expressions anime les projets comme AsTer (Raman, 1994), Math Genie (Karshmer, 2002[39], 2004). AsTer utilise des sons dans la lecture d'informations techniques dont les équations mathématiques. Math Genie qui fait partie du consortium UMA s'adapte aujourd'hui dans un environnement multilingue pour un partage des connaissances entre utilisateurs de différentes nationalités. Le Math Genie offre une technique structurée de navigation (avec loupe logicielle) qui repose sur les résultats d'expérience indiquant la manière optimale de présenter l'ensemble de la formule et ses sous-sections (Gillan, 2004) ainsi que plusieurs médias de production : la parole (des commandes vocales), la synthèse vocale, la plage braille rafraîchissable, la vidéo pour les personnes de basse vision.

Ces projets s'attellent essentiellement à la restitution d'informations textuelles. Si des fonctionnalités d'assistance à la lecture de formules y sont intégrées, en revanche, ils n'exploitent pas le potentiel didactique des interfaces graphiques. Afin d'offrir aux élèves un environnement numérique complet d'apprentissage des mathématiques, il faudrait concevoir des dispositifs qui permettent également la lecture des figures géométriques, de courbes dans des repères ou encore des tableaux à double entrées.

La partie suivante sera consacrée aux prototypes haptiques de lecture et de production de figures géométriques. Les projets présentés, pour la plupart encore à l'étude, demeurent des réalisations locales. En outre, ils n'offrent pas encore de solutions qui soient intégrées dans

l'environnement informatique de l'élève. Etant donné la nouveauté du champ de recherche, il existe peu de travaux qui proposent des principes de conception ou de modélisation des interfaces haptiques (Christian, 2000)[36] et encore moins dans le domaine éducatif. Examinons à présent les possibilités d'accès aux images introduites par ces prototypes.

2.2 Des prototypes de recherche

Classiquement, ces dispositifs d'accès non visuel aux images utilisent la modalité haptique et/ou sonore. Ils peuvent être également le support d'une activité graphique. Deux principaux types de technologies haptiques sont distingués dans la littérature (Burdea, 1999).

1. Les systèmes avec stimulations tactiles qui affectent la surface cutanée par étirement ou pression
2. Le retour de force qui mobilise la proprioception et affecte la position et le mouvement des doigts.

Nous appellerons haptique les dispositifs qui mobilisent un toucher actif et qui impliquent ou non un retour d'effort. Implicitement nous désignons donc par haptique toute expérience perceptive engageant une stimulation tactile et une stimulation proprioceptive (en particulier dynamique) associée aux déplacements du corps instrumenté. Les dispositifs haptiques que nous présentons à la suite ont été retenus relativement à leur proximité technologique et d'usage (introduction du geste graphique, lecture de formes mathématiques) avec notre propre projet. Ceci laisse donc entendre que nous ne prétendons pas à l'exhaustivité sur ce point.

2.2.1 Technologie Tactile : l'Interactive Tactile Display System

Ce système (Kawai & Tomita, 1996) capture et traite des images des objets de l'environnement pour les restituer ensuite sur une grille tactile. La surface de la plage tactile est de 175x175 mm. Elle comporte 16x16 picots, dont le diamètre est de 5mm. L'espace entre les picots est de 10mm. La hauteur des picots varie de 0 à 6m simulant ainsi des effets de volumes. L'appareil supportant la grille tactile pèse 28 kg.

La présence de deux caméras en stéréo autorise différentes prises de vue. L'ITDS comporte un système de reconnaissance d'objets : l'image de chaque objet est comparée avec des modèles présents dans une base de données. Une synthèse vocale dispense les informations relative aux objets et à leurs propriétés (nombre, taille, couleur). Ces commentaires sont obtenus par activation d'une touche spécifique. L'utilisateur a alors le choix entre trois modes de présentation (voir Figure 7) :

1. Le mode position : offre une carte du positionnement relatif des objets. Chaque objet est alors représenté par un picot. En appuyant sur le picot qui représente l'objet, l'utilisateur en déclenche la description vocale.

2. Le mode contour : les picots levés composent les arêtes des objets

3. Le mode surface « *Surface Shape mode* » : les différentes hauteurs de picots reproduisent la convexité ou la concavité de l'objet.

Le passage d'un mode à l'autre est activé par des commandes clavier.

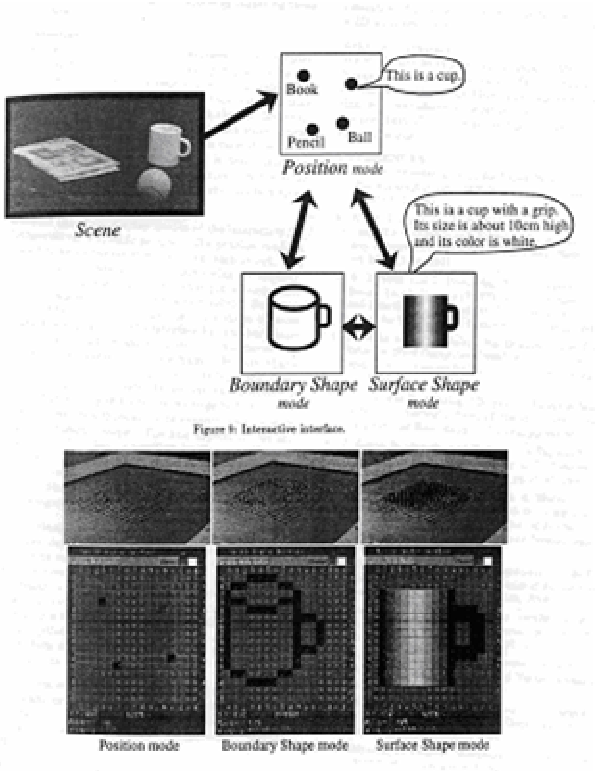


Figure 7 : Les trois modes de présentation des objets d'après Kawai et Tomita (1996)

Lors d'un premier test, cinq sujets ont participé à l'évaluation du système. Deux d'entres eux, un aveugle tardif et un malvoyant, ont l'habitude de lire des cartes tactiles. Les trois autres sont malvoyants ; ils se servent de leurs restes visuels dans la vie quotidienne et n'utilisent pas de cartes tactiles.

L'organisation de la grille tactile n'a pas posé de problème particulier aux sujets. La résolution leur a semblé suffisante pour la perception d'objets simples. Les sujets auraient souhaité que la réponse des picots soit plus rapide.

Au cours d'un second test, les auteurs se sont intéressés à la compréhension par les sujets des différents modes de restitution et angles de vue. Une tasse et une balle ont ainsi été présentées en *mode contour* et en *mode surface* de l'objet. Dans le *mode contour,* trois vues de la tasse ont été proposées : de face avec anse à droite, de haut et en perspective.

Le *mode volume* a semblé aux sujets particulièrement approprié pour présenter la tasse.

En ce qui concerne le *mode contour,* la préférence des sujets s'est orientée vers la vue de face et dans une moindre mesure vers la vue en perspective qui, associée au mode volume, se révèle pertinente pour la reconnaissance.

Une troisième expérience a évalué le *mode position* selon deux choix de présentation : un picot représente un objet ou le nombre de picot varie en fonction des dimensions de l'objet. Les sujets ont privilégié la première option.

Les auteurs (ibid.) annoncent leurs différents axes de recherche : la répartition entre information tactile et audio, l'amélioration de la vitesse de réaction du système, l'élargissement du module braille, l'ajustement des méthodes d'exposition en fonction des préférences d'utilisation.

Ce système qui permet en quelque sorte de prothétiser le point de vue et la vision d'ensemble présente néanmoins un certain nombre de limitations :

* Le dispositif est particulièrement encombrant. La grille pèse 28 kilogrammes son usage nécessite l'emploi de deux caméras
* Le prix n'est pas mentionné mais la présence des caméras le rend difficilement diffusable à moindre coût.
* La résolution de la grille reste faible : les picots sont épais et l'espace entre les picots mesure 1cm. Par conséquent, elle semble peu appropriée pour la restitution de dessins exigeant un tracé précis (comme des figures géométriques comportant plusieurs éléments)
* Le dispositif ne semble pas conçu pour donner accès à des formes numériques ou s'intégrer à une interface graphique

En ce qui concerne le processus de conception, l'article fait part d'expériences ponctuelles réalisées avec peu d'utilisateurs dont un seul aveugle. Le programme de recherche indique que le développement de l'interface est réalisé de façon itérative. La question de la pertinence et de l'exploitation de ces différents modes de présentation par l'aveugle n'est pas étayée par des données issues de la psychologie cognitive. Or, la lecture de dessins d'objets, de cartes ou encore la compréhension des différents points de vue chez l'aveugle sont des thèmes largement défrichés par les études psychologiques (voir partie 2.3.2 et 2.3.3.).

2.2.2 Technologie à retour de force : le PHANToM

Commercialisé par la société Sensable[40], le PHANToM est un dispositif haptique à retour d'effort, permettant l'exploration d'objets 3D virtuels. Le recours au PHANToM dans un usage pédagogique a été étudié par les projets Saint Eucaire (Malik, 2001) et SALOME (Rouzier, Hennion, Pérez, Segovia & Chêne, 2004). L'étude des procédures exploratoires exécutées à l'aide de cette technologie a été développée par Jansson[41]

- ***Le PHANToM et la lecture de formes géométriques : projet Saint Eucaire***

Une étude exploratoire (Malik, 2001) a été menée dans le cadre du projet pluridisciplinaire Saint Eucaire qui impliquait l'école primaire éponyme et le LITA (Laboratoire d'Informatique Théorique et Appliquée.) de l'Université de Metz. L'objectif du projet visait l'évaluation de l'usage du PHANToM dans des tâches de lecture et de production de formes géométrique par trois enfants de 7, 11 et 12 ans. Paul le plus jeune est aveugle de naissance, Anne qui a 11 ans est quasiment aveugle et Pierre le plus âgé peut se servir de ses restes visuels[42].

La version utilisée dans le projet Saint Eucaire est le PHANToM Desktop. Ce dernier fournit six degrés de liberté pour le positionnement (en translation, rotation sur x, rotation sur y, rotation sur z) et trois degrés de liberté pour le retour de force en translation. Il faut préciser que la surface de contact avec l'objet équivaut à un point.

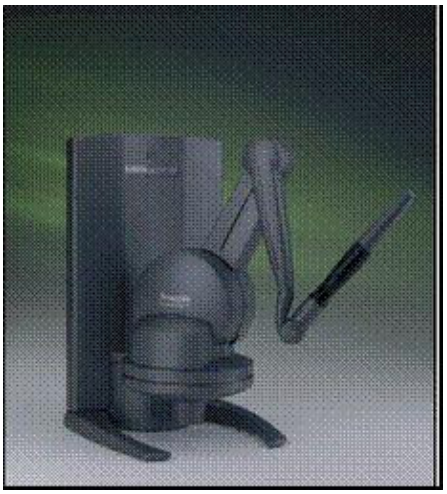


Figure 8 : Le PHANToM desktop

[40] http://www.sensable.com/

[41] http://www.ida.liu.se/~ssomc/papers/Jansson.pdf

[42] Dans le texte de Malik (ibid.) ne figurent pas d'informations plus précises quant au statut visuel des sujets

Lors de la découverte du dispositif, les deux sujets les plus âgés ont eu du mal à manier le stylet. Le dispositif a eu un attrait certain sur le plus jeune mais non conforme avec l'objectif du protocole expérimental : *« L'expérimentation sur Paul s'est révélée désastreuse ! Il s'est avéré impossible de lui apprendre à tenir correctement le stylet. Cela peut s'expliquer partiellement par le fait qu'il n'a jamais eu à tenir de stylo de sa vie et qu'il est hyperactif. D'autre part, étant très intrigué par le PHANToM lui même, il ne cessait de l'explorer avec sa main droite, nous précisant que c'est cette main qu'il souhaitait utiliser pour tout ce qui avait trait à l'exploration et à la reconnaissance. […] Nous n'avons pas, réellement, réussi à lui faire comprendre que « les objets à appréhender ne pouvaient être perçus que par l'intermédiaire du stylet et que ce dernier ne représentait pas vraiment un objet du test ». […] La distinction réel/virtuel n'a pas été bien appréhendée, la rotation du stylet autour de son axe longitudinal et son hyperactivité ont perturbé l'interprétation du retour haptique.[…] Paul ressent un besoin impérieux de sentir, de palper voire de goûter le matériel qu'il manipule. Sa manipulation du stylet reste hasardeuse et parfois même dangereuse. Ajoutons à cela qu'il ne comprend pas ce que nous lui demandons, il qualifie le stylet de baguette magique ou de baguette volante »* (ibid., p. 26) Les expérimentateurs se sont donc abstenus de le soumettre aux tests de géométrie se contentant de lui faire percevoir des textures.

Dans la phase de lecture de formes bidimensionnelles, Anne et Pierre explorent dans le plan xOy des lignes horizontales et verticales, puis des lignes obliques présentant respectivement des angles de 45, 30, 80 et 150 degrés avec l'horizontale. Toutes ont été correctement jugées sauf la droite à 80° confondues avec la verticale.

Le PHANToM offre plusieurs possibilités d'exploration des formes tridimensionnelles: les formes peuvent être explorées de l'intérieur ou de l'extérieur ou encore exercer une attraction pour guider le stylet. Quatre formes tridimensionnelles[43] ont été présentées aux sujets:

1. un cube à explorer de l'intérieur,
2. une sphère à explorer de l'intérieur et à l'aide d'un magnétisme simulé,
3. un cône à explorer de l'extérieur,
4. un cylindre à explorer de l'extérieur.

[43] La taille des objets n'est pas mentionnée

Le cube n'a pas spontanément été perçu comme un volume. Les deux sujets ont reconnu plusieurs carrés car les explorations ont été exécutées uniquement dans des plans verticaux. De même, les sujets ont perçu des cercles à la place de la sphère. L'effet d'attraction a été mal compris. Le cône et le cylindre ont été explorés par un seul sujet : Anne. L'exploration du cône a été partielle. Anne n'a pas gardé de contact prolongé avec la forme. Pour l'aider à formuler sa réponse, des volumes en bois lui ont été présentés. Après avoir hésité entre le cône tronqué et une demi sphère, elle a finalement choisi la dernière. Le cylindre a été perçu rapidement. Etant donné que toutes les zones discriminantes n'ont pas été explorées, la réponse a en partie était trouvée par déduction.

Enfin, Paul a testé un effet de texture visqueux qu'il n'a pas perçu comme une substance extérieure. Selon ses propres termes, *«le stylet est devenu plus lourd »* (ibid., p : 29).

Le PHANToM ne semble pas être l'outil le plus adapté : les sujets ont rencontré des difficultés dans le maniement du stylet. En outre, le passage d'une exploration bi-manuelle impliquant la paume des mains, la pulpe des doigts et l'articulation des phalanges, à une exploration mono point en 3D s'est avéré déroutant pour les sujets. Malik fait remarquer que la main possède plus de vingt degrés de liberté et que, par conséquent, l'unicité du contact impose de sérieuses limitations. En outre, la mobilisation des deux mains facilite la prise de repère, dans la mesure où l'une des deux mains occupe une position de référence.

Il ressort de ces premières expériences que l'apprentissage de la géométrie dans l'espace via le PHANToM reste un objectif ambitieux pour des sujets qui maîtrisent difficilement son maniement.

La deuxième série d'expériences réalisées avec le PHANToM a porté sur un objectif plus précis, à savoir l'introduction d'une aide au tracé géométrique. Deux méthodes d'aide au tracé ont été choisies :

1. <u>La première sans graduation</u> : A partir d'un point de départ 0, un guide horizontal est créé qui définit une zone de déplacement. L'opérateur clique (clic court) sur un bouton afin de connaître la distance parcourue depuis le point 0. Il clique à nouveau (clique long) pour valider la distance. Cette méthode présente néanmoins quelques limites : un autre média est nécessaire pour restituer la position car elle n'offre pas suffisamment de repères. Enfin, la maîtrise des deux clics n'est pas évidente.
2. <u>La deuxième avec graduation</u> : Cette méthode s'inspire de la règle graduée. Des marques en creux et en bosse ont été placées respectivement tous les 5 et 10

centimètres. Ces repères facilitent l'atteinte de la zone critique. Le point exact est trouvé par essais successifs comme dans la méthode précédente.

Deux expériences de tracés de segments ont été réalisées avec un groupe composé de Anne et Pierre, d'un instituteur (voyant aveuglé) et de quatre étudiants de troisième cycle universitaire (voyants aveuglés).

Dans la première expérience, les sujets tracent des lignes de 7, 12 et 19 cm sans retour tactile puis au moyen du système haptique sans graduation. Les sujets doivent comparer deux à deux les tracés obtenus avec les deux techniques. Dans la seconde expérience, les deux modalités haptiques, avec et sans graduation, sont testées. Les sujets tracent alors 9 segments qui mesurent respectivement 2,5 cm, 14 cm, 5,5 cm, 8 cm, 17,2 cm, 9,7cm, 8 cm, 14 cm et 11,3 cm.

Dans les résultats de la première expérience, il apparaît que les distances sont sous-estimées et cette erreur augmente proportionnellement avec la distance à tracer. Le recours au système haptique modifie peu les performances. Dans la seconde expérience, l'introduction des graduations a amélioré de façon notable les performances : diminution du temps et du nombre de clics nécessaires au positionnement du point. Les sujets, excepté l'un des deux enfants, n'ont pas été en mesure de discriminer les creux des bosses et ont attribué une prédominance à la présence de la graduation plutôt qu'à son sens. Le caractère encourageant de ces résultats se confirme par les commentaires de Anne et Pierre. Néanmoins, ces commentaires portent sur deux aspects différents, celui d'Anne concerne la perception de la figure et celui de Pierre sa construction. Ainsi, Anne dit s'être plus concentrée lors de la méthode haptique sans graduation, effort mental qui selon l'auteur pourrait être bénéfique à l'élaboration d'une représentation discriminante. Pierre a estimé que le PHANToM avec graduations facilite le traçage.

En conclusion l'auteur revient sur les mérites et inconvénients du dispositif à retour d'effort. Outre la difficulté à manier le stylet, le contact mono-point constitue la limite majeure. Ce mode ne correspond pas à « celui utilisé chez les déficients visuels : contact multi-points et *possibilité de faire varier le champ perceptif haptique ».*

Selon Malik le PHANToM apporte de nouvelles perspectives pédagogiques dans la mesure où les performances dans le tracé sont équivalentes à celles obtenues avec les outils traditionnels. En outre, il favoriserait l'utilisation d'images mentales. Enfin, il offre des modalités d'actions

qui facilitent l'accès à de nouvelles données. Les pistes considérées s'orientent vers l'apprentissage :

* Intervention d'un psychomotricien pour améliorer la prise en main du stylet
* Phase d'apprentissage approfondie et possibilité d'offrir un marquage dynamique
* Développement d'applications ludiques

Les résultats de cette étude nous indiquent que l'interface employée nécessite de nouveaux aménagements pour devenir opérationnelle dans le cadre de cours de mathématiques. Lors de l'exploration des formes tridimensionnelles, les percepts n'ont pas donné lieu à la reconnaissance de volumes. La phénoménologie de la perception d'objets virtuels via le PHANToM reste éloignée de celles des objets réels. L'interprétation des différents retours (perception de plusieurs cercles, lors de l'exploration de la sphère) semble ardue pour des enfants de 11 et 12 ans non familiers des projections de volumes dans les différents plans. Comme le fait remarquer l'auteur, la prise en main et la maniabilité du stylet sont à améliorer. L'intervention d'un psychomotricien est envisagée.

La démarche de conception procède par études empiriques où sont testée différentes aides. La description des explorations demeure succincte. Malik (2001) fournit une description des premières utilisations et recense ainsi les problèmes posés par la découverte du dispositif. Il établit alors une comparaison entre les explorations effectuées à l'aide du PHANToM et les explorations haptiques pratiquées par sujets aveugles sur des objets courants afin d'expliquer les difficultés rencontrées. L'apprentissage est alors envisagée comme solution, notamment pour améliorer la prise en main.

- ***Le PHANToM et la lecture de forme géométrique : Le projet SALOME***

La société France Télécom a entrepris la conception d'un système (SALOME) destiné à la lecture de formes géométriques chez l'aveugle (Rouzier, Hennion, Pérez, Segovia & Chêne, 2004). Salomé utilise le PHANToM et la modalité sonore. Les figures géométriques sont codées sous la forme de rails « magnétiques » qui attirent le stylet vers les différents éléments de la scène. A chaque élément est associée une description sous la forme d'un message vocal. Ce système propose plusieurs fonctions comme :

1. La lecture de la figure grâce au retour de force.
2. La synthèse vocale nomme les éléments explorés en continu ou à la demande du sujet.

3. Le système intègre une règle et un rapporteur qui, respectivement, comportent des graduations tous les centimètres et tous les 30 degrés. Ces outils viennent se placer automatiquement à proximité de la figure.

4. La construction de la figure : l'utilisateur peut créer un point, tracer une ligne entre deux points, et effectuer des tâches de mesure de longueurs et d'angles à l'aide de la règle et du rapporteur.

Le projet est entrepris en collaboration avec un établissement spécialisé EREADV (Etablissement Régional d'Enseignement Adapté pour Déficients de la Vue) de Villeurbanne dont les enseignants ont exprimé les attentes suivantes :

1. Afin de réduire le temps consacré à chaque élève, le logiciel doit favoriser le travail autonome et rendre le contenu des exercices accessible quel que soit le degré de handicap visuel.

2. Offrir les mêmes fonctions didactiques que les logiciels éducatifs pour voyants à savoir : la vérification d'une conjecture et la découverte des invariants par l'expérience perceptive.

Pouvoir réaliser de *« jolis dessins »* fut la principale demande des élèves.

Deux expériences de lecture de formes géométriques ont été conduites auprès de six adolescents et deux adultes[44]. La première propose la reconnaissance d'un ensemble de figures géométriques simples comprenant des quadrilatères, des cercles et des triangles. Dans la deuxième expérience sont présentés sept figures géométriques composées de plusieurs éléments (par exemple un triangle avec cercle inscrit). Le sujet doit ensuite construire la médiatrice d'un segment de huit centimètres.

Le dispositif fut adopté plus rapidement par les adolescents que par les adultes[45]. Les sujets sont en mesure de discriminer les longueurs des segments si celles-ci diffèrent de 20% et la mesure des angles à 15 degrés près. La direction des mouvements (tangentiels ou radiaux), l'orientation de la figure et sa taille ont affecté le temps et le taux de reconnaissance. En revanche, aucun des modes d'exploration (intérieur ou extérieur) ne se distingue ici.

L'utilisation de points creux favorise la perception des angles mais provoque des confusions entre angle et intersection. Le nombre de segments présents à une intersection s'avère difficile à discriminer. Ce problème délicat est toujours à résoudre. Tous les sujets ont réussi la tâche

[44] Aucune information supplémentaire n'est précisée quant à l'âge ou au statut visuel des sujets

[45] L'article ne présente aucune donnée relative à cette différence entre adolescents et adultes.

de construction. Les outils de construction haptique ont été particulièrement bien accueillis au moment de l'expérience.

Afin de permettre à l'élève aveugle d'utiliser de façon autonome le dispositif, Rouzier et ses collègues poursuivent les développements logiciels suivants : création de commandes supplémentaires pour exécuter des tracés géométriques (tracer le milieu d'un segment, construire une droite parallèle, tracer un cercle) ; et possibilité de manipulation directe de la figure. A terme, l'utilisateur devra être en mesure d'interagir avec les différents outils :

* Le stylet autorise la perception d'objets mais aussi leur sélection et leur déplacement pour une manipulation directe à visée didactique

* Le lecteur d'écran qui lit aussi bien le contenu textuel des différentes applications et le restitue sur une plage braille éphémère.

* La synthèse vocale qui indique à l'élève sa position dans la figure géométrique. La synchronisation entre le déplacement du point d'action et l'émission du son a été améliorée. Lors des expériences précédentes, les décalages ont généré des confusions et des incohérences entre les deux types de retour. Les utilisateurs avec un handicap visuel avaient quelques réticences à utiliser la barre d'espace pour activer la lecture des données textuelles nommant les différents éléments de la figure. Aujourd'hui chaque élément possède une aire sonore associée.

Les auteurs prévoient comme prochain test une situation de cours individuel où il sera demandé à l'élève d'effectuer un exercice.

En ce qui concerne le développement de l'interface, les axes suivants sont privilégiés :

* Suppression des sorties involontaires de la figure et définition d'un message d'alerte (haptique ou sonore).

* Discrimination droite/courbes et intersection/sommet, lecture des valeurs angulaires. Le recours à des sons différents peut faciliter ces distinctions mais risque d'induire quelques nuisances dans une salle de cours.

* Utilisation de la règle pour mesurer tout type de distance.

* Perception du parallélisme. L'unicité du point d'action ne permet pas de déterminer si deux lignes sont parallèles. Les auteurs s'interrogent sur la métaphore qui pourrait rendre tangible cette notion.

* Suppression des oscillations du stylet grâce à un algorithme. La stabilité de ce dernier est actuellement altérée lorsque le bras est en extension ou que la prise n'est pas suffisamment ferme.

Si l'interface élaborée dans le projet Salomé offre une interaction plus riche que celle de l'étude précédente, il n'en demeure pas moins que le PHANToM reste un dispositif volumineux et d'un coût très élevé (environ 15 000 euros). L'utilisation de sons différents pour pallier l'imprécision des percepts peut conduire à des phénomènes de surcharge auditive et augmenter l'astreinte mnésique auxquels sont soumis les jeunes aveugles qui doivent manipuler plusieurs logiciels. Du fait de la présence de rails magnétiques, on peut considérer que le système induit un schème d'exploration qui consiste à suivre une à une les différentes lignes qui composent la figure. Ceci n'empêche nullement les ruptures de contact et les erreurs de discrimination entre angle et courbe.

L'ingénierie de conception peut être qualifiée de classique en IHM dans la mesure où le processus est itératif. Les évaluations successives conduisent à l'élaboration de nouvelles fonctionnalités qui ont pour finalité :

* D'apporter des solutions aux problèmes identifiés
* D'enrichir les modalités d'interaction pour son usage dans un contexte technique et pédagogique particulier.

L'activité des sujets, est appréhendée succinctement à travers les erreurs et les mouvements d'exploration de la main et du bras.

- ***Le PHANToM et l'identification de stratégies***

Jansson[46] insiste sur l'importance de disposer de méthodes d'exploration pour favoriser l'efficacité des dispositifs haptiques. Selon lui, la théorie écologique fournit des arguments en faveur du développement de patterns d'exploration similaires à ceux des explorations directes. La restriction à un point de contact lui semble être la contrainte majeure. Les informations cutanées et proprioceptives sont diminuées dans une large mesure lors de l'exploration virtuelle. Il compare alors l'identification de quatre types d'objets tridimensionnels (sphère, cube, cylindre et cône) réels et virtuels dont la taille varie de 5 à 9mm. L'exploration réelle s'effectue avec seulement une main. Les explorations via le PHANToM sont réalisées selon deux conditions : maniement mono-digital ou pluri-digital du stylet[47].

[46] http://www.ida.liu.se/~ssomc/papers/Jansson.pdf

[47] Aucune précision n'est apportée quant à l'âge et au statut visuel des sujets

Le temps d'exploration est beaucoup plus court avec les objets réels : deux secondes contre des temps d'exploration compris entre 27 et 38 secondes dans la situation virtuelle. Lorsque les explorations sont réelles, les sujets sont en mesure d'identifier tous les objets. Dans la situation virtuelle, le pourcentage de réponses correctes varie entre 68 et 80%. Dans cette situation, l'effet de la taille des objets est significatif sur le temps et la proportion de réponses correctes. Les performances augmentent et le temps d'exploration diminue avec les objets de petite taille. Les deux méthodes d'exploration virtuelle donnent des résultats proches malgré une prise en main différente. Jansson attribue ainsi les moindres performances dans la situation prothétisée à l'unicité du point de contact avec les objets virtuels (quand bien même la prise en main du stylet est multi-digitale).

En revanche, le contact mono-point n'affecte pas la perception des textures (Jansson, Billberger, Petrie, Colwell, Kornbrot, Fänger, Köning & Hardwick, 1999). Les performances virtuelles sont alors similaires aux explorations réelles. L'identification de la forme d'un objet tridimensionnel semble une tâche plus astreignante que la perception de textures. De meilleurs résultats et des temps d'exploration plus courts pourraient être obtenus avec une surface digitale supérieure et des explorations multi-digitales. Jansson envisage aussi la piste de l'apprentissage. Les stratégies d'exploration virtuelles ressemblent peu aux stratégies « naturelles » ou « spontanées », les sujets sont donc peu enclins à les utiliser. Les résultats pourraient alors être améliorées par des entraînements spécifiques.

Par ailleurs, le travail de Jansson et Monaci (2004) montre que lorsque les sujets mobilisent au moins deux doigts dans l'exploration haptique d'objets courants (vêtements, outils, matériel de bureau) alors les performances augmentent de façon notable : le taux d'erreur passe de 0,25% dans la condition « un index » à 0,9% dans la condition « index et pouce de la même main » tandis que le temps d'exploration diminue de 28 à 18 secondes. Lors d'une deuxième expérience, différentes conditions bi-digitales sont comparées : la condition « index et pouce de la même main » offre des résultats légèrement supérieurs (taux d'erreur de 0,11% et temps moyen d'exploration de 19 secondes) à ceux de la condition « un index de chaque main » (taux d'erreur de 0,13% et temps moyen de 23 secondes). Le passage à des explorations bi-digitales dans les explorations haptiques prothétisées constituerait d'après les auteurs une amélioration majeure.

La recherche d'amélioration du PHANToM conduit à l'élaboration d'hypothèses psychologiques. Les études qui en découlent se situent à la charnière entre la psychologie

cognitive et l'interaction homme machine. Elles n'ont pas pour objet le processus de conception ergonomique en tant que tel mais elles permettent de l'établir sur des données scientifiques ad hoc et mobilisables dans des situations d'interaction similaires. En outre, elles contribuent à élargir le champ d'investigation de la psychologie cognitive. Néanmoins, la caractérisation des stratégies s'effectue uniquement sur la base de deux critères : le nombre de doigts et la durée d'exploration[46] (Jansson & Monaci, 2004). Rien n'est mentionné à propos des mouvements exploratoires et de leur enchaînement dans le temps et l'espace.

Le dispositif présenté dans la partie suivante permet également de réaliser une comparaison entre différentes stratégies d'exploration.

2.2.3 Technologie à retour de force et tactile : le Pantobraille

D'après Ramstein (1996), la combinaison du retour de force et du tactile permet de concevoir un système capable de reproduire sur la pulpe du doigt une sensation similaire à celle engendrée par la lecture d'un texte en braille ou encore par la texture d'un objet bi ou tridimensionnel. Il couple les deux technologies dans un dispositif appelé le Pantobraille qui intègre deux cellules braille au Pantograph, appareil à retour de force.

Le Pantograph (voir Figure 9) possède deux fonctions complémentaires : d'une part, il sert à pointer, déplacer, sélectionner et redimensionner les objets tels que les icônes, les fenêtres ; et d'autre part, il rend perceptible au toucher les objets qui peuplent l'interface. Le Pantograh a pour espace de travail une surface plane de 10x16 centimètres. Les déplacements du sujet s'effectuent dans le plan. Cette combinaison répond à plusieurs contraintes ergonomiques :

* Produire une stimulation haptique pour restituer la forme d'objets bi et tridimensionnels.
* Produire une stimulation tactile pour simuler des effets de texture
* Rendre le mouvement du doigt sur l'espace de travail aussi naturel que le mouvement du doigt sur une surface.
* Atteindre des vitesses de lecture équivalentes à celles observées avec des technologies comparables.

Néanmoins, le suivi d'une ligne complète s'avère difficile car il impose un contrôle important de la trajectoire de l'effecteur et seul le mouvement des picots informe du changement de ligne ou de caractère. Alors que dans une page d'écriture braille, le lecteur est libre d'utiliser plusieurs doigts et ses deux mains, l'utilisateur du Pantobraille ne peut identifier des positions

qu'avec un seul doigt. Il est nécessaire d'ajouter des indices haptiques, sous la forme de gouttières, pour éviter tout glissement de l'effecteur. Le curseur est cantonné à la ligne en cours. Le passage à la ligne suivante exige une pression supérieure. Il est également plus avantageux de programmer des transitions discrètes afin de délimiter chaque caractère. Ce dispositif soulève plusieurs questions ergonomiques ainsi formulées par l'auteur :

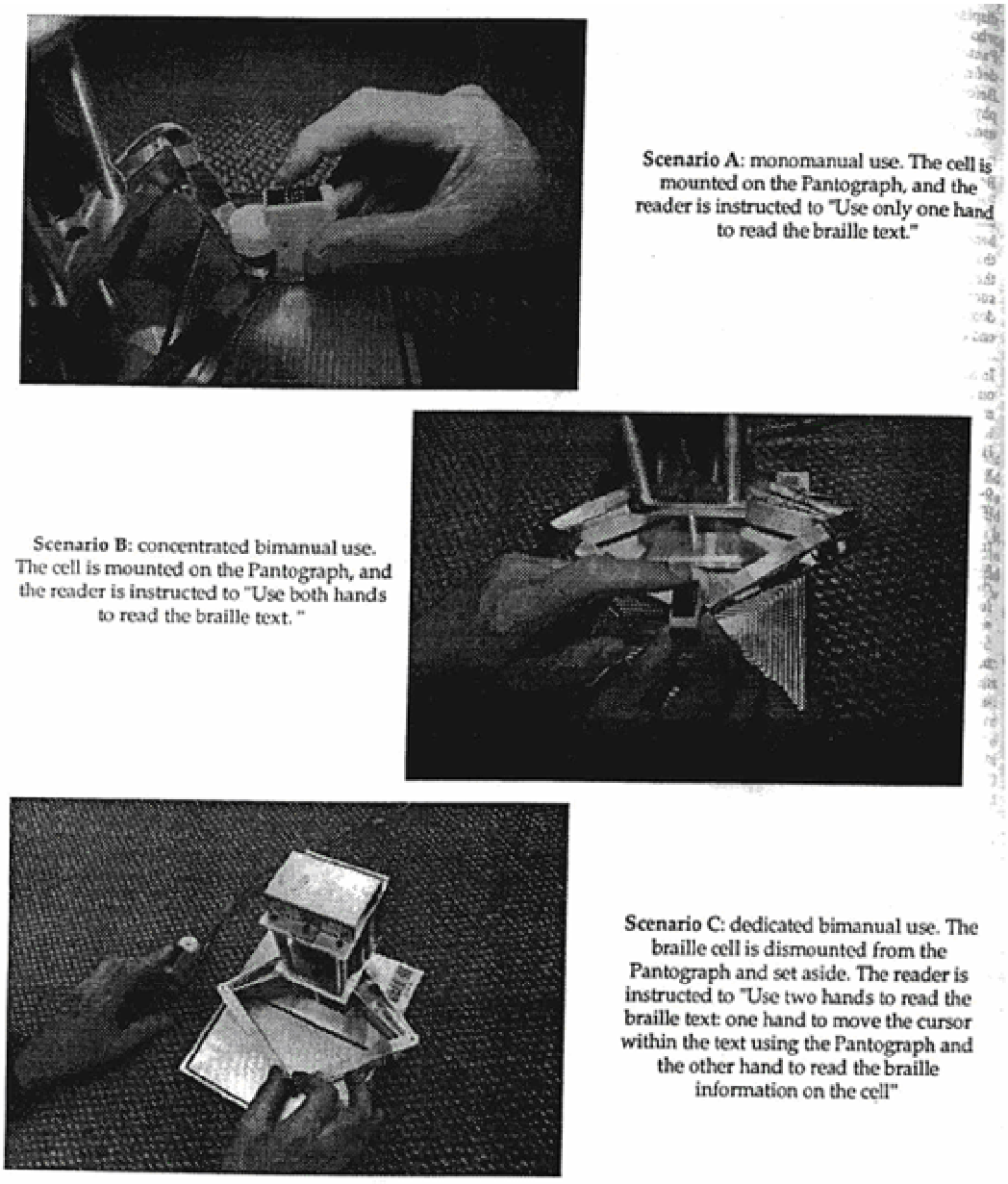
* Un brailliste peut-il se servir aisément du Pantobraille ?
* Existe-t-il plusieurs stratégies ou patterns de lecture et, dans l'affirmative, laquelle allie l'efficacité au confort ?
* A partir des réponses à ces questions comment est-il possible d'améliorer la conception initiale ?

Deux braillistes droitiers participent à l'expérimentation. Aucun des deux n'a utilisé le Pantobraille auparavant. L'un lit le braille avec son index droit. Le deuxième lit couramment le braille en utilisant ses deux mains. La tâche consiste à lire un texte technique de 210 mots d'abord avec une barrette braille de 40 cellules puis à l'aide du Pantobraille. Dans ce deuxième cas de figure, trois patterns de lecture ont été aménagés (Figure 9):

Scénario A : utilisation mono-manuelle. La cellule est montée sur le Pantobraille et le sujet a pour instruction de n'utiliser qu'une seule main.

Scénario B : utilisation bi-manuelle. La cellule est montée sur le Pantobraille et le sujet peut s'aider de ses deux mains.

Scénario C : usage bi-manuel différencié. La cellule braille est séparée du Pantobraille et posée à côté. Le sujet déplace le curseur avec une main et de l'autre lit l'information braille de la cellule.



Scenario A: monomanual use. The cell is mounted on the Pantograph, and the reader is instructed to "Use only one hand to read the braille text."

Scenario B: concentrated bimanual use. The cell is mounted on the Pantograph, and the reader is instructed to "Use both hands to read the braille text. "

Scenario C: dedicated bimanual use. The braille cell is dismounted from the Pantograph and set aside. The reader is instructed to "Use two hands to read the braille text: one hand to move the cursor within the text using the Pantograph and the other hand to read the braille information on the cell"

Figure 3: Three reading patterns which focus on the use of one or two hands, with the braille cell mounted on the Pantograph or removed from it.

Figure 9 : Les trois patterns de lecture utilisés dans l'expérience de Ramstein (1996)

Les résultats relatifs au scénario A indiquent que les sujets saisissent la cellule entre le pouce et le majeur et lisent la cellule avec l'index. La présence de gouttières et de démarcations a facilité le suivi de ligne et la perception successive des caractères. Le confort diminue lorsque les sujets emploient la main non dominante. A la fin du scénario A, les sujets ont éprouvé une fatigue musculaire. La vitesse de lecture est en moyenne de 7 mots par minute chez le sujet brailliste mono-manuel et de 9,3 mots par minute chez le sujet brailliste bi-manuel (voir Tableau 1.

Dans le scénario B, le sujet déplace la cellule avec sa main dominante et lit la stimulation braille avec sa main non-dominante. *« L'usage des deux mains a semblé plus naturel aux sujets »*[48]. Lorsque le rôle des mains est interverti, le confort est réduit. Les sujets ne disent pas avoir éprouvé de la fatigue musculaire. Le sujet mono-manuel obtient une vitesse de lecture de 11,8 mots tandis que celle du sujet bi-manuel s'élève à 17,6 mots par minute.

Dans le scénario C, le sujet parcourt le texte avec la main dominante tandis qu'il ressent la stimulation tactile avec la main non dominante. Les sujets se sont sentis plus à l'aise que dans le scénario précédent mais sans pouvoir se prononcer quant à l'augmentation de leur vitesse de lecture. A nouveau l'inversion des mains entraîne une diminution du confort. La vitesse de lecture atteint 13,1 mots par minute chez le sujet mono-manuel et 18,3 mots par minute chez le sujet bi-manuel.

Ramstein (ibid.) attribue les moindres performances du scénario A, comparé aux deux autres scenarii, aux difficultés sensori-motrices induites par la saisie et le déplacement de la cellule. Dans les scénarios B et C, les tâches de lecture, de saisie et de déplacement sont réparties entre les deux mains. Le scénario C a l'avantage d'éviter le déplacement de la main gauche.

La vitesse de lecture obtenue avec le Pantobraille est inférieure à celles observées avec les barrettes braille de 20, 40 ou 80 cellules. L'auteur émet l'hypothèse qu'un apprentissage pourrait avoir un effet décisif sur les performances.

[48] Traduction personnelle.

Scénario	**Brailliste mono-manuel** Ordre de passation : ACB	**Brailliste bi-manuel** Ordre de passation : ABC
Barrette Braille	30,6	64,3
A	7	9,3
B	11,8	17,6
C	13,1	18,3

Tableau 1 : Nombre moyens de mots lus en une minute en fonction de chaque scénario et selon la situation manuelle qui convient le mieux au sujet (main dominante déplaçant la cellule)

Le Pantobraille serait utilisable en l'état. Les sujets ont dit l'avoir préféré à l'Optacon (voir 3.1.1.). Ce système apporte des options comme l'accès directe à un support bi-dimensionnel et la possibilité de lire des graphiques à faible résolution. Trois facteurs sont à étudier pour une meilleure ergonomie du dispositif :

1. Les utilisateurs ont du s'adapter à un outil et recourir à de nouvelles stratégies de lecture.
2. Lors de la lecture d'une barrette braille, le doigt est actif. Cette activité est censée jouer un rôle à la fois dans la discrimination fine des caractères mais également dans la perception des transitions d'un mot à l'autre. Avec le Pantobraille l'utilisateur est contraint d'explorer les cellules successivement.
3. Etant donné que la combinaison entre le déplacement, la saisie et la discrimination représente un coût sensori-moteur, une répartition optimale de ces actions entre les deux mains reste à trouver.

Sur le plan fonctionnel, le Pantobraille ne concurrence pas la barrette braille dans la lecture de texte. Son usage dans la perception de graphique simple n'a pas été étudié. Le dispositif présente les mêmes inconvénients que le PHANToM en terme de coût et de transportabilité.

En ce qui concerne le processus de conception, celui-ci s'appuie sur deux types de connaissances

1. Des caractéristiques générales de la psychophysiologie du toucher
2. L'identification de deux patterns d'explorations haptiques

Le concepteur couple deux technologies et adapte le dispositif afin de proposer une interaction qui se rapproche de la richesse et de la fluidité des explorations directes. L'activité manuelle est prise en considération et est interrogée grâce à un protocole qui compare différentes stratégies de lecture. Si l'expérience montre que les performances sont supérieures

dans les conditions bi-manuelles que dans la situation mono-manuelle, un biais d'apprentissage n'est pas exclure car les deux sujets débutent par la situation mono-manuelle.

Le dispositif que nous évoquons dans la partie suivante couple également deux types de retour. Sa conception est directement inspirée des techniques d'exploration sur support traditionnel.

2.2.4 Technologie à retour tactilo-sonore : TouchMelody

Ramloll et Brewster (2002) se sont appuyés sur les explorations de diagrammes pour proposer un système tactilo-sonore appelé TouchMelody. Une étude préalable des pratiques de lecture chez des aveugles et des malvoyants a révélé que les stratégies dépendent des sujets et que le rôle de l'éducation est déterminant dans la façon dont les diagrammes sont appréhendés. La plupart des participants ont jugé la tâche de lecture de diagrammes difficile. L'une des stratégies exploratoires communes aux sujets consiste à utiliser la main non-dominante pour prendre un point de référence et la main dominante pour explorer ses environs. En ce sens, TouchMelody a été élaboré selon le principe d'une interaction bi-manuelle. Le système « augmente » les graphiques tactiles par des informations sonores censées aider les utilisateurs à être plus précis dans la discrimination des graphiques (par exemple pour lever l'ambiguïté entre deux hauteurs d'un histogramme) et l'évaluation des distances entre deux points. Ce système cherche à se substituer aux grilles et graduations qui surchargent le support. Deux objets sonores O et S équipent respectivement l'index de la main non dominante (prise de repère) et de la main dominante (voir Figure 10). L'utilisateur peut entendre la position de S relative à O au fur et à mesure de ses déplacements. La hauteur du son du point S varie en fonction de la distance verticale le séparant du point O. L'utilisateur définit lui même la distance qui correspond à l'échelle sonore du dispositif (hauteur qui sépare le son le plus grave du son le plus aigu). Classiquement, H est défini d'après la hauteur du graphique. Lorsque le point S est situé plus haut que le point O, alors l'utilisateur entend un son de piano, dans le cas inverse, il entendra un xylophone. Ce procédé sert à comparer des hauteurs non contiguës.

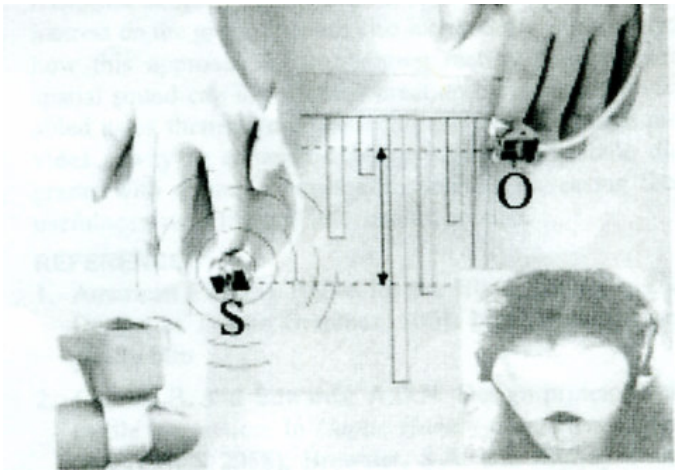


Figure 10 : Utilisation de TouchMelody dans la lecture d'un diagramme tactile

Une étude pilote avec cinq voyants aveuglés montre que le système peut être aisément compris et révèle des usages non anticipés, comme faire varier l'échelle sonore en fréquence pour connaître le plus petit déplacement entraînant un changement de hauteur. Les utilisateurs ont spontanément mis en œuvre une technique de « zoom » sonore : en diminuant la taille du H, ils peuvent avec d'autant plus de précision comparer la hauteur entre O et S. Les résultats indiquent que TouchMelody facilite ou renforce l'estimation des distances entre deux indices éloignés. Les auteurs projettent d'incorporer une synthèse vocale qui aurait l'avantage de donner la valeur des distances ou induire la possibilité de marquer des points particuliers.

Ce système constitue une assistance à la lecture de graphiques en relief. L'introduction d'une synthèse vocale apporterait une plus grande précision et allégerait la charge sonore. Son utilité se révèle surtout pour comparer la hauteur de points et semble peu généralisable à tout type de dessin.

La prise en compte des explorations directes est réalisée en amont du processus de conception. Le dispositif est pensé dans la continuité des explorations directes aussi bien du fait du support employé (images en relief) que du type d'interaction proposé. Le dispositif n'aménage pas tant des procédures similaires aux explorations directes qu'il assiste un type de stratégie observé avec le support traditionnel (prise de repère à l'aide de la main non-dominante et lecture avec la main dominante).

T-Draw (voir prochain paragraphe) est également un dispositif de réalité augmentée mais dédié à la production de dessins en relief.

2.2.5 Interface numérique de production de dessins tactiles : TDraw

Kurze (1996) part du constat que les logiciels de dessin pour aveugle, calqués sur ceux des voyants, offrent des possibilités d'interaction limitée. Les utilisateurs peuvent créer et manipuler des figures géométriques et des lignes par des commandes. En revanche, aucun retour sensoriel n'est prévu. Or, un outil de dessin pour aveugles doit, selon Kurze (ibid.), satisfaire les critères suivants :

* *Feed-back immédiat* : l'utilisateur doit avoir la possibilité de toucher et d'explorer sa production.
* *Résolution satisfaisante* : les lignes rendues se doivent d'être aussi fines que celles produites par le sujet. Les matrices de picots sont à évitées ou offrir une forte densité de stimulateurs[49]
* *Indication*: chaque ligne ou objet du dessin doit être nommé ou faire l'objet d'un commentaire spécial.
* *« Effaçabilité »* : toutes les lignes ou les objets doivent pouvoir être supprimés si le sujet a l'intention de modifier le dessin.
* *Utilisabilité* : le système doit rester facile à utiliser même sans déplacer les mains de l'espace d'exploration.

TDraw, l'interface de dessin conçue par Kurze (ibid.), remplit tous ces critères excepté « *l'effaçabilité* ». Ce dispositif permet à l'aveugle de produire une image en relief qui peut être augmentée par du son. Il comporte un stylet numérique qui produit des formes en relief par un procédé thermique. Une feuille de papier thermogonflé est placée sur la tablette numérique. Des données verbales sont enregistrables grâce à un système de reconnaissance vocale. TDraw reconnaît deux primitives géométriques : lignes/séquences de lignes et polygones. L'objet dessiné (la ligne ou le polygone) peut être nommé ou accompagné d'un commentaire. Ces indications sont enregistrées lors de la production du dessin. Pour les activer l'utilisateur appuie sur une touche du stylet. Enregistré au format numérique, l'image produite a l'avantage d'être facilement imprimable[50].

[49] On peut citer à cet égard et à titre d'exemple la technologie Tactel développée au CEA-LIST et la matrice développée par Summers à l'Université d'Exeter

[50] Ce type de dispositifs de réalité augmentée est l'objet de nouveaux développements. Ainsi, en utilisant à la fois le langage SVG (Scalable Vector Graphics) qui permet d'attribuer des indications à un graphique et la technologie d'embossage Tiger, les utilisateurs ont la possibilité d'imprimer des images en relief puis de prendre

Cet outil peut servir également à mieux comprendre l'activité de dessin Un ensemble d'observations sur la pratique du dessin par les aveugles a pu être réalisé lors de l'évaluation du dispositif. Les résultats seront présentés dans la partie 2.3.3.2.

Le fait que TDraw ne permette pas d'interagir directement avec les objets numériques constitue sa principale limite.

Du point de vue de la recherche en ergonomie le travail de Kurze possède deux intérêts :

1. Il propose des critères pour la conception
2. Il réalise une analyse de l'activité graphique des personnes aveugles qui lui permet de relever trois patterns de dessins au sein d'un groupe de cinq aveugles, apportant de nouvelles connaissances sur cette pratique assez peu étudiée par la psychologie cognitive.

La dernière interface (MIMIZU) dont il va être question permet de lire et de produire des dessins sans avoir recours aux images en relief.

2.2.6 Une interface tactile de production et de lecture de dessins : MIMIZU

Le système MIMIZU (Kobayashi & Watanabe, 2004), dont le nom signifie « ver » en japonais, est composé de deux terminaux tactiles pour une communication à distance entre deux utilisateurs. Equipé d'un stylo ultrasonique, l'utilisateur dessine directement sur la grille tactile. Une fonction d'effacement rend le dessin modifiable. La figure produite peut être perçue à distance par l'autre utilisateur.

La surface de la zone tactile mesure 144x96mm. Les 1536 picots sont disposés en matrice de 48 colonnes et 32 lignes. La distance entre picots est de 3mm, le diamètre des picots mesure 0,7mm. Les picots sont activés par une technologie piézoélectrique.

La pointe du stylo émet des ultrasons et des signaux infrarouges lorsque l'utilisateur exerce une pression sur la grille. Ces signaux commandent la montée et la descente des picots. Ce système offre une grande flexibilité. Néanmoins, l'utilisateur doit prêter attention à ne pas masquer avec son doigt les récepteurs de la grille, lorsqu'il s'aide de sa main non dominante.

---

connaissance des commentaires qui les accompagnent en posant cette image sur une tablette numérique (Gardner & Bulatov, 2004)

Deux sujets aveugles âgé de 20 ans, un femme aveugle de naissance et un homme avec une faible perception de la luminance, ont participé à une situation de validation. Les sujets sont tour à tour « émetteur » et « récepteur ».

Le sujet A ou émetteur prend connaissance d'une forme géométrique sur papier thermogonglé puis la copie sur la grille de MIMIZU. Le sujet B ou récepteur lit la forme présente sur son terminal et la reproduit sur papier thermogonflé (voir Figure 11).

La sensibilité tactile et/ou les aptitudes au dessin ont pu influencer les performances globales. Afin de prendre en considération ces éventuels effets, il est demandé aux sujets, en fin de séance, de dessiner avec un kit traditionnel de traçage des formes présentes sur papier thermogonflé (voir Figure 12).

Lors d'une seconde séance, les sujets intervertissent leur rôle : le sujet B devient émetteur et sujet A le récepteur.

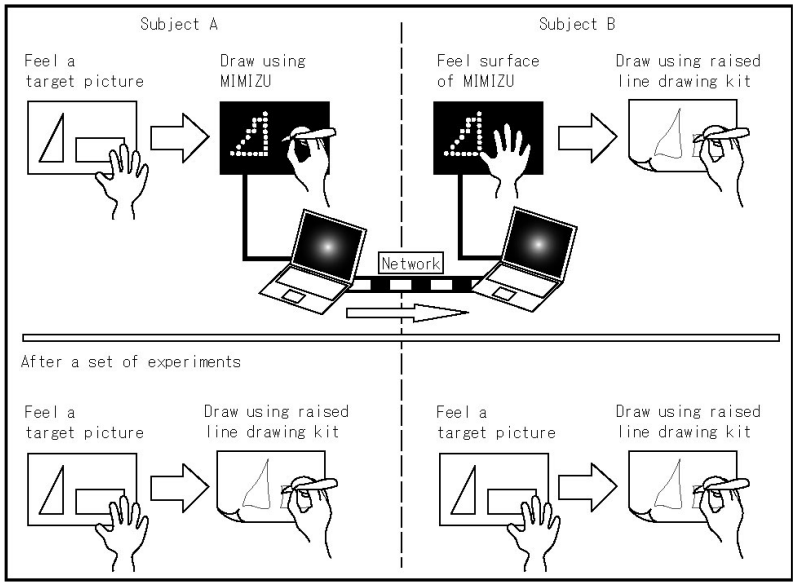


Figure 11 : Protocole de la première séance

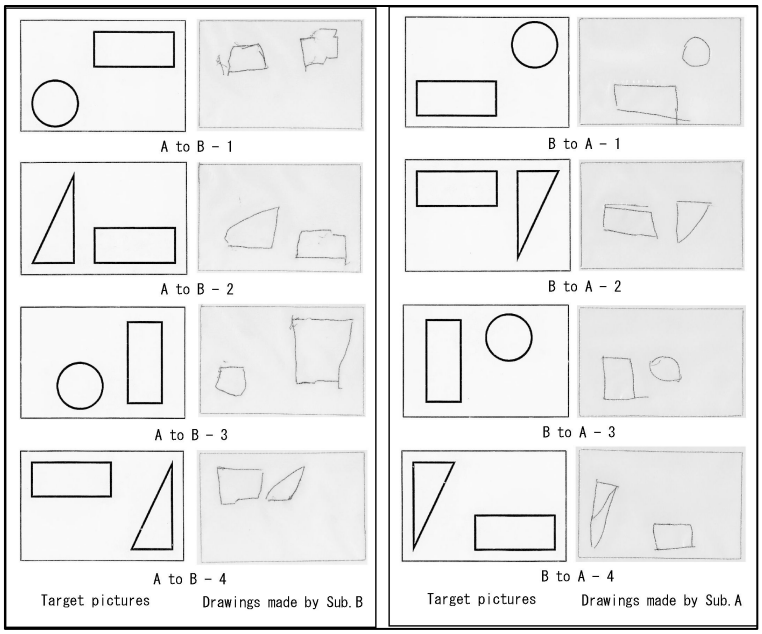


Figure 12. : Figures sur papier thermogonflé présentées à l'émetteur et dessins réalisés par le récepteur. Les cases de gauche correspondent aux résultats de la première séance.

Les résultats situés dans la colonne de droite montrent une reproduction correcte des figures initiales. Ceux de la première colonne ne sont pas aussi satisfaisants. Cet écart proviendrait, entre autres, d'une différence importante dans les conditions de la situation : dans la séance 2, le sujet A pouvait prévoir le type de figures à reproduire. La reproduction du cercle a été approximative dans les situations A vers B1 et A vers B3. Plusieurs raisons seraient à l'origine de cette moindre performance : la naïveté du sujet A dans l'utilisation du dispositif, la difficulté éprouvée à dessiner des cercles sans retour visuel, enfin la résolution de la plage tactile, moins appropriée pour représenter des formes curvilignes. Cependant, l'analyse des productions réalisées avec les outils traditionnels révèle de meilleures aptitudes picturales chez le sujet A ; ces dernières contribuent à expliquer les écarts de performance entre les deux séances. Néanmoins, lors du tracé d'un rectangle, la pointe du stylo de A a dévié de sa trajectoire. Le sujet B a reproduit cette imprécision dans son dessin sur support traditionnel. Les auteurs comptent proposer alors une fonction d'aide au traçage de lignes droites.

Les résultats observés n'ont pas été à la hauteur des espérances de Kobayashi et Watanabe (2004). Ces derniers envisagent d'augmenter la résolution de la plage tactile et d'améliorer l'utilisabilité du système de sorte que les sujets parviennent à des performances supérieures

au-delà de l'appropriation rapide et aisée du système. Néanmoins, l'accessibilité d'une technologie dépend aussi de son coût, de sa transportabilité et de sa compatibilité avec les technologies existantes. Le prix de cette technologie, relativement élevé, avoisine les 4800 euros. Le poids du matériel n'est pas mentionné. Enfin, la description du matériel ne nous permet pas non plus de savoir si MIMIZU s'intègre à l'interface graphique et offre la possibilité de percevoir et d'agir sur ses objets.

Si Kobayashi et Watanabe réalisent une étude évaluative en revanche, leur objectif n'est pas de comprendre comment s'effectuent la lecture et la production de dessin chez l'aveugle. Leur travail met plutôt l'accent sur le développement technique. Et avant tout, le défi relevé consiste à afficher sur une grille éphémère d'une image en relief et d'en améliorer la résolution.

2.2.7 L'identification de stratégie d'exploration : une heuristique pour le concepteur

Les études présentées ci-dessus s'inscrivent dans un processus de conception itératif où sont associés des utilisateurs. De fait, elles respectent au moins deux des cinq principes[51] avancés par la norme ISO 13407 qui définit les conditions d'un processus de conception centré utilisateur. Néanmoins, les évaluations, réalisées avec très peu de sujets (voire avec uniquement des sujets voyants aux yeux bandés) ne permettent pas de différencier différents profils utilisateurs et d'atteindre un seuil de validité statistique. Il s'avère que le test contrôlé est difficile à appliquer avec des populations qui présentent une grande hétérogénéité comme celle des aveugles. L'âge de survenue de la cécité et sa nature le niveau d'études des aveugles qui participent aux études évaluatives sont en général des facteurs à forte variabilité. Par ailleurs, le pourcentage de aveugles dans la population totale étant relativement faible, il est fort difficile de rassembler un nombre suffisant de sujets pour pouvoir distinguer des profils d'utilisateurs et généraliser les résultats.

Si du point de vue de la pratique ergonomique, les démarches adoptées se montrent satisfaisantes, en revanche, leur portée scientifique est variable. D'abord, la plupart de ces études, ne se situent pas dans un courant théorique particulier. Seules celles de Kurze (1996)

[51] Les autres principes sont la préoccupation amont des utilisateurs, la répartition appropriée des fonctions entre les utilisateurs et la technologie, l'intervention d'une équipe de conception multidisciplinaire. http://www.iso.ch/iso/fr/

et de Jansson se réfèrent respectivement au cognitivisme et à l'approche écologique. Ensuite, deux types de connaissances peuvent être attendues de ce type d'étude :

1. L'extraction de règles ou de principes de conception transposables à des situations similaires.
2. Des connaissances sur les sujets en situation d'interaction pouvant servir à l'élaboration d'une modélisation des utilisateurs, des activités ou des tâches.

Or, l'un ou l'autre de ces deux objectifs n'est pas toujours atteints.

- ***Règles et principes de conception***

Le travail de Kurze (1996) formalise un ensemble de principes de conception. De leur côté, Jansson[52], Ramstein (1996), Ramloll et Brewster (2002) constatent la richesse des stratégies d'explorations haptiques des objets du monde réel et considèrent qu'ils peuvent s'en inspirer pour concevoir les dispositifs d'accès non visuel. Deux voies sont alors possibles :

1. Partir d'un dispositif déjà conçu et le modifier dans le sens d'une plus grande proximité avec les stratégies d'explorations non-prothétisées (Jansson ; Ramstein, 1996)
2. Concevoir directement un dispositif d'après l'identification de ces stratégies (Ramloll & Brewster, 2002).

L'évocation des stratégies d'exploration consiste essentiellement à faire part :

* De leur caractère bi-manuel et pluri-digital
* De patterns de lecture particulier (par exemple, ceux mentionnés par Ramstein dans la lecture du braille)

Ainsi, rien n'est mentionné quant à l'exécution spatio-temporelle de ces stratégies ou sur d'éventuels profils exploratoires qui prendraient en compte le statut visuel. Or, pour satisfaire la démarche qui consiste à instituer un parallèle la situation « naturelle » et la situation prothétisée, il conviendrait de disposer d'une caractérisation plus précise des dynamiques exploratoires : types de mouvements appliqués, enchaînement de ces mouvements au cours de l'exploration et leur modulation en fonction des propriétés de l'objet. L'obtention de ces données nécessite à la fois une revue des études consacrées à la perception haptique de formes chez l'aveugle et le voyant et l'élaboration d'une méthodologie d'observation des explorations réalisées via un dispositif.

[52] http://www.ida.liu.se/~ssomc/papers/Jansson.pdf.

- ***Connaissances sur les sujets en situation***

Ces études apportent des éclairages nouveaux sur la façon dont les sujets réussissent à percevoir des formes géométriques avec un instrument. Cependant, la description de cette activité reste souvent sommaire ou épisodique, et ce en dépit d'une mise en parallèle des situations traditionnelles et prothétisées. Les observables retenus sont essentiellement le taux de réussite et le temps de réalisation. Afin de mieux rendre compte de l'appropriation, il conviendrait de décrire et analyser l'activité perceptive dans les deux situations comme le réalise l'étude de Béguin et Rabardel (2000). En outre, ces évaluations n'appréhendent pas la dimension développementale de l'activité. En dépit d'un processus de conception itératif, elles demeurent ponctuelles et ne considèrent pas la transformation des usages en fonction de l'expérience des sujets.

Afin d'approfondir la question de l'activité perceptive de lecture de formes et de son développement, nous orienterons, dans la partie suivante, nos investigations dans deux directions :

1. Le rôle de l'activité perceptive de lecture dans l'élaboration de connaissances, notamment mathématiques. Nous verrons que chez les voyants le recours au graphique facilite la compréhension de notions abstraites. Quel est alors l'impact de ce mode de représentation chez les aveugles ? A quelles conditions peuvent-ils en faire usage ? Les réponses apportées par la psychologie cognitive nous permettrons de préciser des critères d'utilisabilité et d'appropriation des images.

2. L'identification des stratégies d'exploration par les études en psychologie de la perception haptique et ce, afin de mieux caractériser les stratégies observées dans les situations médiatisées et de comprendre leurs limites. Du point de vue de la conception, cette connaissance peut être réinvestie à deux niveaux : en proposant des modalités de couplage qui tiennent compte de la psychologie de la perception de l'aveugle, soit en adaptant l'instrument (processus d'instrumentalisation). Soit en enseignant des procédures d'exploration qui facilitent l'appropriation du dispositif, soit en favorisant le processus d'instrumentation.

2.3 Activité exploratoire, cognition et graphisme

Dans le chapitre précédent, nous avons suggéré que pour concevoir un dispositif de lecture haptique de formes et rendre compte de son appropriation, il nous fallait interroger l'activité et ses évolutions. Dans ce présent chapitre, nous allons tout d'abord évoquer les travaux posant que l'activité perceptive contribue à l'élaboration de catégories du raisonnement telles que les connaissances mathématiques (voir 2.3.1) ou encore la notion d'espace (voir 2.3.2) et ce aussi bien chez les voyants que chez les aveugles. Puis, nous nous intéresserons à la façon dont l'activité perceptive haptique se déploie et considérerons alors les stratégies d'exploration identifiées dans les études en psychologie cognitive. De façon plus générale, cette partie 2.3 cherche à expliquer pourquoi et à quelles conditions l'exposition accrue au images se révèle pertinente dans l'éducation des aveugles.

2.3.1 Action, graphisme et genèse des connaissances mathématiques

On doit à l'entreprise piagétienne d'avoir analysé et conceptualisé le rôle de l'activité sensori-motrice dans la genèse des connaissances. Deux dimensions du travail de Piaget (1936) nous intéressent particulièrement :

- le lien entre l'activité sensori-motrice et la formation des concepts (notamment les concepts mathématiques)
- La structuration de l'action et ses évolutions

En outre, cette approche théorique alimente des recherches en ergonomie (Rabardel, 1995) en didactique professionnelle (Pastré 1997) et en didactique des mathématiques (Vergnaud, 2001). Dans la mesure où nous nous intéressons à une activité mobilisée dans l'apprentissage des mathématiques, nous présenterons plus largement la théorie des champs conceptuels de Vergnaud (ibid.) et des recherches sur la lecture de graphes mathématiques.

2.3.1.1 Activité sensori-motrice et connaissance selon Piaget

Piaget portait une attention particulière à ce qui dans l'activité sensori-motrice de l'enfant *« préfigure l'activité scientifique »* (Montangero, 2001, p. 79). Dans les années 1920, sous l'influence de Janet et de Revauly d'Allones, Piaget reprend la notion de schème alors qu'il étudie l'activité perceptivo-gestuelle des bébés. Le schème rend compte d'opérations

répétables et transférables exercée sur des objets aussi bien lors de l'activité sensori-motrice que dans le raisonnement logique et mathématique. Autrement dit, le schème est une structure d'action généralisable, qui correspond aux plus petites unités comportementales et qui peut s'appliquer aux mouvements du corps mais également au langage et à la cognition. *« Nous appellerons schème ce qui est transposable, généralisable, ou différentiable d'une situation à la suivante, autrement dit ce qu'il y a de commun aux diverses répétitions ou application de la même action »* (Piaget, 1967, p.16).

De plus, dans les années 1930, Piaget (1936) va définir l'adaptation selon deux mécanismes que sont l'assimilation et l'accommodation. L'assimilation consiste à incorporer des éléments extérieurs aux schèmes du sujet. Ce processus possède trois propriétés : il est répétitif, généralisateur et récognitif. Répétitif, car il s'exerce fréquemment une fois acquis et se conserve. Généralisateur, car le schème va s'étendre à d'autres champs d'activités et de connaissance. Récognitif, car le sujet reconnaît les situations auquel le schème peut s'appliquer. Le pôle de l'accommodation est orienté vers le sujet qui adapte ses structures internes aux contraintes du milieu. Assimilation et accommodation sont difficilement dissociables. Le développement se manifeste par un enrichissement de ces deux dimensions.

Au cours du développement, la cognition se nourrirait de l'activité sensori-motrice dont les propriétés sont déjà en germe dans le comportement des organismes vivants qui cherchent à assurer leur survie et qui contribuent par là au maintien de l'espèce. Etablir un lien de filiation et des analogies entre le substrat biologique et les développements les plus élaborés de la cognition répond chez Piaget à une quête épistémologique plus profonde, à savoir l'interrogation kantienne sur les conditions de possibilité d'une naissance objective et intersubjective du monde (Ducret, 2001). Piaget questionne ainsi le lien entre l'action et l'abstraction, entre la réalité physique et les concepts mathématiques.

Il distingue l'abstraction empirique de l'abstraction réfléchissante. L'abstraction empirique procède à partir d'objets d'expérience dont elle tire une propriété alors que le concept d'abstraction réfléchissante rend compte de connaissances qui ne sont pas directement tirées du milieu. Le sujet extrait une connaissance nouvelle à partir de la coordination de ses activités. Celle-ci est ensuite projetée sur un plan cognitif supérieur, processus que Piaget nomme réfléchissement. Ensuite, cette connaissance se trouve réorganisée et enrichie, ce qui constitue le processus de « réflexion » (Montangero, 2001). L'abstraction réfléchissante se

situe à plusieurs niveaux du développement cognitif et ses résultats ne sont pas nécessairement conscients.

Les connaissances mathématiques prolongent par abstraction réfléchissante et généralisation constructive les formes d'organisation de l'action qui elles-mêmes sont issues des lois de fonctionnement du vivant, qui à leur tour s'inscrivent dans le règne d'une nature physique dont les scientifiques percent le fonctionnement grâce aux connaissances logicomathématiques. Telle serait la genèse d'une connaissance à la fois objective et intersubjective.

L'œuvre de Piaget attribue une place centrale à l'activité sensori-motrice. Néanmoins, ses héritiers et exégètes, notamment Vergnaud (2001), contestent sa hiérarchisation des activités cognitives et notamment la prééminence accordée à la logique. Nous présenterons dans la section suivante les travaux de Vergnaud (ibid.) qui revisite les théories piagétiennes à la lumière de la didactique et propose de nouveaux cadres d'analyse théorique et méthodologique. L'approche didactique nous intéresse dans la mesure où celle-ci envisage l'action dans sa dimension épistémologique (comprendre comment celle-ci se structure en référence à elle-même) et, dans sa dimension développementale (situer son évolution dans l'histoire du sujet) (Pastré, 1999).

2.3.1.2 Le schème selon Vergnaud et la didactique des mathématiques

Piaget situe le schème dans une théorie de l'action plus que de la perception. Vergnaud (2001), ré-explorant la notion de schème, rend grâce à cette rupture puisqu'elle a amené Piaget à distinguer non pas *« des totalités perceptives comme le faisaient les gestaltistes mais des totalités dynamiques fonctionnelles, organisant le décours de l'activité gestuelle »* (ibid., p.109). Vergnaud (ibid.) voit dans le geste un paradigme de l'activité : *« c'est dans le geste qu'on trouve les meilleurs exemples de l'activité : le geste est pensée, on peut même ajouter la pensée est un geste »* (p. 109). Il propose d'ailleurs de substituer l'expression activité perceptivo-gestuelle à la terminologie de Piaget *(« activité sensori-motrice, stade sensori-moteur »*) qu'il juge trop réductrice. Vergnaud (ibid.) reprend la deuxième dimension du schème à savoir la généralisation à laquelle il adjoint le concept de *« classe de situation »*, non présent chez Piaget et propose donc que le couple conceptuel « *schème/situation* » constitue « *la clé de voûte de la psychologie cognitive et de la théorie de l'activité pour cette simple raison que la connaissance étant adaptation, ce sont les schèmes qui s'adaptent aux situations* » (p. 110). Son expérience de chercheur en didactique des mathématiques l'a

conduit à donner une épaisseur scientifique au concept de situation. Il articule alors la notion de schème avec celle de situation et propose ainsi une première définition du schème : *« le schème est une organisation invariante de l'activité pour une classe de situation »* (ibid., p. 110).

Dans le cas des mathématiques et selon le contexte, les schèmes employés par les élèves peuvent s'éloigner des opérations formelles et des procédures enseignées. La parenté du schème avec l'algorithme relève d'un rapport d'inclusion : l'algorithme est un schème mais l'inverse n'est pas forcément vrai, les règles erronées appliquées par les élèves à la place des algorithmes enseignés en sont une illustration. Il évoque trois exemples de schèmes tirés du domaine des mathématiques :

1. Le schème du dénombrement *« suppose une correspondance biunivoque entre quatre catégories d'éléments distincts : les objets dénombrés, les gestes de la main et du bras, les gestes du regard, les gestes de la voix. La cardinalisation est une compétence distincte de la compétence à coordonner biunivoquement plusieurs registres de geste. Certains enfants expriment l'une de ces compétences et pas l'autre. Le schème du dénombrement n'est pas un algorithme »* (ibid., p. 111).
2. l'algorithme de la division présente des difficultés aux élèves ; ces derniers substituent alors des schèmes personnels à l'algorithme enseigné par le maître.
3. la résolution d'équations algébriques qui fait appel à des algorithmes savamment élaborés au cours de l'histoire des mathématiques et dont les élèves s'écartent.

Ces exemples rendent compte de la succession d'actions et de prise d'information. Les premières sont partielles et les secondes locales. Le tout obéit à une organisation invariante qui lie les actions à des conditions et des circonstances sous la forme de règles SI-ALORS. Cette conceptualisation qui traverse l'activité est peu explicitable par les élèves. Le caractère conditionnel des règles constitutives du schème a été ignoré par Piaget qui n'établit aucune liaison entre le schème et l'invariant opératoire. Le schème a trait au décours temporel de l'activité tandis que celui d'invariant opératoire porte sur la conservation des situations. Piaget a pris le concept d'invariant dans le sens que lui donnaient les mathématiciens de la fin du XIXème siècle : ce qui se conserve sous certaines transformations. Vergnaud (ibid.) étend ce concept d'invariant au fondement même de la pensée. La notion d'invariant s'applique :

* *« Aux variations entre objets d'une même classe*
* *Aux situations d'une même classe*
* *Aux différentes valeurs d'un même descripteur*

* *Entre les différents exemples illustrant une même relation*
* *Entre différentes relations illustrant des propriétés communes »* (p. 112).

Ainsi objet, prédicat et proposition relèvent de la notion d'invariant. Vergnaud (ibid.) propose une seconde définition du schème. Ce dernier comporte quatre composantes *:*

1. Un ou plusieurs buts
2. Des règles d'action de prise d'information ou de contrôle
3. Des invariants opératoires (concepts en acte, théorème en acte)
4. Des possibilités d'inférence

Il oppose les inférences explicites dans le raisonnement du scientifique à leur caractère spontané, implicite et lacunaire dans la pensée en acte. Vergnaud reproche aux travaux de Newell et Simon (1972) d'ignorer la prise d'information et la conceptualisation dans le réglage de l'activité. Assimiler le raisonnement et, a fortiori, les connaissances mathématiques à la logique est une tradition philosophique qui remonte à Aristote et de laquelle Piaget ne s'est pas clairement démarqué. D'après Vergnaud (ibid.), les principes mathématiques ne découlent pas uniquement de la logique. Il propose d'opérer une révolution épistémologique en plaçant la conceptualisation au cœur même des processus cognitifs. Les concepts piagétiens sont d'après lui trop réducteurs pour rendre intelligible la richesse des compétences en jeu dans le raisonnement mathématique de l'enfant. Par exemple, les concepts de groupement, de combinatoire, de raisonnement hypothético-déductif ne permettent pas d'appréhender toutes les compétences cognitives des enfants de moins de 12 ans. Cependant, Vergnaud (ibid.) nuance sa critique en rappelant que Piaget a mené des recherches sur *« des opérations de pensée qui ne relevaient pas de la logique mais de la conceptualisation de l'espace, du mouvement, du hasard »* (p. 116 et 117). Néanmoins, ces considérations ont un poids mineur face à ses perspectives logicistes. Vergnaud (ibid.) déplore tout de même le peu d'intérêt que Piaget portait aux questions posées par l'éducation. Les problèmes d'apprentissage auraient alors été d'un apport fructueux pour son épistémologie génétique.

Par conséquent, la didactique ne saurait reposer uniquement sur les théories piagétiennes pour éclairer le processus d'apprentissage et les méthodes d'enseignement. En didactique des mathématiques, il fut plus utile de mobiliser l'épistémologie de cette discipline, notamment en s'interrogeant sur les difficultés posées par les concepts mathématiques et sur leur transformation au cours de l'histoire, que d'avoir recours aux formalismes piagétiens. Ceci ne

nie pas pour autant l'influence de l'approche développementale dans la recherche dans le domaine de l'éducation.

Le cadre théorique *« des champs conceptuels »* élaboré par Vergnaud permettrait de mieux saisir *« ruptures et filiations au cours des apprentissages scolaires et professionnels »* (p.117). Ce cadre souligne l'importance de l'activité sensori-motrice comme source première de connaissance et de la médiation d'autrui. Le langage est une autre dimension de ce cadre. Il est envisagé dans son rôle de transformation, de vecteur d'échange mais aussi de signifiant de la compétence. « *Un champ conceptuel se définit par un ensemble de situations et un ensemble de concepts. Les concepts forment système »* (p.118). Cette idée est sous-tendue par un ensemble de positions :

- Les situations maîtrisées par les enfants constituent un ensemble partiellement ordonné
- Elles sont à la fois le lieu de formation des connaissances et de leur mise à l'épreuve
- Les compétences résultent de la mise en œuvre des schèmes. Ces derniers sont transmis par l'institution et, en même temps, sous le contrôle du sujet apprenant.
- La collaboration et la communication aussi bien entre maître et élève qu'entre élèves joue un rôle clé dans la construction des schèmes et dans la conceptualisation.
- Le langage rend communicables, transmissibles et vérifiables les concepts en acte et théorème en acte.
- L'expression des idées n'est que la partie apparente des connaissances issues de l'action et de l'expérience.

Vergnaud (ibid.) énonce alors le noyau dur de sa thèse*: « la perception est conceptualisation »*, *« elle met en jeu des opérations de pensée plus complexe qu'il n'y paraît car sa fonction est l'identification des situations, des objets de leur propriétés et relations, ainsi que des processus de transformations auxquels ils se prêtent »* (p.119). Il évoque le cas des enfants cérébro-lésés qui, faute de pouvoir organiser leurs séquences de regard, sont dans l'incapacité de mettre en oeuvre le schème du dénombrement. Vergnaud (ibid.) dénonce un dualisme sous-jacent chez Piaget qui lui fait distinguer connaissances mathématiques et connaissances physiques. En outre, l'attribution de l'abstraction simple à certaines disciplines et de l'abstraction réfléchissante à d'autres lui semble contestable. Enfin, pour surmonter cette opposition entre connaissances mathématiques et connaissances physiques, Vergnaud (ibid.) propose de revenir à la dimension pragmatique des mathématiques. Il conclut : *« les*

mathématiques sont en leur début une connaissance pragmatique comme les autres sciences. Issus de l'expérience des situations dans lesquelles il s'agit de combiner et de dé-combiner des mesures, d'identifier des figures et d'analyser des propriétés, de repérer des positions et des changements de position, de comprendre dans les transformations géométriques et numériques ce qui est modifié et ce qui est conservé. C'est seulement dans une phase relativement tardive de leur développement que les structures mathématiques deviennent les systèmes axiomatisables et formalisables. Il ne faut donc pas confondre l'avant et l'après » (p.121 et 122).

Or, dans ce travail de manipulation des objets mathématiques qui conduit l'élève à la construction de modèles conceptuels, le graphique et notamment les graphiques interactifs s'avèrent un média privilégié.

2.3.1.3 Les apports didactiques de la représentation graphique

La littérature en didactique des mathématiques plaide fortement pour l'usage de dispositifs visuels à la fois dans l'enseignement et l'apprentissage des mathématiques (Noble Nemirovsky, DiMattia, & Wright, 2001). Larkin et Simon (1987) affirment la supériorité des représentations spatiales sur les descriptions verbales dans la résolution de problèmes en géométrie. Ces représentations spatiales possèdent la faculté de restituer *« explicitement les informations de nature géométrique et topologique concernant les composantes du problème »* (Bruillard, 1997). Cette idée se trouve relayée par les enseignants en mathématiques pour qui les représentations mentales visuelles et les dispositifs visuels sont essentiels dans la pratique des mathématiques élémentaires et appliquées et un support d'autant plus précieux en classe que l'avènement des technologies informatiques autorise un large éventail de dispositifs graphiques complexes (Dreyfus, 1991 ; Healy et Hoyles, 1999 ; Rival, 1987).

Le graphique offre une suppléance cognitive reconnue aux étapes initiales. Cette inscription et sa lecture ne fournissent pas de preuve formelle mais permettent une interprétation opérationnelle des notions (Tall, 1992) ce qui en fait une méthode privilégiée en didactique des mathématiques. Des enseignants ont ainsi démontré la valeur pédagogique du bon usage de dispositifs visuels complexes en mathématiques élémentaires au lycée (Bishop, 1989 ; Crawford et Scott, 2000 ; Healy et Noyles, 1999 ; Kelly, 1999). Cependant, le recours au graphique n'est pas uniquement l'apanage des novices. Le mathématicien Hadamard (1945) qui a étudié la psychologie de l'invention mathématique à la fois par introspection et à travers

une enquête auprès d'une centaine de mathématiciens s'est intéressé à l'apport des représentations concrètes à la pensée. Les mathématiciens interrogés ont pour la plupart déclaré penser en images. C'est la répétition et la combinaison de ces images qui selon Hadamard (1945 ; cité par Bruillard, 1997) conduit à l'abstraction unique. Le mathématicien Laborde (1995, cité par Bruillard, 1997, p. 165) qui a œuvré au logiciel Cabri (voir annexe 3) est fort éloquent sur les dessins griffonnés par les mathématiciens en théorie des graphes : *« dans le domaine de la théorie des graphes ou des ensembles ordonnés. Effectivement, il arrive très fréquemment que l'on ait recours à la réalisation de petits dessins formés essentiellement de sommets et d'arêtes, cela dans le but de les manipuler, de leur appliquer concrètement certaines transformations, ne serait-ce que pour vérifier telle ou telle propriété, confirmer ou infirmer une idée, une conjecture. L'idée est donc naturelle de vouloir élargir les possibilités d'exploration par la mise à disposition de chercheurs du domaine (et d'étudiants) d'un outil graphique où le traditionnel cahier de brouillon serait remplacé par l'écran interactif d'un terminal associé à toute la puissance de calcul et de mémorisation de l'ordinateur »*. L'interactivité des images introduite par le numérique a développé la portée didactique du graphique mais encore faut-il apprendre aux élèves à en faire bon usage.

2.3.1.4 Apprendre à lire des graphiques

Des recherches (Clements, Nemirovski & Sarama, 1995 ; Healy & Hoyles 1999 ; Schwartz & Yerushalmy, 1988) ont mis à jour les difficultés que les élèves peuvent rencontrer avec la représentation graphique. Ainsi, le fait de se focaliser sur les détails d'une figure qui a valeur d'exemple peut les conduire à de mauvaises inférences, ou encore à interpréter des aspects du dessin dans un sens qui diverge de l'intention pédagogique de l'enseignant. Yerushalmy (1991) qui s'est intéressée à la perception des fonctions chez l'étudiant a montré que la relation entre les manipulations algébriques et la représentation graphique ne s'opère pas spontanément. Battista (1999) ainsi que Yerushalmy et Chazan (1990) suggèrent de recourir à des instructions préalables afin d'aider les élèves à dépasser leurs difficultés et à structurer ce qui est pour eux un monde non structuré (Battista, 1999). Si le logiciel Geometric Supposer (Schwartz & Yerushalmy, 1988) peut aider l'utilisateur à venir à bout des difficultés dues à la représentation statique et singulière des propriétés géométriques en faisant varier de façon dynamique les figures géométriques, il n'en demeure pas moins qu'un apprentissage s'avère nécessaire pour faire bon usage des diagrammes et savoir où diriger son attention sur ces diagrammes et comment les interpréter. Noble, Nemirovsky, DiMattia et Wright (2004) ajoutent que si la représentation visuelle des phénomènes mathématiques est considérée

comme étant plus accessible et concrète que les autres formes de représentation, elle obéit néanmoins à un ensemble de règles d'interprétation qui lui est propre et avec lesquelles l'élève doit se familiariser. Stevens et Hall (1998) ont développé l'idée *« d'une perception disciplinée »* soulignant l'intérêt d'apprendre non seulement à *«voir »* un dessin donné mais aussi à *« coordonner »* le graphe et la présentation algébrique d'une même fonction.

L'analyse des interactions entre le professeur et les élèves autour d'un logiciel permet de recenser les situations où le professeur réussit ou non à diriger l'attention des élèves sur certains aspects du graphe. Stevens et Hall (ibid.) ont ainsi découvert que *«les pannes»* dans l'activité et la communication sont autant d'occasions pour discipliner la perception en amenant l'élève à reconsidérer la figure. *« Pour apprendre une discipline, on doit apprendre à voir comme un membre de cette discipline »*[53] (Noble et al. 2004, p.5). Des études (Goodwin, 1994, 1997) portant sur l'interaction entre experts et novices lors d'une situation d'apprentissage faisant intervenir un outil de représentation graphique que ce soit pour la construction d'un plan routier, l'utilisation de techniques de laboratoire chimique ou encore la fouille archéologique ont abouti à ce même constat. Noble et al. (2004) cherchent à savoir comment les élèves apprennent à lire les représentations mathématiques à la façon des mathématiciens. Leur investigation suit deux directions :

* l'émergence aspectuelle (« aspect dawning »)
* le champ des possibles.

L'émergence d'un aspect

Les auteurs se réfèrent à Wittgenstein (1953/1997) qui s'est intéressé à l'expérience visuelle et s'est interrogé sur le développement d'une technique pour apprendre à voir les objets et les représentations. Contrairement aux gestaltistes qui considèrent que l'on perçoit des unités signifiantes et que cette perception est structurée par des lois (lois de simplicité, de symétrie), Wittgenstein (ibid.) rapportait ces unités à l'expérience du sujet qui voit et à sa familiarité avec les objets. La découverte soudaine d'un aspect de l'objet comme dans le cas de cette figure ambiguë où le canard devient lapin, montre comment sous certaines conditions, le sujet peut être amené à voir quelque chose de nouveau. Wittgenstein situe cette expérience entre deux extrêmes que Noble et al. (2004) qualifient d'une part de *« seeing as »* « voir comme » et d'autre part *«not seeing as a whole »* quand le sujet n'est pas capable de voir et

[53] Traduction personnelle.

d'interpréter l'image dans son ensemble. Noble et ses associés (ibid.) avancent que ces cas sont plus fréquents qu'on ne le croit notamment quand le lecteur d'un graphe oscille entre plusieurs interprétations.

Au milieu du spectre de «l'aspect dawning», Noble et al. (ibid.) distinguent le *«recognizing-in » « reconnaître en »* qui se produit lors de la découverte de la ressemblance d'un visage avec un autre : *« Je vois qu'il n'a pas changé et pourtant je le vois différemment »* ; expérience que Wittgenstein (1953/1997) appelle «découvrir un aspect » et Casey (1987) la reconnaissance d'une ressemblance partielle.

L'élève qui observe un ensemble de lignes peut reconnaître des configurations qui lui sont familières et se trouver dans une situation similaire à celle évoquée par Wittgenstein (1953/1997). L'une des thèses développée par Noble et al. (2004) est que la perception d'une globalité visuelle inédite peut émerger de la reconnaissance d'aspects familiers et des tentatives qu'élabore l'élève pour formuler des commentaires et établir des liens entre ces aspects. Au cours du temps, cette globalité s'étend et se consolide et l'élève devient à même de voir l'image comme un objet nouveau. Cette idée forgée à partir de l'approche de Wittgenstein (1953/1997) et de la phénoménologie du souvenir de Casey (1987) ne saurait suffire à expliquer comment s'effectue cette expérience de reconnaissance. Noble et al. (2004) s'inscrivent dans la lignée de Gibson (1979) et souscrivent à la théorie écologique qui considère la vision comme un processus actif de nature exploratoire.

Le champ des possibles

Noble et al. (2004) s'intéressent cette fois à la nature de ce qui est vu et affirment que la représentation mathématique du changement en fonction du temps implique une transformation profonde de notre expérience du changement, transformation similaire à celle qui a lieu lors de la transcription d'un texte oral. Loin de n'être que pure traduction (d'une évanescence sonore en une permanence textuelle), elle est la transformation d'un phénomène temporel en un phénomène spatial mettant à jour des conformations spatiales insoupçonnées. Ces faisceaux de relations spatiales projettent de nouvelles significations et se prêtent à des interprétations inconnues. Les objets graphiques tels que les graphes et les tableaux sont appelés champ des possibles. Le terme champ a été emprunté à la physique, pour désigner un espace où s'exercent des forces dont l'intensité varie en fonction des distances et dont chaque partie reflète la structure de l'ensemble. Les possibilités ne sont autres que les items qui peuplent cet espace. Pour illustrer leur propos, Noble et al. (ibid.) reprennent l'exemple

exploité par Goody (1979) du tableau situant 10 pays européens en fonction de 17 critères. Goody (ibid.) montre comment, en assignant un item à chaque espace, le tableau amène le lecteur à anticiper de nouvelles possibilités. De même, on peut conclure que, les régions, les frontières, et les points de repère vont influencer le lecteur de graphe dans sa découverte des possibilités.

L'article de Noble et al. (2004) puise ses fondements théoriques à la fois dans la phénoménologie, la philosophie de Wittgenstein (1953/1997), l'écologie de la perception et la raison graphique de Goody (ibid.) pour penser la situation de lecture d'un graphe de représentation mathématiques. Il avance l'idée que la vision est une activité exploratoire qui repose sur des connaissances antérieures et qui nécessite un nouvel apprentissage pour tirer profit des règles de représentation. *« Ce qui compte est de savoir où regarder (avec les yeux), pointer (avec la main), dessiner (avec, les yeux, la main et la position du corps), nommer dans l'ordre et à rebours. Ces patterns de l'activité corporelle et le type de discours, sont ce en quoi consiste la vision disciplinée. »*[54] (Noble et al., 2004, p. 57).

Nous avons vu que chez le voyant la représentation graphique est un outil cognitif qui facilite l'interprétation des notions abstraites en convoquant la perception. Néanmoins, l'usage de ces dispositifs exige à son tour un apprentissage. Cette nécessité est d'autant plus forte chez les aveugles dont l'exposition aux images en relief demeure modeste.

2.3.1.5 Apport cognitif supposé du graphisme chez l'aveugle

Selon Gouzman et Kozulin (2000), chercheurs de *l'International Center for the Enhancement of Learning Potential* à Jérusalem, le sens privilégié dans l'éducation des aveugles reste l'audition et, en comparaison, la lecture tactile d'images reste limitée. L'imagerie tactile se partage entre deux extrêmes : d'une part, des notions verbales abstraites qui comportent peu de traits communs avec l'expérience de l'apprenant et d'autre part, des images tactiles concrètes d'objets quotidiens avec une faible vocation à la généralisation. Les concepts intermédiaires seraient alors sous-représentés dans le répertoire cognitif des aveugles. Faisant part d'une maîtrise insuffisante de l'imagerie tactile, outre les limitations inhérentes à cette modalité perceptive voir partie 2.3.2, les auteurs incriminent principalement l'absence de méthodes d'exploration. Ils constatent que, lors des explorations tactiles, les enfants aveugles reproduisent les patterns de lecture du braille : ils mobilisent un doigt et ce, y compris avec les

[54] Traduction personnelle.

objets tridimensionnels comme les sculptures[55]. Les aveugles manquent également de techniques d'intégration des différents éléments quand on leur demande d'identifier une image tactile en fonction de sa forme, sa taille et sa position. Si les deux premières caractéristiques sont considérées, la troisième est souvent négligée. Les réponses indiquent souvent un codage égocentrique qui se traduit aussi lors des échanges d'images entre élèves : la position des pairs n'est pas toujours prise en compte. Les feuilles sont orientées de façon erronée, les figures devenant incompréhensibles. L'absence d'entraînement pénalise également l'efficacité des déplacements lors de la manipulation des images.

Gouzman et Gozulin (ibid.) appliquent un programme conçu par Feuerstein (1980), intitulé *Instrumental Enrichment,* et, qui cherche à développer des habiletés cognitives dans des domaines comme : la perception analytique, l'orientation dans l'espace et le temps, la comparaison et la classification. Ce programme a été pendant longtemps inaccessible aux aveugles. Ils ont pu en bénéficier depuis peu grâce à l'introduction d'images tactiles. Les compétences cognitives visées sont :

1. La représentation symbolique et schématique d'objets et de processus qui ne sont appréhendés que verbalement.
2. Des stratégies d'explorations tactiles qui conduiraient à la formation d'une image mentale d'un espace structuré et différencié.
3. L'intégration des concepts et des images schématiques qui fourniraient des modèles mentaux à des fins de résolution de problèmes.
4. Le développement quasi simultané d'images de situations qui étaient antérieurement présentées successivement.

Cette étude qui souligne l'importance et la pertinence de l'emploi des images insiste également sur la nécessité d'enseigner des stratégies d'exploration. Afin d'approfondir la question de l'impact cognitif des images chez l'aveugle et des conditions de possibilités de leur usage, nous mobiliserons dans le chapitre suivant les connaissances apportées par la psychologie cognitive de la cécité.

[55] Le travail rapporté ici reste imprécis relativement à l'effectif, à l'âge et au statut visuel des sujets. Ainsi, le constat d'une stratégie exploratoire mono-digitale chez les sujets aveugles paraît surprenant.

2.3.2 Cognition spatiale et graphisme chez l'aveugle

L'étude de l'utilisation de graphiques par l'aveugle et de ses effets relève à la fois de la psychologie de la perception et de celle de la cognition spatiale. En effet, la lecture haptique se réalise dans l'espace proximal de préhension tandis que les cartes, les images constituent une représentation bidimensionnelle des objets de l'espace réel. La capacité des aveugles à interpréter ces images serait liée à leur propre appréhension de l'espace. Réciproquement, l'accès aux images pourrait à son tour favoriser les compétences spatiales. Nous avons entrepris cette revue de la psychologie cognitive afin de comprendre à quelles conditions les aveugles peuvent tirer profit des images.

Après une brève présentation du débat sur l'existence ou non d'un déficit spatial généralisé chez l'aveugle, nous considérons plus précisément les points suivants :

* Les liens entre l'espace de la préhension, l'espace de la locomotion et la lecture de cartes
* La formation d'images mentales
* La perception d'objets tridimensionnels et d'objets bidimensionnels

- ***Le rôle des sens et la genèse de la cognition spatiale chez l'aveugle***

L'étude de la cognition chez l'aveugle permet de mettre à l'épreuve des hypothèses fondamentales et d'éclairer les liens entre la perception et les habiletés cognitives (Millar, 1991). A partir d'une expérience sensible différente, partagent-ils néanmoins, les mêmes connaissances que les voyants? Or, la vision semble jouer un rôle prééminent dans l'appréhension de l'espace. Qu'en est-il alors de cette notion chez l'aveugle ? Telle est la question qui n'a cessé de se renouveler au fil des siècles et dont la réponse est venue conforter ou contester doctrines philosophiques et paradigmes de la cognition.

Comme l'explique Landau (1988), la question de la perception de l'espace chez l'aveugle a constitué un terrain d'affrontement au rationalisme et à l'empirisme. Selon les rationalistes, la nature et la forme de la connaissance ne procèdent pas de l'expérience particulière du monde. De leur côté, les sensualistes défendent l'idée que toute connaissance est façonnée par l'usage de nos sens. Les partisans des deux doctrines trouvent dans la situation des aveugles une source d'arguments. Descartes, dans son Discours de la méthode (1637), évoque l'exemple d'un homme aveugle qui explore les objets du bout de sa canne. Cet homme ramène ses

impressions tactiles séquentielles à un cadre organisé selon les principes de la géométrie euclidienne. Selon Descartes (ibid.), aveugles et voyants réalisent la même tâche d'élaboration de l'espace à partir d'une expérience partielle et fragmentaire. De la similitude de leurs connaissances finales, il déduit que les principes qui structurent la connaissance de l'espace doivent être innés et accessibles quel que soit le sens.

Chez les empiristes, la nature des connaissances est radicalement différente selon que ces dernières proviennent de la vue ou du toucher. D'après Locke (1690) un aveugle de naissance qui recouvre la vue est incapable d'identifier les objets dont il a eu auparavant une expérience tactile. Il ajoute que la représentation des propriétés visuelles comme les couleurs est incommensurable chez l'aveugle. La vision est une condition à la fois nécessaire et suffisante à la genèse de ces notions. Plus proches de nous, Senden (1932), Fraiberg (1977) et Bower (1977) considèrent que le sens de l'espace demeure étranger aux aveugles. Les observations réalisées par Senden (1932) chez des aveugles de naissance dont la vue a été restaurée l'ont amené à conclure que le monde des aveugles est avant tout déterminé par le temps. Fraiberg (1977) qui a suivi dix enfants aveugles congénitaux a observé que la cécité est à l'origine de déficits sévères dans le développement des concepts spatiaux (comme la permanence des objets) et des concepts linguistiques associés à l'espace. D'après Bower (1977), les aveugles congénitaux n'acquièrent jamais de structure spatiale pour apprécier la position relative des objets et se réfèrent à des successions temporelles.

Landau (1988) critique ce sensualisme extrême. Selon elle, aveugles et voyants partagent les mêmes idées spatiales et ces idées sont produites par un système riche et articulé de connaissances. Ce système se met en place tôt et à partir d'apprentissages naturels et informels. Les résultats de ses observations suggèrent que les aveugles de naissance et les voyants affrontent les mêmes problèmes quand il s'agit de comprendre l'espace. Elle ajoute que les enfants voyants n'ont pas toujours un avantage sur les aveugles car l'information visuelle n'est pas toujours suffisante pour guider la pensée spatiale. Cependant, Landau (ibid.) n'affirme pas une identité totale entre aveugles et voyants dans tous les aspects de la cognition spatiale. Elle n'exclut pas l'existence de spécificités dans l'usage des différentes modalités sensorielles. Etant donné que les aveugles disposent de moins d'informations sur la position des objets distaux, ils emploient des systèmes de référence égocentrés plutôt qu'externes. Ils recourent également à l'écholocation pour déterminer la taille, la distance et la matière des objets, procédé qu'ignorent les voyants.

Ces nuances apportées, Landau (ibid.) revendique une position théorique finalement peu éloignée du cartésianisme : la connaissance spatiale dépend d'une structure sous-jacente qui organise l'information obtenue quelle que soit la modalité mais qui ne dépend pas de cette information. Les principes de la cognition spatiale émergent indépendamment de l'expérience sensorielle et précocement.

Si Landau (ibid.) insiste sur la similitude développementale, la position d'Hatwell (2002) reste plus nuancée. Cette dernière rappelle la passivité du nourrisson aveugle et constate des retards dans l'espace de préhension et dans l'espace moteur des nourrissons et des enfants aveugles. Cependant, ces retards finissent par s'atténuer chez les adultes lorsque *« les procédures d'exploration s'améliorent et d'autres modes de traitement deviennent possibles »* (p.1). Elle conclut que la vision n'est pas indispensable pour arriver à une bonne représentation de l'espace.

Gaunet (2002) note que les données relatives aux effets de la cécité sur la cognition spatiale ne sont pas toujours convergentes. Ces différences peuvent s'expliquer par l'hétérogénéité de la population étudiée (aveugles de naissance, aveugles précoces, aveugles tardifs) mais découler aussi de choix théoriques. Hatwell (2002) identifie trois approches : *«la théorie de l'incapacité », « la théorie de la moindre efficacité » et « la théorie de la différence »*. Selon *« la théorie de l'incapacité »*, les aveugles ne peuvent développer de cognition spatiale, car l'espace reste le domaine d'excellence de la vision. *« La théorie de la moindre efficacité »* reconnaît des aptitudes aux aveugles dans la saisie et la manipulation d'informations spatiales mais leurs performances se heurtent aux limitations du toucher et de l'audition. *« La théorie de la différence »* avance que les capacités spatiales sont semblables et que les différences en faveur ou en défaveur des aveugles s'expliquent par un usage intensif des autres modalités ou un moindre accès aux informations.

Avant de présenter des résultats d'étude sur les capacités spatiales des aveugles, commençons par préciser comment la psychologie définit la cognition spatiale.

- ***Définition de la cognition spatiale***

Le thème de la cognition spatiale recouvre des domaines variés et potentiellement indépendants (Wolf, 1988) comme

* la préhension et la planification motrice,

* la connaissance des relations spatiales (topologiques et/ou euclidiennes) entre les objets,
* le repérage et la navigation dans l'espace physique
* la manipulation de systèmes de représentation comme les cartes et les dessins
* le développement et l'usage du langage spatial

Selon Gaunet (2002) la cognition spatiale aurait pour fonction de contribuer à l'élaboration d'un monde perceptif stable avec lequel il est possible d'interagir. Landau (1988) la définit comme un système de règles et de représentations qui permettent au sujet percevant de référer ses expériences séquentielles (visuelles ou haptiques) à une architecture unitaire. Le sujet est alors en mesure d'assembler en un tout cohérent des informations fragmentaires ou d'opérer des inférences sur la base de ces descriptions pour prédire des propriétés de l'organisation spatiale qui n'ont pas été directement perçues.

Pour Liben (1988), la notion de cognition spatiale et ses différents aspects sont sujets à des interprétations divergentes chez les psychologues. Ces divergences se situent à un niveau théorique comme à un niveau purement opératoire dans l'usage des concepts associés à la cognition spatiale. Les compétences spatiales sont à distinguer selon qu'elles désignent des connaissances relatives à l'environnement ou la maîtrise de concepts spatiaux abstraits. D'autres distinctions sont à prendre en considération comme l'espace euclidien versus l'espace non-euclidien, ou l'espace absolu versus l'espace relatif. Les confusions conceptuelles ont des implications fâcheuses dans la conduite des protocoles expérimentaux. Liben (ibid.) s'appuie sur les distinctions conceptuelles des travaux de Piaget et d'Inhelder (1956) pour dénoncer des conclusions abusives : inférer de la réussite de tâches de déplacements l'existence d'un système de connaissances spatiales et de cartes géométriques chez le jeune enfant. Elle critique plus particulièrement les travaux de Barbara Landau (1981, 1984) sur la cognition spatiale chez l'enfant aveugle. Nous reviendrons sur ce point dans la partie consacrée aux représentations des positions et des déplacements chez l'aveugle.

En revanche selon Pick (1988), il semble illusoire d'établir une démarcation entre la perception et les processus cognitifs tels que la mémoire ou les représentations. Les deux fonctions sont intrinsèquement liées. L'exemple d'une personne qui cherche à s'orienter évoque suffisamment cette interdépendance. Gibson (1979) occupe à ce propos une position des plus radicales, puisque le fait de trouver son chemin ne fait, à son sens, nullement appel à

des cartes mentales et relève de l'activité perceptive ; la perception donne directement prise à l'espace.

Considérons à présent comment les compétences spatiales des aveugles sont abordées et mises en évidences par les études psychologiques.

2.3.2.1 Perception directe et médiatisée de l'espace proximal et distal

- ***Modalité haptique et représentation des positions d'objets et des points de vue dans l'espace de préhension***

Lors de la localisation d'objets, les aveugles privilégient un référentiel égocentré à la recherche active de repères dans l'environnement augurant d'une localisation exocentrée. Deux études de Millar (1975a, 1985) mettent à jour la prédominance du codage kinesthésique. Contrairement aux voyants, les aveugles précoces éprouvent des difficultés lors du rappel rétrograde (parcours énoncé en sens inverse) des balises spatiales disposées dans l'espace de préhension. Les voyants seraient favorisés car ils relieraient leurs percepts à un système de référence exocentré. Millar (1985) étudie chez un groupe d'aveugles précoces le type de codage (euclidien versus kinesthésique) mobilisé dans la perception des mouvements de leurs bras. Les sujets, âgés de sept à 12 ans, suivent avec un stylet un rail en allant d'une extrémité à l'autre. Une fois le rail retiré, les sujets doivent retrouver le point d'arrivée en partant du même point de départ (même mouvement) ou en partant d'un autre point (changement de mouvement). Les mouvements effectués suivent trois orientations : horizontale, verticale ou oblique. Chez les plus jeunes, dont le taux d'erreurs est important, les performances sont équivalentes quelle que soit la direction et quel que soit le point de départ. Les plus âgés commettent plus d'erreurs lorsque le mouvement est modifié et lorsque sa direction est oblique. Selon Millar (ibid.), ce surcroît d'erreurs découlerait de la mise en place d'un codage spatial euclidien, tandis que les plus jeunes recourent davantage au codage kinesthésique.

Lederman, Klatzky et Barber (1985) ont examiné les effets du codage kinesthésique sur l'inférence des distances. Les erreurs dans l'estimation de la distance euclidienne (le plus court chemin entre deux points) d'un chemin sinueux augmentent corrélativement avec la longueur des détours. La surestimation des distances est nettement plus prononcée chez les aveugles précoces que chez les aveugles tardifs ou les voyants travaillant sans voir. Les aveugles précoces développent une représentation de type chemin ou « route ». En revanche, la longueur du détour n'affecte pas l'évaluation de la direction de la ligne euclidienne qui

contient le point d'arrivée (Lederman & al., ibid.). Dans ce deuxième type de tâche, la proprioception serait minimisée au profit du codage dans un cadre de référence exocentré.

On peut se demander alors si les aveugles qui privilégient un codage égocentré réussissent à se représenter le point de vue d'autrui. Piaget et Inhelder (1947) ont nommé *« coordination des points de vue »* une tâche où l'enfant doit se figurer le point de vue d'un autre observateur. Une poupée est déplacée autour d'une table où sont disposés des objets. Il est demandé à l'enfant de choisir entre plusieurs images celle qui correspond au nouveau point de vue de la poupée. Le point de vue « haptique » procède du même principe : il s'agit de se figurer la position relative des objets telle qu'elle apparaît à un autre observateur. Miletic (1995 ; cité par Hatwell, 2003) a proposé une tâche équivalente à des sujets aveugles congénitaux, malvoyants et voyants, ces deux derniers groupes travaillant avec la vue (âge moyen de huit ans et sept mois). Les sujets devaient imaginer le point de vue d'une poupée sur un objet géométrique présentant des faces différentes. Chez les aveugles de naissance, les performances s'effondrent dès que l'on déplace la poupée. Les performances des voyants sont supérieures à celles des deux autres groupes. Enfin, les malvoyants obtiennent des résultats nettement supérieurs à ceux des aveugles. Les enfants aveugles précoces éprouvent plus de difficultés à se représenter le point de vue d'autrui.

Chez l'adulte, lors d'une tâche analogue de pointage après changement de point de vue, les aveugles précoces (cinq sujets) obtiennent de moindres performances que les voyants (six sujets) travaillant sans voir (Hollins & Kelley, 1988 ; cités par Hatwell, 2003). Les sujets explorent la position de cinq objets sur une plate-forme circulaire et s'exercent à désigner leur direction en utilisant un petit cadran semi-circulaire sur lequel une aiguille sert de pointeur. Dans la première condition expérimentale, le cadran-pointeur est pivoté de 90° par rapport à sa position originale. Les sujets pointent alors les objets à partir de ce nouveau point de vue. Dans la deuxième condition, le sujet doit reproduire la position des objets telle qu'elle apparaît à partir du nouvel emplacement. Dans la première condition, les aveugles commettent beaucoup plus d'erreurs que les voyants. Cet écart se comble quand les aveugles reproduisent le nouveau point de vue en déplaçant les objets. *« La compétence cognitive des aveugles ne s'extériorise donc que si le mode de réponse est actif (reconstruction) et permet de se référer aux bords de la table »* (Hatwell, 2003, p. 132).

Le thème de la représentation des points de vue différents d'un même objet a été approfondi par les études consacrées à la compréhension de la perspective. Heller et Kennedy (1990)

précisent que la prise de perspective fait référence à l'aptitude à comprendre un point de vue différent et n'implique pas nécessairement la perspective linéaire. Les auteurs présentent à des sujets adultes aveugles précoces, aveugles tardifs et voyants travaillant sans voir trois objets géométriques : un cube, un cône et une sphère. Le sujet doit ensuite dessiner à l'aide du kit de production tactile de la Fondation Suédoise pour Aveugles (présenté dans la partie 2.1.1.2) les objets tels qu'ils apparaissent selon différents points d'observation (vus d'en haut, vus de face). La tâche inverse leur est proposée : on leur montre différents dessins dont ils doivent déterminer la prise de vue. L'effet de l'expérience visuelle s'est révélé non significatif dans les deux types de tâches. Ces résultats suggèrent que les aveugles sont en mesure de comprendre et de représenter le point de vue d'une autre personne. L'expérience visuelle ne semble pas indispensable à la compréhension de la perspective. Ceci ne remet pas pour autant en cause les bénéfices de la vision. En effet, le temps nécessaire à l'accomplissement de la tâche de dessin fut beaucoup plus long chez les aveugles de naissance (84mn en moyenne) que chez les aveugles tardifs (41mn en moyenne) et les voyants (39mn en moyenne). Les sujets qui ont participé à cette étude étaient peu familiers avec le graphisme ; *« il est difficile de prédire à quel point ils auraient été performants s'ils avaient eu une expérience plus longue du dessin »*[56] (Heller & Kennedy, ibid., p. 465)

Au cours d'une autre étude, Heller, Calcaterra, Tyler et Burson (1996b) ont étudié à nouveau la production et l'interprétation de dessins en perspective en examinant cette fois la perspective géométrique. Les sujets doivent représenter graphiquement une planche rectangulaire telle qu'elle apparaît visuellement à une personne située en face. Cette planche est pivotée dans l'espace selon cinq angles de rotation (0° planche à l'horizontal, -22,5°, -45°, -67,5° et –90° planche à la vertical°). Les aveugles de naissance ont spontanément dessiné un rectangle, leurs dessins ne reflétaient pas de rétrécissement. Néanmoins, ils semblaient en mesure de comprendre les règles de la perspective puisque leurs performances étaient similaires à celle des deux autres groupes dans un questionnaire à choix multiple sur l'apparence prise par la planche selon ses inclinaisons. Heller et ses collègues (ibid.) expliquent que la prise en compte de ces résultats peut s'avérer pertinente dans la conception d'aides spécifiques. Ainsi les images tangibles qui font usage de la perspective nécessitent des explications ou des indices verbaux. Leur compréhension s'est forgée à la faveur d'expositions répétées aux images en perspective. Les concepteurs et les évaluateurs d'aides sensorielles ne doivent pas prêter à l'aveugle des aptitudes innées dans l'interprétation des

[56] Traduction personnelle.

différents points de vue. Heller, Kennedy et Joyner (1995) introduisent la notion de perspective linéaire à travers un protocole de production et d'interprétation de dessins de maisons. Trois groupes de 10 sujets (aveugles de naissance, aveugles tardifs et voyants travaillant sans voir) explorent manuellement le modèle en volume d'une maison puis la dessinent à l'aide d'un kit de traçage tactile. Ensuite, différentes images en relief représentant des maisons leurs sont présentées. Les sujets doivent dire s'il s'agit du même modèle que le modèle en volume exploré auparavant et, dans l'affirmative, en restituer le point de vue. Les voyants et les aveugles tardifs ont eu des résultats significativement meilleurs que les aveugles congénitaux. Les performances générales ont été faibles pour les vues de ¾. Les aveugles de naissance ont été particulièrement pénalisés par les dessins représentant la maison vue de haut. Une étude contrôle avec des voyants aveuglés révèle que lorsque des informations sont fournies au préalable sur les différentes vues possibles (de face, d'en haut, de ¾), les performances augmentent de façon notable. Les auteurs encouragent d'autres recherches sur les vues de ¾ afin de pouvoir développer des aides sensorielles et des graphiques tangibles. Dans son ouvrage *« Psychologie cognitive de la cécité précoce »*, Hatwell (2003) conclut sa section consacrée à la perspective en proposant un principe de présentation d'images en perspective. Les objets tridimensionnels compliqués doivent être représentés en façade ou en coupe. Le matériel pédagogique de la Cité des Sciences et de l'Industrie destiné aux aveugles reprend ce principe et offre ainsi différentes projections orthogonales d'objets tels que les monuments ou le corps humain.

Dans cette partie consacrée à l'espace de préhension, nous avons vu qu'une des investigations majeures des chercheurs porte sur le type de référentiel mobilisé par les aveugles : égocentré versus exocentré. Une question équivalente se pose à l'échelle des déplacements. Quel est le type de codage privilégié par les aveugles : la connaissance prend elle la forme d'une « route[57] » ou d'une « carte cognitive[58] ».

Par ailleurs, le passage de l'espace de préhension à l'espace de la locomotion suppose la maîtrise de la corrélation entre les actions motrices et la perception des relations distales (Rieser, Ashmead, Taylor & Youngquist, 1990). Cette stabilisation facilitée par les changements du flux visuel se met en place moins aisément chez l'aveugle qui, pour naviguer

[57] *«Une séquence spatio-temporelle de segments droits et de tournants menant d'un point à l'autre » (Hatwell, 2003, p. 135)*

[58] *« Une sorte de représentation aérienne euclidienne qui rend possible les inférences spatiales et donc les raccourcis et les nouveaux chemins »* (ibid., p.135.)

dans l'espace, exploite la proprioception, le toucher et l'audition (l'olfaction reste très peu étudiée). Nous verrons si chez l'aveugle la lecture de cartes facilitent ce passage entre espace de préhension et espace de la locomotion.

- ***Inférences spatiales lors de la locomotion***

L'espace de la locomotion et représentation spatiale chez l'enfant

Landau, Spelke et Gleitman (1984) ont mis en évidence l'existence d'inférences spatiales chez la petite Kelli, une aveugle congénitale alors âgée de deux ans. Dans une pièce rectangulaire de huit mètres sur dix, trois objets sont placés chacun contre un mur. Au niveau du quatrième mur se trouve la maman de Kelli. On apprend à Kelli à effectuer dans les deux sens le chemin entre sa maman et chacun des trois objets. Dans un deuxième temps, on demande à l'enfant de naviguer directement entre les trois objets et ses performances sont significativement supérieures au hasard. D'après Landau (1988), cette expérience suggère que le jeune enfant est en mesure de construire une représentation spatiale à partir des déplacements séquentiels et d'utiliser cette représentation pour déterminer des propriétés de l'organisation spatiale qu'il n'a pas perçues directement.

Comme nous l'avons déjà signalé, la méthodologie des travaux de Landau et ses collègues a été critiquée par Liben (1988). Selon cette dernière, la réalisation de la tâche ne permet pas d'inférer pour autant que Kelli est guidée par des connaissances euclidiennes telles que les relations angulaires. Morrongiello, Timmey, Humphrey, Anderson et Skory (1995) se sont inspirés de cette situation en contrôlant davantage de paramètres. Ainsi, ils ont ajouté une condition avec un indice sonore assuré par la présence d'un métronome. Les sujets sont six aveugles précoces (deux de 4-5ans, deux de 6-7ans et deux de 8-9ans) et 36 voyants (appartenant aux mêmes tranches d'âge). La mesure des écarts entre la position finale et la cible indique que les aveugles font beaucoup plus d'erreurs que les voyants mais les erreurs diminuent dans la condition avec métronome. En outre, les performances s'améliorent avec l'âge.

Ochaitas et Huertas (1993 ; cités par Hatwell, 2003) constatent également un effet de l'âge très prononcé dans l'apprentissage d'un chemin chez des aveugles précoces et tardifs de 9, 12, 14 et 17 ans. Après avoir étudié un chemin comportant sept repères, les sujets doivent évaluer des distances entre repères et reproduire le chemin et ses repères sur une maquette. Les performances augmentent nettement entre 12 et 14 ans ainsi qu'à 17 ans. Aveugles précoces

et aveugles tardifs ont des performances similaires. Hatwell (ibid., p.137) suggère alors que *« les capacités cognitives formelles qui émergent à l'adolescence semblent donc aider les jeunes aveugles à surmonter leurs difficultés à se représenter l'espace environnant ».*

Examinons à présent si, arrivés à l'âge adulte, les aveugles finissent par obtenir des résultats similaires à ceux des voyants dans des tâches de représentation spatiale de l'espace de la locomotion.

Locomotion et représentation spatiale chez l'adulte

Comme nous l'avons souligné au début de la partie 2.3.2, les résultats de la littérature ne sont pas toujours concordants quant aux effets de la cécité sur ce type de tâches. Si certaines études n'observent pas de différences entre voyants et aveugles, d'autres relèvent de significatifs écarts au profit des voyants.

Ainsi, Rieser, Lockman et Pick (1980) ont demandé à des voyants et des aveugles d'évaluer les distances entre différents équipements d'une institution dans laquelle ils résident. Le sujet doit indiquer parmi trois lieux les deux qui sont les plus proches et ceux qui sont les plus éloignés sur la base de deux estimations: d'après les longueurs du parcours entre deux points et selon la distance en ligne droite (ou encore « à vol d'oiseau ») qui sépare ces deux points. L'évaluation du déplacement ne donne lieu à aucune différence entre les sujets. En revanche, les distances en ligne droite sont mieux appréhendées par les voyants puis les aveugles tardifs, les aveugles précoces réalisant les performances les plus faibles. On peut donc en déduire qu'une représentation de type route semble plus accessible à l'aveugle que l'élaboration d'une carte cognitive.

Ceci peut être rapproché de l'expérience de Klatzky, Colledge, Loomis, Cicinelli, Pellegrino (1995) qui ont fait passé des épreuves spatiales des aveugles précoces et tardifs et à des voyants aveuglés. Ils ont observé que les tâches impliquant des inférences spatiales induisaient plus d'erreurs chez les aveugles précoces comparés aux deux autres populations. Ils n'ont pas constaté pour autant de déficit spatial généralisé.

Il semble donc que, faute de données externes, les aveugles privilégient le codage égocentré qui donne lieu à des représentations de type route, moins propices aux inférences spatiales. Nous allons voir à présent dans quelle mesure la lecture de cartes peut pallier ce déficit en information.

- ***La lecture de cartes***

La lecture de cartes requière des compétences perceptives et cognitives. Il s'agit d'une part d'appréhender l'organisation globale, de discriminer, d'évaluer les distances représentées et d'autre part de pouvoir comprendre que l'espace bi-dimensionnel de la carte correspond à une projection simplifiée et codée d'un espace réel. Ainsi deux aspects intéressent particulièrement les spécialistes du domaine : le choix des informations appropriées aux cartes tactiles et la capacité des aveugles à exploiter ce type de représentation.

Les informations nécessaires à la lecture de carte

Jansson (2000) distingue deux types de cartes : les cartes géographiques et les cartes d'orientation (ou plans). Si les cartes géographiques pour voyants et aveugles exigent à peu près le même contenu pédagogique, les plans doivent satisfaire des besoins spécifiques. Des études (Brambing, 1985 ; Passini & Proulx, 1988 ; Edwards, Ungar & Blades, 1998) révèlent que les descriptions verbales de chemins sont plus détaillées chez les aveugles et portent notamment sur les mouvements à effectuer (distances à parcourir, rotations). Pour faciliter la navigation de l'aveugle, les cartes tactiles nécessitent des commentaires.

Etant donné la moindre résolution spatiale du toucher et les difficultés à élaborer une représentation globale à l'aide de cette modalité compte tenu de la séquentialité de l'exploration, il est préférable que l'information graphique soit beaucoup moins dense que dans les cartes pour voyants. Ces deux contraintes majeures s'imposent aussi bien aux cartes géographiques qu'aux cartes d'orientation.

Jansson (2000) considère trois solutions afin de pallier les limites du toucher dans la construction d'une représentation globale :

1. Des commentaires pour décrire le contenu et également donner des instructions de lecture : commencer au coin supérieur gauche puis suivre le contour oblique, etc.

2. Aider à discerner la figure du fond en faisant varier par exemple la hauteur des symboles

3. Utiliser des mouvements exploratoires efficaces. Pour une « vue générale », la stratégie la plus appropriée consiste à ramener les mains vers soi (Berlà, 1984). Par ailleurs, l'importance d'enseigner des méthodes de lecture a été soulignée par James (1982 ; cités par Jansson, 2000), ces méthodes sont à adapter selon l'âge et les diverses aptitudes cognitives.

On peut s'appuyer sur les capacités particulières du toucher pour offrir des symboles faciles à discriminer. Le toucher est particulièrement performant dans la perception des textures. Celles-ci peuvent alors se substituer aux couleurs (le nombre de possibilités est plus limité car les capacités tactiles sont loin de concurrencer la finesse discriminative de la vision des couleurs). La sensibilité des récepteurs tactiles aux stimuli temporels peut être exploitée par des variations dans le relief. Schiff, Kaufer et Mosak (1966) ont proposé l'idée de flèches tactiles. Selon la direction du mouvement, la ligne sera perçue comme douce ou rugueuse, indiquant ainsi la direction à suivre. Dans la recherche de symboles adéquats, des tentatives de standardisation ont été entreprises dans différents pays (Belgique, Royaume Uni, Etats Unis, Allemagne, pays scandinaves) et se sont soldées par des succès variables. Au problème de la standardisation des symboles s'ajoute celui des méthodes de production d'images en relief. Un même codage génèrera des effets perceptifs différents selon la technique utilisée. Enfin, le choix du symbole doit tenir compte de propriétés matérielles du support.

L'utilisation des cartes par les aveugles

L'utilisation d'une carte mobilise diverses compétences spatiales : repérage de sa position dans l'espace bi-dimensionnel et recherche du point à atteindre, choix d'un parcours pertinent, mémorisation des distances et des changements de direction qui caractérisent le chemin, reconnaissance de ces éléments dans l'environnement. D'après des études récentes, ces compétences se manifesteraient déjà chez l'enfant voyant de 5-6 ans quand la carte est simple, qu'elle contient des repères visibles et est alignée (le haut de la carte correspond à droit devant) (Hatwell, 2003). Selon Landau (1986), la capacité à se servir d'une carte s'observe chez l'enfant aveugle de quatre ans. Une carte simple comportant deux objets (l'un représente la position de sa maman et l'autre celle de l'objet cible) est montrée à Kelli. Les performances, réalisées au cours des 12 essais, sont supérieures au hasard. Lors de nouvelles expériences, on tend à Kelli des cartes ayant subi des transformations spatiales (translation horizontale, rotation à 90° et 180°). La tâche est réussie dans des proportions significatives. Landau (1988) en déduit que les enfants n'ont pas besoin d'apprentissage particulier pour pouvoir interpréter les cartes. Il faut néanmoins signaler que l'auteur généralise ses résultats à partir d'un cas unique.

Les travaux de Ungar, Blades et Spencer (1996, 1997) n'aboutissent pas aux mêmes conclusions. Les enfants de 6-8 ans aveugles et malvoyants arrivent à situer leur position sur une carte mais avec de moindres performances que les voyants. De même, l'évaluation de

distances réelles à partir d'une carte est moins précise chez les aveugles que chez les voyants. On note toutefois une amélioration au cours du développement : le taux d'erreurs des aveugles les plus jeunes (5-6 ans) s'élève à 69% contre 33,5% chez les 8-11 ans. Ungar, Blades, Spencer et Morley (1994) ont également étudié l'effet de l'utilisation d'une carte dans l'évaluation des directions chez des aveugles complets et des aveugles présentant des restes visuels. Le protocole s'inspire de la tâche des inférences des directions de Landau (à partir d'un même point de départ l'enfant est conduit vers différents objets situés dans une pièce puis conduit vers un objet à partir duquel il doit pointer en direction des autres). Quatre conditions sont distinguées :

1. Exploration réelle
2. Carte : l'enfant pointe les objets d'après leur position sur la carte à partir des différentes localisations des objets
3. Lecture de la carte puis exploration
4. Exploration puis lecture de la carte

Toutes populations confondues, les performances des 5-7 ans ont été très faibles. Chez les 8-12 ans, les aveugles avec des restes visuels commettent moins d'erreurs (en degrés) que les aveugles complets en particulier dans les conditions 1 et 3. Les erreurs moyennes sont de 84° dans la condition 1 contre 39° dans la condition 2. Les performances sont proches dans les conditions 2, 3 et 4 (autour de 40°). Il semblerait que chez les jeunes aveugles complets la manipulation de carte facilite les inférences spatiales.

Par ailleurs, Espinosa et Ochaitas (1998 ; cités par Hatwell, 2003) ont constaté que, dans l'apprentissage d'un parcours dans une ville par des adultes aveugles, l'emploi d'une carte donne de meilleurs résultats que l'exploration réelle. Dans une autre étude, Espinosa, Ungar, Ochaitas, Blades et Spencer (1998) ont comparé trois conditions d'apprentissage d'un parcours urbain de 2,05 kilomètres, situé au centre de Madrid et comportant huit balises (de nature tactile, auditive et olfactive). Les 30 sujets découvrent au préalable le parcours avec l'expérimentateur. Dans la première condition, ils refont le parcours seul (l'expérimentateur est néanmoins présent). Dans la deuxième, ils sont équipés d'une carte. Et dans la troisième, l'expérimentateur décrit verbalement le parcours. Les distances parcourues en dehors du chemin sont inférieures lorsque les sujets sont équipés d'une carte (50 mètres contre 275 et 462 mètres dans les conditions 1 et 3), les directions sont mieux estimées (l'erreur moyenne est de 41° contre 52° et 55° en conditions 1 et 3). Enfin, la qualité des raccourcie est

supérieure dans la condition avec carte : 2,2 (sur une échelle de 4) contre 1,2 et 0,8 lors des conditions 1 et 3. Cependant, lors d'une autre situation expérimentale, Espinosa et al. (ibid.) ne constatent pas de différences entre les conditions d'apprentissage avec et sans cartes. Dix sujets aveugles et très malvoyants participent à l'étude, qui a lieu en Angleterre, dans la région de Sheffield. Dans la première condition, le parcours (1,2 kilomètre) est montré à l'aide d'une carte tactile (l'expérimentateur guide le doigt du sujet), le sujet le reproduit ensuite dans l'espace réel. Dans la condition contrôle, le parcours est indiqué mais sans carte. De ces deux expériences, il ressort que la carte améliore les performances uniquement lorsqu'elle est associée au parcours réel.

Ces études nous enseignent que, dans certaines conditions, les aveugles peuvent tirer profit des cartes. On peut se demander si l'impact cognitif des cartes est lié à la formation d'une image mentale. La question des images mentales chez l'aveugle et de leurs spécificités a été explicitement posée dans la littérature. Il s'agissait plus particulièrement de déterminer si les aveugles recourent spontanément à des images mentales pour se représenter la rotation des objets ou différents points de vue sur un objet. L'étude de l'imagerie chez l'aveugle poursuit une double finalité : déterminer si la vue est indispensable à son élaboration et réfléchir à son implication dans l'éducation des aveugles (Cornoldi & Vecchi, 2000).

2.3.2.2 La formation d'images mentales

Dans les années 1970 et 1980, les partisans du paradigme computationnel, comme Pylyshyn (1973), ont soutenu que l'imagerie mentale est le résultat d'un codage propositionnel abstrait et indépendant des entrées perceptives et que, par conséquent, elle ne saurait être affectée par la cécité. En revanche, pour Paivo (1986) et Kosslyn (1990), les images mentales dérivent de nos perceptions avec lesquelles elles présentent une analogie. Toujours selon Paivo (1986), les aveugles seraient, en principe, capables de former des images mentales par l'entremise d'autres modalités sensorielles, en l'occurrence le toucher et l'audition. Hatwell (2003) et Cornoldi et Vecchi (2000) se départissent à la fois du point de vue propositionnel et d'une position analogique extrême qui conduirait à conclure à l'absence d'image chez l'aveugle précoce ; *« il est possible que les images soient spécifiques mais non parfaitement analogiques » (*p. 176).

Afin d'étudier la formation d'images mentales chez l'aveugle, les chercheurs en psychologie utilisent principalement deux types de tâche : la mémorisation d'une liste de mots et les rotations spatiales.

- ***Imagerie mentale et tâche de mémorisation***

Partant du principe que certains mots activent plus une image visuelle et d'autres une image auditive, Paivo et Okavité (1971) ont mesuré l'effet de la connotation perceptive des mots sur leur mémorisation chez des sujets aveugles et chez des sujets voyants. Les auteurs ont constaté que les aveugles retiennent moins de mots à imagerie visuelle que de mots à imagerie auditive et que le phénomène inverse s'observe chez les voyants. En revanche, il ne semble pas exister de différence entre voyants et aveugles quant au nombre de mots à imagerie visuelle retenue. Dans les études de Hans (1974), Kerr (1983) et Zimler et Keenan (1983), les aveugles réalisent de meilleures performances avec les mots à imagerie visuelle qu'avec les mots à imagerie auditive. Enfin, les mots qui désignent des objets qui ne peuvent être touchés ne sont pas mieux retenus par les voyants que par les aveugles (Hatwell, 2003). Le fait d'utiliser une image mentale lors de la mémorisation d'une liste composée de mots abstraits à faible imagerie et de mots concrets à forte imagerie facilite aussi bien la tâche chez les voyants que chez les aveugles et ce, quelle que soit la valeur de l'imagerie (Jonides, Kahn & Rozin, 1975). Cornoldi et ses collègues (Cornoldi, Calore & Pra Badi, 1979 ; De Beni & Cornoldi, 1985 ; De Beni & Cornoldi, 1988 ; Cornoldi, De Beni, Roncari & Romano, 1989) ont également mené un ensemble de recherches sur le rôle de l'imagerie dans la mémoire. Dans leurs protocoles (Cornoldi, Calore & Pra Badi, 1979 ; De Beni & Cornoldi, 1988) distinguent les objets à haute imagerie visuelle, perceptibles tactilement par l'aveugle, les mots abstraits et enfin les mots à haute imagerie visuelle mais non liés à une expérience comme par exemple le volcan. Les aveugles ont éprouvé plus de difficulté avec cette dernière catégorie de mots, *« mais celles-ci sont moindres que ce qu'on pourrait imaginer si on considère leur expérience limitée […] il n'est pas exclu que les mots concrets offrent la possibilité de créer des images par analogie, construction, etc., même aux personnes qui n'ont pas eu une expérience concrète. Par exemple, un volcan peut être imaginé par analogie et assimilation à l'expérience d'une montagne, du toucher des reliefs, du contact avec le feu, en organisant ces éléments et tout autre information verbale reçue sur ce sujet. Le fait que les voyants élaborent souvent, eux aussi, les images d'objets qu'ils n'ont jamais vus (le Paradis, le colosse de Rhodes, etc.) en est une confirmation »* (Cornoldi & Vecchi, 2000, p. 180). De Beni et Cornoldi (1985 ; cités par Cornoldi & Vecci, 2000) ont également étudié l'incidence *« d'images interactives »,* sur la mémorisation. Ces images sont formées *« à partir de chacun des éléments du matériel mnésique ou à partir des éléments intégrés »* (ibid., p.180). Il est demandé aux sujets *d'utiliser la mnémotechnique des « loci » (utilisation de places mentales*

représentées le long d'un parcours bien connu) pour mémoriser une liste de 20 mots » (ibid., p. 180). Cette technique a plus avantagé les aveugles que les stratégies de répétition verbale. Mais elle rencontre des limites avec les images interactives complexes à valeur visuelle. Lorsque l'imagerie est auditive, les aveugles s'acquittent mieux des tâches de mémorisation d'information complexe (Tinti, Galati, Vecchi, De Beni & Cornoldi, 1999).

A la suite de ces travaux, on pourrait émettre l'hypothèse que les maquettes ou les représentations bidimensionnelles d'objets contribuent à en augmenter la valeur d'imagerie perceptive et de ce fait, favoriser les mécanismes de mémorisation qui lui sont associés.

- ***Imagerie mentale et rotations spatiales***

Les classiques épreuves spatiales conçues par Shepard et Metzler (1971) consistent pour les sujets à déterminer si deux images d'un objet tridimensionnel correspondent à un même objet orienté différemment ou si elles sont en miroir. Marmor et Zaback (1976) ainsi que Carpenter et Eisenberg (1978) ont adapté ce célèbre protocole à des sujets aveugles en utilisant des images tactiles (des images simplifiées du test original et des lettres pivotées). Les deux études montrent un phénomène analogue à ce qui se produit avec la vision : la même relation entre le temps de réaction et l'angle de rotation de l'objet. Marmor et Zaback (1976) constatent des temps de réaction plus lents et plus d'erreurs chez les aveugles précoces que chez les voyants et les aveugles tardifs. D'après Carpenter et Eisenberg (1978), une exposition accrue aux images tactiles améliorerait les performances des aveugles.

Millar a comparé les performances de jeunes aveugles et de voyants aveuglés (âgés de 7 à 11 ans) dans des tâches simples de rotation mentale. Le taux de réussite des aveugles est inférieur à celui des voyants. Millar impute les erreurs des jeunes aveugles au codage égocentré des configurations spatiales et ajoute que ces derniers devraient être encouragés à mobiliser des systèmes de référence plus complexes et flexibles. Ungar, Blades et Spencer (1995) prolongent cet argument et s'interrogent sur le lien entre les stratégies d'exploration et les performances dans les tâches de rotation mentale. Les auteurs font mention des nombreux travaux de Berlà (1972, 1973, 1981, 1982 ; Berlà & Butterfield, 1977) sur les stratégies exploratoires d'images en relief notamment dans la lecture de cartes. Cependant, les stratégies exploratoires impliquées dans des tâches de rotation mentale sont rarement décrites (Ungar et al., 1995). Winn (1991) a identifié deux types de relations qui servent à définir le positionnement tactile des objets : la position de chaque élément par rapport aux bords du

support et la position d'un élément relative aux autres. Ungar, Blades et Spencer (1995) partent de l'hypothèse qu'une stratégie efficace fait usage de ces deux types de relation. Les auteurs ont fait participer à leur étude 14 aveugles congénitaux et 15 malvoyants répartis en deux classes d'âge : 18 enfants de 10 ans et 2 mois d'âge moyen et 11 de 6 ans et neuf mois d'âge moyen. Les sujets devaient explorer tactilement ou visuellement (les malvoyants pouvaient se servir de leur vision) un dispositif composé de une, trois ou cinq formes puis en reproduire la configuration dans deux conditions : en conservant leur position initiale face au support (condition alignée) et après s'être déplacé d'un quart de tour (condition pivotée selon 90°).

Les résultats montrent une diminution de la précision dans la condition pivotée. Les performances diminuent corrélativement au nombre de formes. Aucune différence significative n'est observée concernant la classe d'âge ou le statut visuel.

Cinq types de stratégies (émergeant spontanément chez l'enfant) ont été distingués par les auteurs :

1. Contour et position relative : les enfants utilisent à la fois leurs doigts et la paume de la main pour positionner les objets dans un cadre de référence et les situer les uns par rapport aux autres. Les doigts se déplacent d'une forme à l'autre et des formes au contour.

2. Position relative : les enfants utilisent leurs doigts et leurs paumes pour saisir la façon dont les formes se positionnent les unes par rapport aux autres sans toutefois essayer de les situer dans un cadre de référence externe représenté par le contour du support.

3. Contour : les enfants utilisent les doigts pour situer chaque forme en référence au contour sans prêter attention aux distances entre formes. Ils mesurent l'espace qui sépare la forme du contour en interposant leurs doigts ou alors par des mouvement saccadés censés simuler une unité de mesure.

4. Pointage : les enfants touchent et pointent chaque forme de façon répétée, ce qui semble une tentative de mémorisation des formes selon un système de référence égocentré.

5. Vision : les enfants n'utilisent pas leurs mains, ils se servent de leurs résidus visuels.

Les enfants qui ont utilisé la stratégie 1 ont des résultats significativement plus précis que ceux qui ont utilisé les stratégies 3 et 4. La stratégie 2 permet d'obtenir des performances significativement meilleures que la stratégie 4. En conclusion, Ungar et al. (ibid.) insistent à nouveau sur l'importance d'enseigner aux enfants des stratégies de lecture. Le support bidimensionnel tactile devrait occuper un rôle croissant dans l'éducation des jeunes aveugles.

Néanmoins, il n'existe pas de recommandations sur la façon d'apprendre aux enfants à tirer profit de ces dispositifs. Encourager l'enfant à la prise de repères absolus et relatifs peut se révéler pertinent dans bien des contextes éducatifs notamment lors de la lecture de cartes tactiles qui requiert la construction d'un système de référence à la fois souple et extensif.

De même que les études en didactique des mathématiques graphique chez le voyant soulignaient la nécessité de discipliner la perception pour un bon usage du graphique, nous constatons que les études réalisées chez les aveugles aboutissent à des conclusions similaires. Ainsi, dans la partie suivante nous nous intéresserons à la fois aux performances dans la perception haptique des objets tri et bidimensionnels et à l'identification de stratégies efficientes.

2.3.3 Stratégies d'exploration haptique et reconnaissance de formes

Dans cette partie nous ferons mention des explorations d'objets tridimensionnels[59] et de la lecture d'images d'objets courants ou encore des représentations de la perspective. En outre, parmi les principes de conception que l'on peut dégager de ces études certains sont suffisamment génériques pour s'appliquer aussi bien à des situations de lecture de formes bidimensionnelles que tridimensionnelles.

2.3.3.1 L'exploration d'objets tridimensionnels

- ***Procédures d'exploration et propriétés des objets***

Lederman et Klatzky (1987) ont relevé six principales procédures d'exploration en demandant systématiquement à des adultes de classer des objets en fonction d'un critère.

1. le frottement latéral pour la texture
2. la pression pour la dureté
3. le contact statique pour la température
4. le soulèvement pour le poids

[59] Bien que le projet Tactos qui constitue le cœur de ce travail de thèse concerne en priorité la lecture de formes géométriques bidimensionnelles, son usage à plus long terme ne se limitera pas aux formes planes et aux figures géométriques.

5. l'enveloppement pour la forme globale et le volume
6. le suivi des contours pour la forme globale et la forme exacte.

Certaines procédures sont particulièrement spécialisées comme le frottement latéral, le soulèvement et la pression puisqu'elles captent une seule propriété. Le contact statique est optimal pour la température et, dans une moindre mesure, il donne des informations sur la forme, la taille, la texture et la dureté. Le suivi des contours pertinent dans le codage de la forme permet de prélever des données relatives à la texture et à la dureté. Ces procédures (Lederman et Klatzky, 1993) se déploient en deux temps. D'abord s'expriment des procédures non spécialisées qui impliquent l'ensemble de la main (par exemple l'enveloppement global). Les procédures spécialisées (le frottement latéral, le soulèvement, la pression) apparaissent dans un deuxième temps. Kennedy, Gabias et Nicholls (1991) considèrent cependant que les catégories de Lederman et Klatzky ne couvrent pas l'ensemble des modes avec lesquels le toucher opère. Ils contestent également la dichotomie établie entre l'aspect séquentiel du toucher et l'appréhension globale de la vision. Si la vision permet d'envisager un ensemble d'objets plus rapidement que le toucher, il n'en demeure pas moins que ce processus prend du temps et qu'une seule vue ne suffit pas pour explorer entièrement la scène. L'impression que la vision offre une vue détaillée et non obstruée est le résultat de plusieurs regards et la plupart de ces regards, mis à part les 2° de vision centrale sont flous ou hors champ. Si la vision est devenue rapide pour prélever des informations, les performances du toucher peuvent s'améliorer dans la lecture du braille[60]. Cependant, pour Kennedy et ses associés (1991), la question est davantage de savoir s'il existe des éléments spatiaux et picturaux disponibles au toucher et non inhérents à la vision.

- ***Répertoire d'activités exploratoires des nourrissons aveugles***

Dans une approche développementale et différentielle, Landau (1988) a étudié les explorations haptiques de nourrissons voyants et aveugles. Elle a découvert qu'à 18 mois le système haptique est bien adapté pour extraire les propriétés importantes des objets. Le nourrisson aveugle déploie un répertoire impressionnant d'activités exploratoires. Landau a alors développé des catégories pour le codage des vidéos seconde après seconde. Ces catégories suivent les manipulations qui permettent d'extraire des informations sur la forme

[60] Des observations, que nous avons réalisé, de l'activité exploratoire sur papier thermogonflé dans une tâche de reconnaissance indique que la vitesse exploratoire est telle que l'on a affaire à un véritable « coup de doigt » équivalent au coup d'œil.

globale (faire tourner, saisir, escamoter, transférer), les propriétés de surface des objets (gratter, tâter, frotter, manier) ou de substance (presser, écraser, plier, taper). Alors que le type d'exploration dépend de l'objet, il semble néanmoins que les enfants aveugles manipulent l'objet d'abord pour accéder à sa configuration globale pour ensuite connaître sa matière, la surface n'étant explorée qu'en dernier lieu. Même si les nourrissons aveugles explorent les objets plus longuement, la nature de leur exploration présente de nombreuses similitudes avec celle des nourrissons voyants.

- ***Techniques d'exploration de barres métalliques***

Les études qui traitent des stratégies exploratoires des aveugles révèlent que ces derniers privilégient les patterns qui donnent accès à plus d'informations de façon simultanée (Davidson, 1972). Lors de l'exploration de barres métalliques présentées horizontalement dans le plan fronto-parallèle, Davidson a relevé cinq techniques :

1. L'agrippement (grip) du stimulus avec enroulement des doigts sur sa partie extérieure
2. Le pincement (pinch) du stimulus entre le pouce et un autre doigt
3. Le balayage (topsweep), soit le parcours de l'arête frontal ou supérieure avec un doigt tendu
4. L'empan (span) pour mesurer le stimulus (main et doigts écartés).
5. Le traçage (trace) soit le parcours de la face interne du stimulus à l'aide d'un doigt tendu

Les aveugles privilégient les techniques d'agrippement contre le balayage chez les voyants. Se référant à cette étude, Hatwell (1986) remarque que les aveugles ont des explorations multi-digitales qui, sans engager le bras, reposent sur des *« petits mouvements digitaux fins au contact du stimulus »* alors que les voyants *«ont plutôt tendance à réduire le champ simultané et à maximiser l'information séquentielle et kinesthésique apportée par les mouvements du bras »* (p. 157). Les aveugles ont ainsi une appréhension tactile qui s'apparente beaucoup plus à l'exploration visuelle puisqu'ils utilisent à la fois la fovéa tactile, composée par la pulpe de l'index et, dans une moindre mesure, par celle du majeur et du pouce, et le champ périphérique.

2.3.3.2 La production et la lecture de formes bidimensionnelles chez l'aveugle

L'identification de dessins par l'aveugle est un sujet assez débattu dans la littérature. Cette tâche semble difficile à réaliser en dehors de la lecture de formes géométriques simples. Les aveugles de naissance peu familiers des règles de transcription picturale réalisent des performances égales ou moins bonnes que celles de voyants (Millar, 1975a ; Kennedy, 1991, 1993). Les aveugles tardifs détiennent un avantage sur les aveugles précoces et les voyants aveuglés (Heller, 1989 ; Heller, Kennedy, Joyner, 1995). Avant de présenter les résultats d'études sur les performances perceptives observées lors de la lecture d'image en relief, nous évoquerons la question de l'activité de dessin chez l'aveugle. Millar (1975a, 1991) fait part d'un résultat surprenant et découvert indirectement : chez l'aveugle la réalisation de dessin semble plus évoluée que la lecture.

- ***La production d'images***

Millar (1991) explique que les étonnantes capacités picturales de l'aveugle l'ont amenée à penser que c'est le mouvement qui conduit à la perception tactile plutôt que l'inverse. Son intérêt pour le dessin chez l'aveugle a été suscité à l'occasion d'une étude (1975a) au cours de laquelle elle a demandé à des enfants aveugles précoces de dessiner des silhouettes. Les sujets aveugles ont entre 5 et 15 ans et sont répartis en trois groupes de sept dont les âges moyens sont de 7 :1, 10 et 13 ans. Elle constate que les schèmes de production graphique employés par les aveugles les plus âgés présentent des similitudes avec ceux des voyants aveuglés. Ces dessins dénotent une ressemblance avec les figures conventionnelles. « *Et pourtant les sujets aveugles n'ont pas pu copier les uns sur les autres* » (Millar, 1991, p. 307). Millar a interprété ce résultat à la lumière des mouvements d'exploration qui permettent de percevoir une forme. Ainsi, la tête est représentée par un cercle et les jambes par des bâtons car la façon la plus simple de percevoir ces parties du corps consiste à décrire respectivement un cercle et un mouvement rectiligne. En revanche, les dessins des plus jeunes relèvent du griffonnage.

Une autre étude (Millar, 1975a) a été conduite pour déterminer si cette différence provenait d'une moindre habileté motrice chez les plus jeunes. Le protocole comporte trois tâches : une tâche de dessin (réalisé à l'aide d'un kit de traçage), une tâche d'assemblage de figures géométriques élémentaires pour former une silhouette et une tâche d'identification de dessins. Comme il existe un décalage avéré entre la reconnaissance et la production de dessin chez le voyant, il a été supposé que cette dernière tâche serait plus facile à effectuer. Les scores obtenus n'ont pas conforté l'hypothèse initiale selon laquelle les plus jeunes, qui manquent

d'habiletés graphiques, composeraient plus facilement une silhouette à partir de formes en carton. Les plus âgés ont mieux réussi la tâche d'assemblage que le dessin. Les sujets du groupe intermédiaire ont eu des résultats équivalents dans les deux types de tâches. Chez les plus jeunes, la différence de score entre la tâche d'assemblage et la tâche de dessin n'est pas significative. Le dessin ne semble pas se limiter à des aptitudes sensori-motrices et à des plans d'exécution, il implique également une conception de ce qu'il s'agit d'effectuer. Les objectifs des plus jeunes paraissent éloignés de la production de formes identifiables. Les formes sont utilisées pour lister des éléments sans souci de ressemblance ni respect de la topologie corporelle. Ainsi, un carré peut figurer une jambe ou encore un œil.

Lors de l'identification des dessins en relief, les résultats varient beaucoup selon le type de figure. Un enfant sur 21 a reconnu la silhouette « en bâtons » et un seul autre a reconnu la deuxième silhouette. Le dessin de la maison n'a été reconnu par aucun sujet. Les taux d'identification sont de 100% pour le cercle, 91% pour le triangle, 83% pour le carré et 45% pour la croix. Ceci signifie que les figures élémentaires qui composaient les dessins des silhouettes et de la maison ne comportent pas de difficulté. Ces résultats suggèrent que le fait d'utiliser des formes élémentaires pour symboliser des formes tridimensionnelles ne constitue pas une réponse *« immédiate et inévitable »* en haptique. L'identification d'un dessin qui symbolise un objet tridimensionnel demande à l'enfant aveugle d'établir une analogie entre ses propres mouvements dans l'espace et ses mouvements sur la surface plane. Les formes familières sont celles dont les propriétés ont été appréhendées par des explorations systématiques. Ces propriétés servent alors d'indices aux futures explorations. Dans l'activité de dessin, les mouvements sont produits à l'initiative du sujet. Or, lors de l'exploration d'un dessin, si le sujet ne dispose pas d'indices (précisions contextuelles, catégorie de l'objet), les mouvements sont contraints par la configuration du pattern bidimensionnel. Les mouvements contraints imposeraient une charge mnésique qui rendrait d'autant plus difficile l'élaboration d'inférences nécessaires à l'identification de l'objet.

L'interprétation de Millar (1991) repose ainsi sur trois arguments :

1. L'identification de formes familières dépend de propriétés initialement établies grâce à des explorations systématiques et qui agissent comme autant d'indices.

2. La mémoire des mouvements est plus efficiente quand les mouvements sont autoproduits et organisés que lorsqu'ils sont contraints par des dispositifs peu familiers.

3. La facilité des tâches d'identification et de production dépend de la présence ou de l'absence d'indices. En l'absence d'indice, la production s'avère plus facile à réaliser que l'identification.

De ces observations, Millar (ibid.) déduit que la reconnaissance haptique est indirecte et a pour base le mouvement. L'activité de dessin suppose différents niveaux de traitement cognitif (perceptif, procédural, symbolique) qui peuvent varier selon les conditions de la tâche. Elle ajoute que les résultats de cette recherche ont à la fois des implications théoriques et pratiques (enseignement de la lecture de dessins tactiles). En ce sens, Kennedy (1993), dans son ouvrage consacré au thème des aveugles et du dessin *« Drawing and the Blind »*, développe l'idée que les schèmes de production des contours mis en œuvre dans le dessin sont similaires aux schèmes d'identification. Les capacités picturales de l'aveugle qui dessine pour la première fois se situent à mi-chemin entre les marques incompréhensibles des dessins initiaux d'enfants et la production précise et non ambiguë du graphiste. *« Cet usage de la ligne semble accessible aux aveugles adultes même sans apprentissage »*[61] (p. 125). Les lignes représentent des arêtes, des coins et révèlent un style universel de figuration des contours. Les aveugles peuvent reproduire la géométrie des objets, ou les dessiner de profil. Leurs dessins témoignent d'une maîtrise dans l'exécution et de projections à partir d'un point de vue. Les capacités picturales des aveugles et les compétences spatiales qui les sous-tendent sont le fruit d'une histoire bien antérieure à leur participation à l'étude. Pourtant, ils n'avaient reçu aucun enseignement sur les significations possibles des lignes, ni sur les règles de la projection. Leurs aptitudes émaneraient d'après Kennedy (ibid.) d'une compréhension issue de leur sensibilité aux lignes et des principes spatiaux généraux. Ces principes émergeraient lors de *« la constitution des systèmes perceptifs et d'une appréciation générale de l'espace environnant disponible aux différents sens »*[61] (p. 126).

Kurze (1996), dont l'approche théorique (cognitiviste) diffère de Kennedy (écologique), arrive néanmoins à des conclusions proches quant aux capacités picturales de l'aveugle. Il a observé l'activité graphique d'aveugles qui utilisent un système de réalité augmentée (TDRAW, voir partie 2.2.5). Une feuille de papier thermogonflé est posée sur une tablette digitale. L'utilisateur réalise des dessins en relief à l'aide d'un stylet spécial qui allie la technologie thermique et numérique. Cinq sujets participent à l'étude : deux aveugles précoces et trois aveugles tardifs. Ils explorent des objets tridimensionnels (des modèles en plastique d'une chaise, d'une table, d'une bouteille, etc.), puis les reproduisent en conservant,

[61] Traduction personnelle.

dans la mesure du possible, le maximum d'informations tridimensionnelles. Enfin, ils dessinent une scène complète regroupant plusieurs objets.

Kurze (ibid.) fait les observations suivantes :

* Les dessins ont été réalisés selon leur forme « la plus signifiante » ; par exemple la chaise a été dessinée vue de profil.

* Dans les scènes regroupant plusieurs objets, chaque objet est dessiné selon sa forme *« la plus signifiante ».*

* Les sujets ont jugé difficile le dessin d'une scène complète et la restitution de ses relations spatiales.

* Des objets partiellement cachés sont parfois dessinés complètement.

* Les lignes qui se chevauchent sont dessinées de sorte que la ligne de devant soit discernable de la ligne du second plan. Les lignes de devant sont plus épaisses et plus bombées. Les lignes arrière, fines et plus plates, ont été dessinées plus rapidement.

* Les objets sont dessinés selon la même échelle ; aucun effet de perspective linéaire n'est observé.

* La profondeur est simulée par l'épaisseur du trait ou/et des lignes de contours ; par exemple une balle est figurée par des cercles concentriques.

* Des symétries tridimensionnelles sont en partie transformées en une symétrie bidimensionnelle.

* Certains objets sont représentés comme un volume déplié.

* Les éléments ouverts et fermés sont dessinés différemment.

* Les sujets changent parfois de point de vue au cours du dessin d'un même objet.

Les dessins ont été réalisés avec différents niveaux d'habiletés et d'expertise. Les aveugles tardifs ont tenté de se remémorer les techniques de dessins apprises quand ils avaient l'usage de la vue. Leur production ressemble étonnamment à des images conventionnelles. Kurze (ibid.) a identifié trois méthodes de dessins :

1. Volume déplié : la surface d'un objet est représentée par le dessin de ses différentes faces. Les sujets s'efforcent d'être fidèles aux formes et à la topologie.

2. Forme aplatie (« flattened rubber » : caoutchouc aplati): l'objet est représenté comme s'il avait subi un écrasement.

3. En coupe : le plan le plus signifiant est choisi pour faciliter l'identification avec un degré variable de réalisme.

L'usage de ces méthodes dépend du contexte et des préférences des sujets. Les propriétés topologiques du dessin reflètent les propriétés géométriques des objets originaux. La forme des objets est reproduite fidèlement. Les dessins ne montrent pas les distorsions induites par la perspective. Les dessins d'adultes aveugles ressemblent aux dessins d'enfants. D'après Kurze (ibid.), les dessins exécutés par les enfants révèlent leur modèle mental des objets. Néanmoins, ces dessins diffèrent fortement des illustrations qui s'adressent aux enfants. De même, les dessins pour aveugles ne doivent pas imiter les dessins d'aveugles mais s'inspirer de leurs règles de production.

- ***L'avantage des aveugles tardifs dans la lecture de dessins en relief***

Les aveugles tardifs ont un net avantage (Heller, 1989 ; Heller, Kennedy, Joyner, 1995) qui découle de deux facteurs: ils ont une expérience des images supérieure à celle des aveugles congénitaux et leur habileté perceptive tactile dépasse celle des voyants (Heller, 1989).Heller (ibid.) a ainsi évalué la contribution de l'expérience visuelle à travers deux expériences. La première propose une tâche d'appariement tactile afin de contrôler le rôle du « facteur éducation » sur les performances sachant que les aveugles précoces peuvent être moins familiers avec la dénomination des formes et bon nombre de figures géométriques communes. Les stimuli consistent en une série de formes simples embossées à partir d'une matrice de 6*6 points. Ces derniers ont une taille et un espacement similaires aux picots braille. La taille des stimuli est d'à peu près 12,5 mm². Ils sont disposés en quatre lignes de six formes chacune. A chaque essai, le sujet doit reconnaître la forme explorée parmi huit formes alignées. Les résultats sont similaires pour les trois groupes de sujets. En revanche, les aveugles précoces et tardifs sont significativement plus rapides que les voyants. Cette première expérience indique que l'expérience visuelle ne favorise pas une meilleure reconnaissance des patterns tactiles. Des résultats antérieurs (Heller, 1987) ont montré que la précision est plus faible lorsque les sujets utilisaient un doigt de chaque main. Dans cette expérience, il a alors été explicitement demandé aux sujets de recourir à la pulpe de l'index dominant aussi bien pour explorer la forme cible que pour trouver le stimulus correspondant.

Les mêmes sujets sont, au cours de la seconde expérience, soumis à l'identification de dessins d'objets communs réalisés à l'aide du kit de la Fondation suédoise pour les aveugles. Certains de ces objets sont à l'échelle (clé, ciseaux, montre, piles et tampon encreur), d'autres sont réduits en taille (téléphone, bouteille, visage, personnage, parapluie et canne). Les sujets doivent dans un premier temps explorer successivement 12 objets et tenter de les nommer.

Dans un deuxième temps, l'expérimentateur leur révèle le nom des objets représentés et les invite à une nouvelle exploration. Les aveugles tardifs ont des résultats significativement supérieurs aux voyants (35,8% et 12,9% de bonnes réponses respectivement) et aux aveugles congénitaux (9,1%). Ces deux derniers groupes ne se différencient pas de façon significative. Le taux de réponses correctes des aveugles tardifs atteint 82% dans la deuxième partie de l'expérience. Cette performance est à nouveau significativement supérieure à celle des deux autres groupes.

Heller (1989) tire la conclusion générale que l'expérience visuelle n'est pas absolument nécessaire pour une bonne perception de patterns tactiles et penche pour une interprétation a-modale de l'appréhension spatiale qui met en cause l'hypothèse d'un codage visuel des patterns tactiles. Il souligne que les aveugles, possiblement influencés par la pratique du braille, ont tendance à utiliser deux doigts. Les explorations des voyants impliquent uniquement l'index de la main dominante. L'usage simultané des deux index peut favoriser la rapidité dans la prise d'information et limiter également la charge mnésique. Par ailleurs, la présence d'un deuxième doigt peut offrir un point de référence et permet ainsi de conserver une trace cognitive des points de départ et d'arrivée lors d'explorations systématiques. Etant donné que la plupart des dessins en relief ne respectent pas les proportions des objets réels et sont loin de concurrencer la richesse de l'expérience perceptive tridimensionnelle, on peut mettre en question leur validité écologique. Cependant, les dessins qui ont été le plus aisément reconnus par les aveugles tardifs n'ont pas les mêmes dimensions que les objets réels. Heller (1989) s'interroge également quant à l'écologie visuelle des lignes dessinées. Il ajoute que bon nombre des dessins tactiles sont faciles à reconnaître pour la plupart des aveugles tardifs. Ces résultats plaident en faveur de la pertinence des dessins pour aveugles. Aussi, Kennedy (1982 ; 1993) et Millar (1975a) défendent l'idée selon laquelle les aveugles devraient être encouragés à dessiner et qu'une expérience accrue pourraient faciliter leur interprétation. En outre, les aveugles qui ont participé à cette étude se disaient intéressés par les kits de dessin en relief pour pouvoir écrire, prendre des notes, construire des cartes ou encore dessiner.

- ***Performances tactiles et expérience visuelle***

Pour Lederman, Klatzky, Chataway et Summers (1990), le toucher est peu performant dans la reconnaissance de dessins en relief et de formes planes sans signification. Les auteurs imputent ces erreurs à sa faible résolution et à la charge mnésique liée à l'intégration séquentielle de l'exploration. Ces distorsions systématiques sont révélatrices des heuristiques

utilisées afin de compenser les déficits perceptifs. Les sujets ont de façon implicite ou explicite recours à des points ou des axes de référence lors de la localisation des stimuli, ce qui se traduit par des erreurs dans le positionnement. Les mouvements radiaux au corps du sujet peuvent également donner lieu à une surestimation des distances parcourues (voir plus loin le paragraphe sur l'anisotropie de la perception).

Si les résultats dans la reconnaissance de formes bidimensionnelles peuvent être influencés par le manque de familiarité des sujets avec ce type d'objets, elles sont essentiellement limitées par des contraintes inhérentes au système haptique (Lederman et al., ibid.). Dans l'identification de formes, les performances du système haptique sont presque toujours inférieures à celles de la vision. Chez le voyant cette reconnaissance haptique transiterait par une médiation visuelle. Les auteurs proposent ainsi un modèle (Figure 13) de la perception haptique d'objets bi-dimensionnels. Ce traitement s'avère moins performant que celui qui est appliqué aux objets tridimensionnels et qui relève de l'appréhension directe (Figure 14).

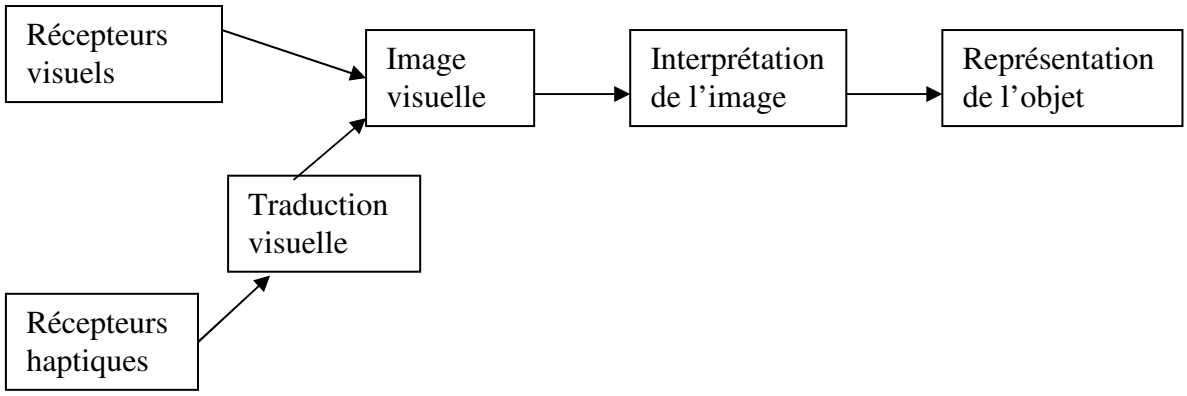


Figure 13 : Modèle du traitement haptique dit de la médiation visuelle d'après Lederman et al. (1990)

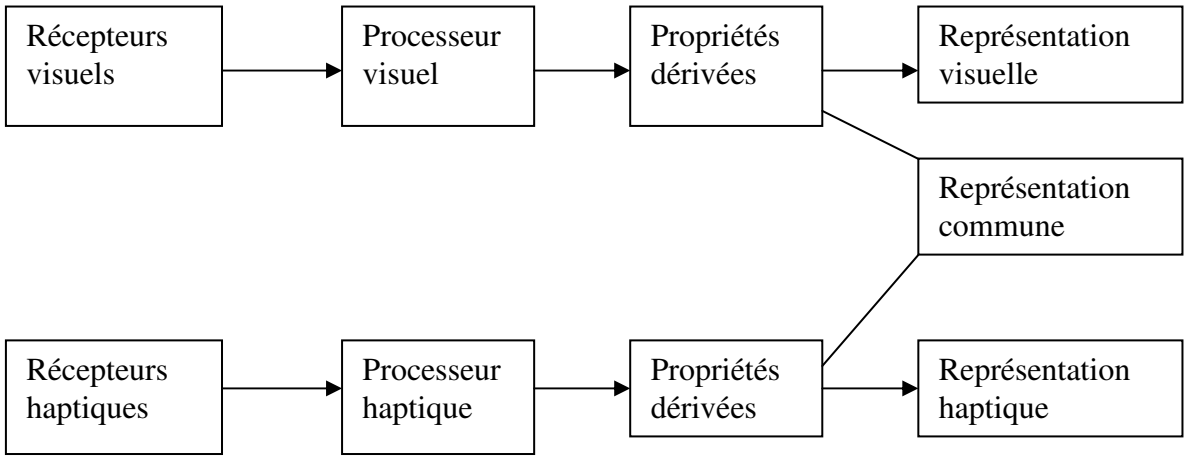


Figure 14 : Modèle du traitement haptique dit de l'appréhension directe (d'après Lederman et al., 1990)

Cette étude met en évidence une corrélation entre, d'une part, les performances dans l'identification de dessins et, d'autre part, la facilité de visualisation mentale des dessins[62]. Les sujets obtiennent de meilleurs résultats avec les dessins d'objets en deux dimensions qu'avec les dessins d'objets en trois dimensions. Enfin, il existe également une corrélation entre les résultats et la capacité des sujets voyants à visualiser mentalement des images. Les faibles résultats des sujets aveugles viennent corroborer l'hypothèse selon laquelle, le traitement haptique d'une image en relief chez le voyant passe par une médiation visuelle.

D'après Lederman et al. (1990), lors de l'exploration de dessins en relief, le système haptique convertit les entrées séquentielles et de basses résolution en une image visuelle qui est à son tour traitée par « les processeurs » visuels. Ce traitement est d'autant plus lourd que des indices haptiques pertinents tels que le poids, la dureté, la température sont absents ou minimisés. Lederman et al. (ibid.) opèrent alors une distinction entre la structure et la substance. La texture, la température, le poids constituent les propriétés de substance. La forme, la taille et le volume des objets définissent sa structure. La main humaine, de par ses caractéristiques, aurait une fonction motrice et une fonction perceptive. Elle serait particulièrement adaptée à la perception des propriétés de substance. La reconnaissance d'objets haptiques atteint les 100% alors que les résultats enregistrés avec les dessins en relief sont de 33% chez les voyants aveuglés et d'à peine 10% chez les sujets aveugles congénitaux. Le peu de propriétés tangibles disponibles dans les dessins a restreint le nombre et la richesse

[62] Cette capacité a été estimée lors de deux expérimentations préalables.

des stratégies exploratoires ; les faibles résultats des sujets aveugles rendent compte de ces contraintes. Lederman et al. (ibid.) en déduisent des recommandations à l'usage des concepteurs de dessins en relief. Prolongeant l'argument de Gibson (1966) selon lequel les informations qui favorisent la perception haptique se trouvent absentes ou sous-représentées dans ces dispositifs, ils suggèrent, dans la mesure où le permet le développement technologique, d'incorporer des éléments de substance tels que la texture ou la température. Ils conseillent de peser avantages et inconvénients des informations spatiales avant d'opter pour la représentation graphique plutôt que la forme textuelle (écrite ou orale). Ils nuancent ce point à propos des graphes et des cartes simples. Leur position demeure cependant beaucoup moins optimiste que celle de Kennedy.

- ***Performances et accès à la catégorie***

Heller, Calcaterra, Burson et Tyler (1996) attribuent les faibles performances dans l'identification de dessin aux difficultés éprouvées dans l'accès au nom ou à la catégorie de l'objet et pas uniquement aux erreurs dans l'identification de patterns tactiles. Leur étude cherche alors à discerner l'influence du facteur catégorie du facteur perception. Quatre expérimentations sont entreprises, les trois premières avec des sujets voyants et la quatrième avec un groupe de sujets aveugles. **L'expérience 1** montre que lorsque les sujets sont informés de la catégorie à laquelle appartient l'objet dessiné, le taux de réponses correctes est significativement meilleur (63,3% de bonnes réponses contre 24% chez les sujets n'ayant pas disposés d'informations) et le temps d'exploration significativement plus court (30,4% contre 52,8%). La connaissance de la catégorie ayant pu influencer la nature des explorations, un effet perceptif n'est donc pas à exclure.

Afin de déterminer si la catégorisation favorise la prise d'information ou agit à un niveau supérieur dans **l'expérience 2,** l'information catégorielle est délivrée au groupe 1 après l'exploration et avant que le sujet ne donne sa réponse. Au second groupe, on énumère l'ensemble des catégories présentées en début de session. Le taux de bonnes réponses du groupe 1 est de 58% et celui du groupe 2 de 52,7%. Les différences entre le groupe 1 et le groupe 2, entre ces deux groupes et le groupe ayant bénéficié de l'information catégorielle dans l'expérience 1, ne sont pas significatives. En revanche, le temps de réponse est significativement plus court dans la condition « information catégorielle » de l'expérience 1 que dans toutes les autres conditions. Les sujets du groupe 1 sont significativement plus rapides que ceux du groupe 2 de l'expérience 2. Les résultats de cette dernière expérience

suggèrent que le facteur déterminant dans la réussite de l'identification réside dans l'accès préalable à la catégorie.

L'expérience 3 cherche à neutraliser l'effet de la recherche, en mémoire sémantique, du nom de l'objet ou de sa catégorie. Il est demandé aux sujets de reconnaître le pattern parmi trois autres appartenant à la même catégorie. Les sujets se subdivisent à nouveau en deux groupes. Aux sujets du groupe 2, le nom de la catégorie est précisé. Les résultats des groupes 1 et 2 sont similaires avec respectivement 84 et 88,7% de réponses correctes. Les performances de l'expérience 3 sont de loin supérieures à celles des expérimentations 1 et 2.

L'objectif de **l'expérience 4** était d'évaluer le rôle de l'expérience visuelle dans l'identification de dessins en relief. 10 voyants aveuglés, 10 aveugles tardifs et 10 aveugles congénitaux participent à l'expérience. La catégorie des dessins est mentionnée aux sujets. Les aveugles tardifs obtiennent de meilleures performances que les voyants aveuglés mais la différence entre les résultats n'est pas significative. Les résultats des aveugles congénitaux sont inférieurs à ceux des deux autres groupes. Malgré l'accès préalable à la catégorie, l'expérience visuelle a eu une influence décisive sur les performances.

- ***Des performances qui varient selon le type de dessins***

Dans l'expérience 4 de l'étude de Heller et ses collègues (ibid.), des interactions significatives apparaissent entre le statut visuel et la catégorie des dessins. Les trois groupes de sujets obtiennent des performances proches pour les dessins appartenant à la catégorie ustensiles de cuisine et à la catégorie fruits. En revanche, les aveugles congénitaux ont éprouvé plus de difficulté à reconnaître les dessins représentant des parties du corps humain. Le manque d'éléments contextuels (représentation isolée de certaines parties du corps humain) est peut-être à l'origine des nombreuses erreurs : le dessin du nez a été souvent confondu avec le coude, et l'oreille avec d'autres parties du corps. Les figures d'objets d'ameublement avec lesquelles les aveugles sont moins familiers (par exemple la lampe) ont été moins bien reconnues.

Selon Heller (1989), il n'est pas pertinent d'affirmer que le toucher est peu performant dans la lecture de dessins en relief. L'identification dépend beaucoup du type de dessins. Par exemple, un visage dessiné séparément est beaucoup plus difficile à reconnaître que s'il apparaît dans une silhouette. Néanmoins, l'élimination de détails afin de simplifier l'image peut aussi induire les sujets en erreurs. Ainsi, un sujet aveugle fit à Heller (ibid.) le

commentaire suivant à propos de l'image d'un téléphone : *« ce ne peut pas être un téléphone car il manque le fil »*[63].

Dans son ouvrage *« Drawing and the blind »*, Kennedy (1993) présente les résultats des différentes études qu'il a menées sur l'identification de dessins en relief chez l'aveugle. Les formes simples et les formes géométriques sont aisément reconnues par les sujets aveugles, ce qui confirme les observations de Millar (1991). En revanche, les dessins représentant une main, un fourchette, une silhouette avec le bras levé, un oriflamme, un visage de trois quart, une tasse, une silhouette avec les bras croisés et une table de trois quart ont donné lieu à des performances assez faibles. En moyenne, on relève en moyenne 1,25 et 1,75 identifications chez respectivement un groupe d'étudiants aveugles de Harvard et un groupe de jeunes aveugles de Toronto (âgés de 13 à 22 ans) soit moins que les étudiants voyants de Harvard qui ont obtenu 2,4 identifications. Bien que le taux d'identification se situe entre 10 et 20%, Kennedy estime que les résultats des aveugles sont encourageants. En outre, dans un contexte approprié, des améliorations sont envisageables. Kennedy a demandé à des aveugles adultes membres de l'association BOOST (Blind Organization of Ontario with Self-Help Tactics) de se prononcer sur le degré de difficulté des illustrations en relief accompagnant des histoires pour enfants. Ainsi, à 39 reprises, les illustrations ont été interprétées sans que les participants ne sollicitent aucune aide. Kennedy attribue ces performances à la fois aux habiletés des participants et à l'aide fournie par le contexte. Les techniques d'exploration jouent également un rôle crucial dans l'identification des dessins en relief. Kennedy (ibid.) évoquent les lacunes des enfants défavorisés d'un centre pour handicapés de Port au Prince. L'auteur souligne chez eux l'absence de techniques exploratoires efficientes :

* Ils ne balaient pas l'ensemble de la figure
* Ils utilisent l'ensemble de la paume posée à plat pour percevoir la texture
* Leurs mains sont peu mobiles
* La pulpe des doigts entre rarement en contact avec la forme.

- ***Anisotropie de l'espace haptique***

L'exploration de l'espace d'action proximal (par exemple un plan perpendiculaire à l'axe du corps) donne lieu a des distorsions selon que le mouvement exploratoire est tangentiel ou

[63] Traduction personnelle.

radial (perpendiculaire) au corps symbolisé par un cylindre. Ces distorsions se traduisent généralement par une surestimation des longueurs (étendue d'une ligne) sur l'axe radial (Day & Wong, 1971). D'ailleurs, la mise en évidence du RTE (Radial – Tangential Effect) révèle le fait que l'expérience, au sens phénoménologique, de l'espace haptique est effectivement anisotrope. Une même distance peut être perçue différemment selon son orientation absolue (radiale ou tangentielle). Le fait est en réalité plus général puisque certaines illusions décrites dans le domaine visuel sont retrouvées en haptique avec d'ailleurs peu de différences au regard du statut de la cécité (voyant aveuglé, aveugle natif ou tardif). Cependant, il apparaît des spécificités associées à l'exploration haptique. Ce point est important pour la conception d'interfaces graphiques.

Si la direction du mouvement (mais aussi l'orientation, la localisation dans l'espace d'action, la latéralité, etc.…) crée des anisotropies perceptives, il semble cependant que ces anisotropies soient modulables, parfois considérablement, selon la dynamique exploratoire en tant que telle. Il apparaît que la durée et donc la vitesse varie significativement d'une direction à l'autre (Armstrong & Marks, 1999). Ces différences sont possiblement attribuables à des différences biomécaniques. Par exemple, on constate que ces différences sont présentes pour des mouvements impliquant l'articulation de l'épaule et disparaissent ou sont largement atténuées si seul le poignet est impliqué. Ce point a été souligné dans plusieurs études portant sur l'exploration de formes de grandes tailles (par exemple Faineteau, Gentaz & Viviani, soumis ; Klatzky, 1999). D'après les différents travaux évoqués, les stratégies exploratoires semblent avoir un effet décisif sur la perception des objets bidimensionnels.

2.3.3.3 Stratégies d'exploration des formes bidimensionnelles chez l'aveugle

En dehors des travaux conduits par Berlà dans les années 1970, les études mentionnées ci-dessus n'évoquent que très partiellement les stratégies d'exploration de formes 2D en relief. Berlà et Murr (1974, cités par Hatwell, 2003) ont comparé les effets d'apprentissage de différents modes d'exploration de cartes géographiques en relief chez des sujets aveugles âgés de 11 à 19 ans. L'entraînement dure quatre minutes. Le mode d'exploration consiste soit en un scanning vertical uni-manuel, soit en un scanning bi-manuel horizontal soit en une exploration libre. Dans la situation contrôle, les sujets ne reçoivent aucun entraînement. Les sujets qui ont bénéficié d'un apprentissage obtiennent de meilleurs résultats surtout avec le scanning vertical. De même, les performances dans une tâche de reconnaissance (un dessin doit être reconnu parmi 4 autres) sont améliorées lorsque l'on a, au préalable, enseigné aux

sujets (âgés de 6 à 17 ans) à focaliser leur attention sur les parties critiques des figures à explorer (Berlà & Butterfield, 1977 ; cités par Hatwell, ibid.). Enfin, Berlà (1981 ; cité par Hatwell, ibid.) observe que l'enseignement d'une stratégie de lecture influence positivement les résultats des sujets de 11 ans alors qu'il perturbe les sujets de 15 ans qui eux ont déjà stabilisé leur propre mode exploratoire.

« Le guide de l'acheteur public de produits graphiques en relief à l'usage des personnes déficientes visuelles » (2000) propose une description des stratégies exploratoires des documents en relief. Sont identifiés ici trois niveaux de lecture tactile. Ces niveaux peuvent cependant se chevaucher.

- ***Trois niveaux de lecture tactile***

La lecture globale sert à appréhender les différents blocs d'information. Cette première étape fait intervenir les deux mains et tous les doigts. Le sens de l'exploration s'effectue du coin haut à gauche vers le coin bas à droite. En fonction du lecteur le mouvement est soit alternatif comme dans le suivi de lignes soit centré avec des insistances locales. *« A ce niveau l'empan tactile qui sépare deux poses de mains correspond à un peu moins de la largeur de la main. La recherche de sens n'étant pas le but premier de cette exploration, ce sont les différences de densité des traces qui forment les indices permettant d'isoler les blocs d'information. En même temps, la présence des balises connus (braille, symboles) sera notée comme des balises repères dans l'organisation de la planche »* (ibid.).

La lecture *« suivie du document »* (ibid.) consiste à suivre les éléments graphiques qui présentent de la continuité. Elle est souvent concomitante de la première phase. Elle poursuit la détection du relief tout en s'attelant à la recherche de sens. « *Elle vise à l'analyse et la mémorisation des données graphiques »* (ibid.) La position des mains s'oriente vers la verticale et les doigts sont rapprochés. Les index se focalisent sur des régions précises tandis que les autres doigts composent le champ périphérique sensible aux éléments du contexte. Un parallèle peut être établi avec la lecture rapide visuelle: *« à partir de quelques zones repérées lors de la lecture globale, le lecteur émet des hypothèses qui conduisent à l'exploration du contexte graphique à partir du détail qui a retenu son attention et ceci jusqu'à ce qu'il trouve une réponse satisfaisante. C'est à ce moment qu'interviennent les références du lecteur (ses connaissances générales et ses connaissances des codes) ; plus ces références sont grandes plus le décodage sera rapide »* (ibid.)

Le déchiffrage graphique se caractérise par un rétrécissement de l'empan aux deux index qui peuvent alors se toucher. Les index agissent en alternance, l'un sert de point d'ancrage tandis que l'autre explore la zone environnante. Cette modalité s'adresse particulièrement aux éléments complexes ou inconnus : *« le lecteur recourt à une procédure faite d'un ensemble de décompositions et d'assemblages des traces en relief. Le lecteur cherche à isoler des entités dont les propriétés lui sont connues (segments, arcs, textures…) puis recherche les combinaisons locales qui sont réalisées dans le motif»* (ibid.).

- ***Caractéristiques de la lecture du Braille***

En dépit des avantages du braille (voir partie 2.1.1.1), la littérature ne manque pas de souligner les difficultés rencontrées lors de son apprentissage et de sa pratique. Les lettres braille présentent peu de traits distinctifs, excepté le nombre de points et leur localisation, ce qui ne facilite pas leur discrimination. Millar (1997) révèle ainsi que, lors de tâches d'appariement de stimulus chez les jeunes enfants, le nombre et la texture prévalent et non pas la localisation des points ou la forme de la lettre. *«Les patterns braille manquent eux-mêmes de redondance »*[64] (Millar, 1997). A cause des erreurs possibles d'alignement vertical et horizontal une même configuration tactile peut donner lieu à différentes interprétations (Tobin, Greaney & Hill, 2000). L'exiguïté du champ perceptif tactile mobilisé (l'index n'appréhende qu'une lettre à la fois) limite la vitesse de lecture. Ainsi plusieurs études (Lorimer, 1977 ; Tobin, 1979 et 1988 ; Greaney, Tobin & Hill, 1998) indiquent des écarts dans les vitesses de lecture entre voyants (textes imprimés) et braillistes. Cet écart s'accentue avec l'âge. Le nombre médian de mots par minute d'un adolescent voyant de 13 ans est de 102 contre 32 chez l'aveugle du même âge. Si elle augmente avec l'expérience, la vitesse de lecture dépend aussi de la tâche comme l'ont montré Knowlton et Wetzel (1996). Pour des adultes aveugles experts, le nombre de mots lus par minutes est de 136 en lecture orale, de 105 en lecture silencieuse avec questions de compréhension, de 106 en étude, et de 203 en recherche d'information. Enfin, les stratégies utilisées affectent de façon notable les performances de lecture. Des enregistrements filmés des mouvements manuels lors de la lecture du braille ont mis en évidence un certain nombre de caractéristiques. D'après Foulke (1964, 1991), seuls les index sont impliqués lors de la lecture d'un texte braille. L'utilisation d'une seule main s'observe chez les débutants ou les aveugles tardifs qui se sont mis au braille et la main non dominante joue un rôle de support ou de repérage de début de ligne

[64] Traduction personnelle.

(Hatwell, 2003). La lecture bi-manuelle est beaucoup plus performante. L'analyse de la position relative et du parcours des index a révélé différents types d'explorations (Bertelson, 1995 ; Berteslson, Mousty et d'Alimonte, 1985 ; Millar 1997 ; Mousty et Berteslson, 1985).

L'exploration conjointe : les deux index solidaires parcourent l'ensemble de la ligne et reviennent à la ligne ensemble. Les index explorent chacun une cellule à la fois et se partagent parfois la même lettre.

L'exploration bi-manuelle mixte : la partie gauche de la ligne est explorée par l'index gauche, la partie centrale par une exploration conjointe et la partie droite par l'index droit alors que l'index gauche se dirige vers la ligne suivante. D'après Bertelson et ses associés (1985), la taille relative des trois différentes portions de la ligne varie d'un lecteur à l'autre.

Dans l'exploration bi-manuelle disjointe l'index droit achève la lecture de la partie droite, et l'index gauche se charge de la partie gauche de la ligne suivante. Cette stratégie s'avère la plus performante. Savoir si les index explorent ne serait-ce que pendant un temps fort bref, deux lettres simultanément a suscité un débat entre, d'une part, Bertelson et Mousty (1985) qui plaident pour un traitement parallèle et, d'autre part, Millar (1987) qui, enregistrements à l'appui, met en évidence une alternance dans les contacts (pendant qu'un index explore une lettre l'autre se situe sur un espace blanc ou dans le vide) qui correspond également à une distribution entre la fonction de repérage et la fonction de lecture. Bertelson et Mousty (1989), dans un article intitulé *«simultaneous reading of Braille with two hands a reply to Millar »,* rétorquent que la divergence entre leurs résultats et ceux constatés par Millar proviennent d'un écart de niveau entre leurs échantillons respectifs. Les sujets de Bertelson sont des braillistes chevronnés. Leurs explorations sont majoritairement bi-manuelles et disjointes tandis que les lecteurs de Millar ont recours à des explorations conjointes beaucoup plus longues en milieu de ligne.

Les charges perceptives et cognitives imposées par le braille sont supérieures à celles de la lecture en mode visuel. Le braille exige un contrôle psychomoteur particulièrement fin et une forte mobilisation de la mémoire à court terme. Les jeunes aveugles en milieu scolaire peuvent s'en trouver pénalisés. La nécessité de recherches pour rendre ce système plus accessible se fait toujours ressentir. Tobin et al. (1986) discutent la pertinence des codes employés dans le braille abrégé. L'enseignement de stratégies de lecture plus efficaces est également évoqué (Lorimer et al., 1982). Enfin, la matérialité du support est aussi à

considérer: le substrat matériel (papier, plastique), la taille et l'espacement entre cellules, la mise en page (par exemple l'introduction de titre) influencent les performances de lecture (Tobin et al., 1986 ; Hartley, Tobin and Trueman, 1987).

Les deux facteurs (bi ou mono manualité et nombre de doigts) pour caractériser les patterns de lecture du braille sont également mobilisés afin de rendre compte de l'efficacité des différentes stratégies de lecture de formes en relief.

- ***La bi-manualité***

La perception bi-manuelle a de nombreux avantages (Hatwell, 1986) :

* Taille du champ plus importante,
* Vitesse d'exploration accrue,
* Economie des mouvements,
* Plus grande variété des mouvements.

Cette perception reste soumise à des contraintes liées aux propriétés du stimulus, en l'occurrence sa taille et son caractère symétrique ou non selon l'axe vertical. En effet, lorsque l'objet est symétrique, les deux mains peuvent agir en miroir. Si l'objet est asymétrique, alors le mouvement de synchronisation des deux mains n'est plus possible, les mains vont chacune agir en alternance. *« Le sujet pratique des pauses et des mouvements alternés, par exemple si la main droite est en mouvement sur la partie droite du champ, la main gauche reste fixée sur une région gauche. Puis la main gauche se déplace à son tour à gauche et la main droite s'immobilise à droite »* (Hatwell, 1986, p. 155). Par ailleurs, d'après Butter et Bjorklund (1976), la bi-manualité n'apporterait un avantage que si le temps de présentation des stimuli est supérieur à 20 ou 30 secondes. Toutefois, comparativement à des sujets voyants, les aveugles tirent mieux partie de la bi-manualité puisque quand l'exploration est bi-manuelle les performances des sujets aveugles sont supérieures à celles des voyants (Russier, 1999).

- ***Le nombre et le type de doigts utilisés lors des explorations***

Lappin et Foulke (1973) qui ont étudié la discrimination de signaux braille chez des voyants et des aveugles nous enseignent que la condition « un doigt » (soit l'index, soit le majeur) de chaque main est celle qui offre les meilleures résultats comparativement aux conditions « deux doigts d'une main » et « deux doigts pour chaque main ». Loomis, Klatzky et

Lederman (1991) ont comparé les performances visuelles et tactiles chez des adultes voyants en égalisant la taille du champ et découvert que lorsque la taille du champ correspond à un index, les performances visuelles et tactiles sont similaires, en revanche quand elle équivaut à deux index, les performances visuelles augmentent mais les performances tactiles ne varient pas. Ils concluent alors que l'appréhension tactile simultanée correspond à un index ce qui ne remet cependant pas en cause le résultat précédent puisque dans cette étude aux paramètres très contrôlés l'exploration n'est pas bi-manuelle et les sujets sont des voyants aveuglés. Enfin, on peut s'interroger sur la fonction de chaque doigt. D'après Lomov (cité par Hatwell, 1986), lors de l'appréhension tactile de droites, les doigts impliqués sont l'index et le majeur. Les pouces interviennent dans l'exploration de courbes et des lignes brisées. Les objets tridimensionnels exigent la participation des pouces et de la paume.

Nous allons, dans la partie suivante, évoquer comment ces considérations sur les stratégies de lecture peuvent jouer un rôle majeur dans la conception des dispositifs numériques d'accès non-visuel au graphique.

2.3.4 Implications pour la conception des dispositifs d'accès au graphique

Les résultats des études sur la cognition spatiale et la perception tactile chez les aveugles nous suggèrent un ensemble de conditions à satisfaire pour un meilleur usage des supports graphiques.

- Exposition accrue aux images d'objets bi et tridimensionnels
- Définition d'un codage pertinent
- Présence d'indications
- Enseignement de techniques d'exploration
- Considération des stratégies exploratoires dans la conception d'interfaces d'accès à l'image.

- ***Exposition accrue aux images bi et tridimensionnelles***

Les psychologues qui se sont intéressé à la cécité tels que Heller (1989), Kennedy (1993) et Millar (1991) déplorent un déficit d'accès à l'image. Si les aveugles perçoivent sans difficulté les formes géométriques simples, les représentations bidimensionnelles d'objets courants sont, en revanche, difficiles à appréhender du fait d'un manque de familiarité avec les règles de

transcription picturales. Une fois initiés à ces règles de présentation, les aveugles précoces réussissent même à interpréter des dessins d'objets présentés en perspective (Heller, Calcaterra, Tyler & Burson, 1996b). Inviter les aveugles à produire davantage de dessins pourrait également favoriser la compréhension de ces règles, d'autant que certaines d'entre elles sont spontanément employées (Millar, 1991 ; Kennedy, 1993 ; Kurze 1996). En effet, dans leurs productions graphiques, les aveugles mettent en oeuvre les règles de figuration suivantes : représentation des contours, image de profil, rétrécissement des contours.

Sans revenir sur les vertus du graphique en mathématiques, rappelons que les bénéfices cognitifs des images chez l'aveugle, largement prônés par Feuerstein (1980), ont été mis en évidence dans les études consacrées à la lecture de cartes. Leur usage, vient faciliter la navigation dans l'espace notamment en rendant possible des inférences spatiales (Ungar, Blades, Spencer & Morley, 1994 ; Espinosa, Ungar, Ocahtais, Blades & Spencer, 1998 ; Espinosa & Ochaitas, 1998).

- ***Choix des informations à présenter et définition d'un codage pertinent***

Dans le cas des cartes, un équilibre est à trouver entre la richesse informative et la non-saturation du support, sachant que l'emploi de différentes textures (quadrillage, hachure) se substitue à celui des couleurs. En outre, les symboles utilisés se doivent d'être discriminables. Par exemple, il est recommandé de faire varier la hauteur pour favoriser la distinction entre figure et fond (Jansson, 2000). L'emploi de matières différentes donne à percevoir des propriétés comme la température ou encore la dureté et facilite ainsi la discrimination tactile.

En ce qui concerne les images d'objets matériels, celles-ci doivent figurer les contours selon l'angle qui soit le plus signifiant, soit de face ou de profil. Les dessins d'objet vus de ¾ ou d'en haut sont moins bien reconnus (Heller, Kennedy & Joyner (1995). Les images en coupe se révèlent appropriées pour les objets qui présentent un intérieur (corps humain, bâtiment, machine). Enfin, lorsqu'une partie d'un tout est présentée, la reconnaissance est malaisée sans élément de contexte. Par exemple, les sujets aveugles qui ont participé à l'étude de Heller, Calcaterra, Burson et Tyler (1996) ont éprouvé des difficultés à reconnaître le dessin d'une oreille.

- ***Présence d'indications***

Deux sortes d'indications peuvent accompagner une image :

1. Les informations concernant l'objet représenté : lorsque les sujets aveugles disposent d'éléments contextuels (Heller, 1989) ou du nom de la catégorie (Heller, Calcaterra, Burson & Tyler, 1996) à laquelle appartient l'objet dessiné alors les performances dans l'identification augmentent considérablement.

2. Les instructions de lecture (sens de lecture, renvoi vers des éléments importants) qui constituent une sorte de mode d'emploi de l'image mais qui ne se substitue nullement à l'acquisition d'« savoir faire » tactile.

Ainsi, il nous faut opérer une distinction conceptuelle entre des instructions de lecture et l'enseignement de procédures d'exploration.

- ***Enseignement de stratégies d'exploration***

L'importance d'enseigner des stratégies d'exploration est une idée largement défendue par Jansson[65], Kennedy (1993), Ungar, Blades et Spencer (1995). Cette recommandation peut être complétée par les préconisations suivantes :

∗ Moduler le niveau d'appréhension tactile, de la lecture globale au déchiffrage, en faisant varier l'empan tactile : des deux mains (à plat) ramenées vers soi à la lecture locale avec les index (paume levées)[66].

∗ Encourager la prise de repères absolus et relatifs (Ungar, Blades & Spencer, 1995): les objets sont à situer dans un cadre de référence et les uns par rapport aux autres. La main non-dominante peut servir de point d'ancrage tandis que la main dominante discrimine et localise. La prise de mesure s'effectue éventuellement en intercalant des doigts entre deux points.

∗ Procéder à une lecture suivie pour les éléments qui présentent de la continuité[66]. Un rapprochement peut être établi avec la procédure de suivi des contours de Lederman et Klatzky (1987) et les techniques de traçage et de balayage de Davidson (1972).

∗ Prendre connaissance des textures par la procédure du frottement latéral (Lederman & Klatzky, 1987).

- ***Prise en compte des stratégies exploratoires dans la conception d'interface d'accès à l'image.***

Si les aveugles rencontrent des difficultés dans la lecture de dessins d'objets en relief, les formes géométriques simples sont identifiées aisément sur les supports traditionnels. Les technologies actuelles d'accès au graphique sous format numérique comme le PHANToM, le

[65] http://www.ida.liu.se/~ssomc/papers/Jansson.pdf.

[66] *« Le guide de l'acheteur public de produits graphiques en relief à l'usage des personnes déficientes visuelles »* (2000)

Pantobraille ou encore MIMIZU ne garantissent pas encore d'aussi bonnes performances. D'après Kirkpatrick (1999), la conception des interfaces haptiques s'est concentrée sur le retour sensoriel et, en comparaison, la question des mouvements d'exploration a été négligée. Actuellement, les systèmes haptiques sont donc très loin de rivaliser avec la richesse perceptive des explorations bi-manuelles et multi-digitales. L'efficacité haptique résulte de la présence simultanée d'une grande variété d'indices. L'observation des procédures exploratoires (Lederman & Klatzky, 1993) dicte, selon Kirkpatrick (1999), cinq critères de conception :

1. La compatibilité entre techniques d'interaction : comme en situation réelle, les différentes procédures possibles doivent pouvoir s'enchaîner de façon fluide.

2. L'apprentissage sera facilité si les techniques d'interaction font appel à des mouvements qui soient le plus proche possible des procédures exploratoires de des objets réels.

3. La richesse informative et les possibilités d'interaction *(« Broad sufficiency and capability »)* : une identification rapide suppose des techniques d'interaction qui permettent une discrimination globale de plusieurs propriétés et la reconnaissance globale d'une même propriété présente en différents lieux.

4. L'intégration spatiale : le toucher est plus performant dans l'intégration de sensations simultanées que dans l'intégration de sensations séquentielles.

5. L'influence de la tâche *(« task sensitivity »*: Les techniques d'interaction doivent varier selon que la tâche relève de la reconnaissance ou de l'identification.

L'examen des études consacrées aux explorations haptiques qu'elles soient directes (voir 2.3.3) ou médiatisées (voir 2.2) nous amène à pointer des défis communs à l'ensemble des projets de conception de dispositifs d'accès aux images numériques :

La suppression d'imperfections techniques comme : les oscillations du PHAToM ou la lenteur de réaction de la grille tactile.

La répartition entre informations tactiles et informations sonores : le choix de la modalité sensorielle se pose à propos de la lecture des informations textuelles et du codage de la figure. Dans un contexte d'utilisation où cohabitent textes et images, un lecteur d'écran s'avère

nécessaire. Quelle restitution prévoir alors ? Tactile, grâce à une barrette braille qui devra s'intégrer à l'ensemble du système ou sonore, à l'aide de la synthèse vocale ou encore tactile et sonore. La figure s'accompagne parfois d'indications qui prennent la forme de messages vocaux. La figure peut à son tour comporter des caractères alphanumériques (noms des sommets de la figure). Dans ce cas, le choix du mode de lecture se pose entre le tactilo-kinesthésique, le vocale et le sonore. Enfin, des éléments particuliers de la figure comme les sommets peuvent faire l'objet d'un traitement particulier ; le recours à une autre modalité sert à marquer le statut et/ou à pallier les limites du retour tactilo-kinesthésique.

L'augmentation de la résolution de la stimulation sensorielle : la discrimination droite/courbe et la lecture des valeurs angulaires ne sont pas systématiquement garanties même dans le cas de MIMIZU.

L'unicité du point de contact semble la limite technique majeure auquel se heurtent le PHANToM et le Pantobraille. Un point de contact unique induit des patterns de lecture qui peuvent perturber les utilisateurs familiers d'exploration multipoints. Cet aspect serait à l'origine d'inconvénient tels que la lenteur de l'exploration et la perte de la forme. Des fonctions de compensation sont alors à imaginer pour se rapprocher des explorations « naturelles » (non prothétisées). Il soulève aussi la question de l'apprentissage de procédures d'exploration ad hoc.

Tactos, à l'instar de ces dispositifs, procure les moyens d'approfondir la question de l'identification de stratégies et de leur possible facilitation par le dispositif.

3 Etude pour la conception de l'appropriation et de l'usage d'un dispositif de suppléance perceptive (Tactos)

L'analyse des stratégies perceptives déployées via les dispositifs de lecture haptique de formes rend compte des possibilités d'action et de perception introduites par l'instrument. Les connaissances issues de cette analyse donnent à leur tour les moyens d'agir sur sa conception (de proposer de nouvelles spécifications) et ce, en articulant les trois dimensions qui le constituent :

1. Le couplage et ses propriétés, par la définition d'un espace d'action et d'un retour sensoriel qui favorisent l'émergence de stratégies efficientes
2. L'assistances à l'activité : dans le cadre d'activités finalisées des outils sont proposés pour faciliter la réalisation des tâches et ainsi assister l'action du sujet.
3. L'apprentissage : l'appropriation devient effective lorsque le sujet dispose de stratégies efficientes, ces dernières pouvant être suggérées dans le cadre d'un tutorat.

Considérer des stratégies possède également l'avantage de ne pas dissoudre la question du sujet puisque celles-ci renvoient à son action et à ses choix propres. Nous employons le terme stratégie avec le sens générique que lui donne le dictionnaire *« ensemble d'actions coordonnées en vue d'atteindre un but »*[67]. Partant de l'idée constructiviste que ces stratégies sont le résultat d'une genèse, notre démarche consiste à déterminer les conditions minimales qui rendent possible cette genèse et à appréhender l'activité perceptive à travers ces évolutions. L'originalité de cette étude réside dans l'observation d'une activité en constitution. Sur le plan méthodologique cela se traduit par une approche minimaliste (définie en section 3.1.2) et un cadre d'observation qui relève de la clinique de l'activité. Ainsi, notre dispositif Tactos met en œuvre, dans des conditions de couplage minimal, le principe dit de « substitution sensorielle » sur lequel repose le TVSS de Paul Bach y Rita (1972). L'étude longitudinale entreprise auprès de six sujets aveugles permet de systématiser l'analyse des stratégies et de leur évolution.

[67] Ce sens est d'ailleurs repris dans l'ouvrage de Claude Bastien (1987) intitulé « *Schèmes et stratégies dans l'activité cognitive de l'enfant* ».

3.1 Suppléance perceptive et conception d'une interface haptique : contexte technologique et enjeux théoriques

Dans cette partie, nous présenterons en premier lieu les dispositifs dits de « substitution sensorielle »[68] ainsi que les habiletés cognitives que favorise chez l'aveugle ce type de médiation. Nous évoquerons ensuite le socle théorique et méthodologique sur lequel repose la conception de Tactos.

Tactos appartient à une famille technologique inaugurée par le TVSS de Bach-y-Rita (1972). Néanmoins, cette filiation n'est pas uniquement d'ordre technologique. L'un des apports fondamentaux du TVSS fut de mettre en évidence le rôle crucial joué par l'action dans la perception. Ce résultat est venu conforter le paradigme constructiviste auquel nous nous référons.

3.1.1 TVSS et Optacon : des technologies de référence

Dans les années 1960, Paul Bach y Rita a élaboré un dispositif innovant, le TVSS (Tactile Vision Substitution System), qui a ouvert de vastes perspectives de recherche sur la perception et la plasticité cérébrale (Bach-y-Rita, 1972) (voir annexe 4).

La substitution sensorielle désigne la capacité du système nerveux central à exploiter ces dispositifs pour élaborer de nouveaux modes de perception. Les systèmes de substitution sensorielle comportent trois éléments distincts[69] (Lenay, Gapenne, Hanneton, Marque & Genouel, 2000) :

1. Des capteurs artificiels qui convertissent une forme d'énergie (par exemple phototonique ou sonore) en signaux interprétables par le système électronique de couplage
2. Ce système électronique à son tour déclenche l'activation des stimulateurs

[68] Nous expliciterons plus loin pourquoi nous considérons plus pertinent d'employer l'expression suppléance perceptive plutôt que celle de substitution sensorielle.

[69] Ainsi, le PHANToM et Mimizu (voir parte 2.2), constituent des dispositifs « substitution sensorielle » ou plutôt de suppléance perceptive.

3. La stimulation générée s'adresse à des capteurs sensoriels naturels, disponibles et fonctionnels

Le TVSS convertit une image captée par une caméra vidéo en « une image tactile » restituée par une matrice. Dans la version standard du TVSS, la plage tactile comporte 400 « tacteurs », soit 20 lignes et 20 colonnes de solénoïdes de un millimètre de diamètre. La matrice peut être appliquée dans le dos, sur l'abdomen (voir Figure 15) ou encore sur le front.

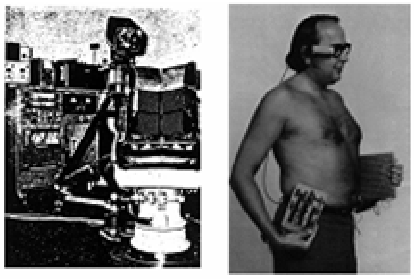


Figure 15 : Le TVSS d'origine et sa version portable

L'étude de la substitution sensorielle a permis de mettre en évidence deux résultats fondamentaux :

1. Le rôle de l'action dans l'émergence des percepts.

La perception d'un objet stable présent là-bas dans le monde exige les mouvements propres du sujet. Si la caméra est fixe alors le sujet ressent uniquement des stimulations sur la peau et se trouve dans l'incapacité d'identifier les formes présentées. Tandis qu'en manipulant la caméra, le sujet va pouvoir établir la relation entre ses actions et ses sensations : si la caméra se dirige de gauche à droite, les stimulations vont se déplacer dans le sens inverse. La latence d'identification baisse avec l'apprentissage. Dans l'identification de lettres, les six sujets aveugles qui ont participé à l'étude (ibid.) ont, en moyenne, donné leur première réponse correcte au bout de 52 secondes. Ce temps chute à 17, 14 et 10 secondes au cours des trois essais suivants. Lors de la reconnaissance d'objets usuels, l'apprentissage permet de réduire considérablement les temps de réponse. Le temps nécessaire aux premiers essais varie entre cinq et huit minutes. A l'issue de dix heures d'apprentissage, les latences de reconnaissance se situent entre cinq et 20 secondes. Les sujets aveugles appareillés du dispositif peuvent découvrir des phénomènes optiques comme la parallaxe, la perspective, l'agrandissement de

l'image. Lorsque la matrice tactile est transférée vers une autre partie du corps, par exemple du dos vers l'abdomen, alors l'adaptation est immédiate.

2. La mise en extériorité des percepts

Comme nous l'avons déjà signalé, lorsque les sujets découvrent le TVSS pour la première fois, la succession des stimulations produit un effet de « chatouillement ». Au terme d'un apprentissage perceptif, ces sensations sont oubliées au profit de la perception distale. Le comportement des sujets accrédite l'existence d'une mise en extériorité des percepts[70]. Par exemple, lorsque l'expérimentateur modifie le zoom de la caméra à l'insu du sujet, l'image soudainement grossie peut provoquer un geste d'évitement chez le sujet.

Bach-y-Rita (ibid.) compare l'expérience de la substitution sensorielle à l'apprentissage de la conduite automobile. Au début le conducteur est conscient de tous ses mouvements et la coordination des actions reste approximative. Les frontières du véhicule sont mal appréhendées et le conducteur considère ce dernier comme une entité étrangère. Avec l'expérience, les mouvements deviennent automatiques et inconscients. Le conducteur est en mesure de poursuivre une conversation tandis qu'il effectue les changements de vitesse. Il *« étend ses percepts aux frontières du véhicule, et l'automobile devient une extension de lui-même »*[71] (ibid., p. 106). Bach-y-Rita (ibid.) affirme la nécessité d'un apprentissage approprié en s'appuyant sur les observations de Gregory et Wallace (1963). Ces derniers ont analysé l'apprentissage perceptif d'un aveugle précoce qui recouvre la vue à 52 ans grâce à une opération de la cornée. Les auteurs font part de ses difficultés perceptives : son sens de l'espace était perturbé et son attention visuelle insuffisante. D'après Bach-y-Rita (1972), la lenteur de son apprentissage visuel provenait d'un manque de pratique dans l'exploitation des stimuli visuels.

Dans les études sur le TVSS, l'apprentissage est organisé de façon progressive. Il débute avec la perception de lignes et de formes simples, pour évoluer vers celles d'objets usuels puis aboutir à la reconnaissance de silhouettes, de photographies et de mouvements. Les sujets ressentent de la frustration lorsque la tâche proposée n'est pas encore appropriée à leur niveau d'habileté perceptive. Par conséquent, l'apprentissage avec le TVSS se faisait au rythme des sujets qui mettaient en œuvre leurs propres stratégies perceptives. Cet apprentissage graduel

[70] Cet aspect a été l'objet d'une partie importante du travail de doctorat de Auvray (2004).

[71] Traduction personnelle.

dans un environnement contrôlé se distingue radicalement de l'irruption violente et désordonnée du monde visuel chez les sujets aveugles qui font l'acquisition de la vision à la suite d'une intervention chirurgicale (Gregory & Wallace, 1963). Nous prolongerons les arguments de Bach-y-Rita à propos de l'importance de la mise en relation entre les sensations et les conséquences sensorielles de mouvements autoproduits.

Le principe sur lequel repose le TVSS a été étendu à d'autres dispositifs tels que l'Optacon, le TDU (Tongue Display Unit) (Kaczmarek & Bach y Rita, 1995 ; Bach-y-Rita, Kaczmarek, Tyler, Garcia-Lara, 1998).

- ***L'Optacon (Optical to Tactile Converter)***

Ce dispositif fut conçu en 1966 par la société Telesensory System[72] pour permettre aux aveugles de lire les lettres imprimées et manuscrites ainsi que les graphiques (Linvill & Bliss, 1971). L'information graphique captée par une caméra est restituée sur une plage tactile. De sa main droite (s'il est droitier), l'aveugle balaie le texte à l'aide d'une petite caméra. De son doigt gauche, l'aveugle reçoit la stimulation de la plage tactile. Dans la version I de l'Optacon (voir Figure 16), la plage tactile comporte 6 colonnes de 24 lignes contre 5 colonnes de 20 lignes dans la version II.

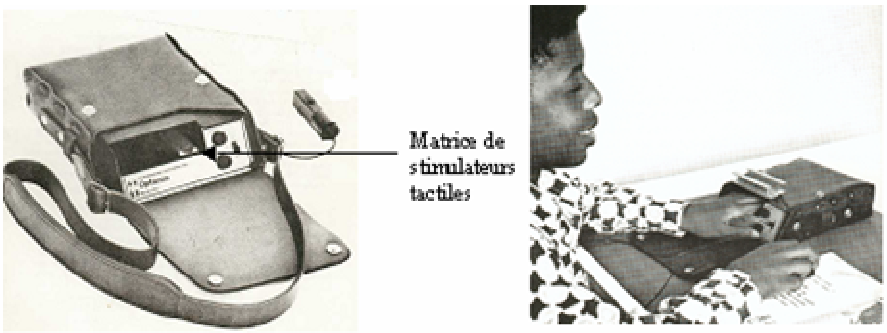


Figure 16 : L'Optacon et son usage

Miletic, Hughes et Bach-y-Rita (1986) ont conçu un programme éducatif qui utilise une version modifiée de l'Optacon afin de favoriser le développement de concepts spatiaux chez

[72] Signalons que la société Telesensory Systems a cessé de produire l'Optacon qui, du fait de son coût élevé, a obtenu un succès mitigé. La société Blazie envisage aujourd'hui de le distribuer à un prix plus accessible.

le jeune aveugle. Ce programme a été évalué par un groupe de 30 aveugles âgés de 8 à 14 ans et déjà familiers de l'Optacon. La plupart des sujets sont des aveugles congénitaux. La modification de l'Optacon a consisté en l'ajout d'une lentille au niveau de l'objectif de la caméra. Orientée verticalement, cette dernière peut se déplacer dans l'espace tridimensionnel. Elle est positionnée et maintenue sur le front du sujet. La matrice tactile placée sous la pulpe de l'index gauche comporte 6 colonnes et 24 lignes.

Le programme éducatif, enseigné individuellement, consiste en huit unités organisées selon un niveau de difficulté croissant. Chaque unité comporte des leçons visant un objectif spécifique (Tableau 2). Le passage à l'unité suivante nécessite au moins 80% de bonnes réponses. Les quatre premières unités sont consacrées au développement du control sensori-moteur. L'unité 5 cherche à favoriser la compréhension de l'espace tridimensionnel à travers quatre principaux phénomènes perceptifs :

1. La taille relative
2. L'interposition
3. La perspective linéaire
4. La reconnaissance de la structure d'un objet d'après ses mouvements

Les unités destinées aux applications servent à vérifier si les sujets sont capables d'exploiter les informations vibro-tactiles lors de l'exploration d'objets familiers, et à étudier l'éventuel effet de ces informations sur la connaissance spatiale de leur environnement. Des phénomènes tels que le mouvement, les flammes, les ombres, les images en miroir ont pu être appréciés grâce à cette version de l'Optacon. Les sujets ont également pu faire l'expérience de l'écriture et du dessin.

Les enfants ont mis entre 15 et 25 heures pour effectuer le programme, avec un temps de réalisation plus court chez les plus âgés. Les premières leçons ont été maîtrisées assez facilement. La perception des patterns tridimensionnels fut plus ardue. Les sujets ont été systématiquement interrogés sur leur perception des propriétés spatiales des objets : description des positions relatives et du type de mouvement (rotation ou translation), reconnaissance selon différents points de vue ou à partir d'indices limités. Les arrangements perçus étaient reproduits à l'aide d'un ensemble d'objets. Les habiletés perceptivo-motrices des plus âgés leur permettaient de percevoir des configurations plus complexes : une table et 4 chaises chez les 10-14 ans contre une table et deux chaises chez les 8-10 ans. Les sujets ont

spontanément cherché à comprendre des phénomènes distaux. Les adultes s'efforçaient de répondre à ces interrogations par des mises en scène utilisant l'Optacon. Par exemple, un sujet de 12 ans souhaitait savoir si les feuilles d'un arbre bougent dans la même direction lorsque le vent souffle. Les expérimentateurs reproduisirent le phénomène avec un arbre confectionné, et un ventilateur. L'image captée par l'Optacon permit au sujet de découvrir lui-même la réponse. De même, une adolescente de 13 ans n'arrivait pas à comprendre pourquoi le professeur, face à deux rangées d'élèves, ne pouvait pas voir la deuxième rangée. Une analogie de la situation fut présentée à l'aide de deux rangées de poupées. L'adolescente fit alors le commentaire suivant : *« je comprends pourquoi ma mère ne peut pas me voir lorsque je me trouve derrière le placard de la cuisine* »[73].

Unit I. Scanning strategies	
Lesson 1 :	Horizontal scanning
Lesson 2 :	Vertical scanning
Lesson 3:	Diagonal scanning
Lesson 4:	Curvature scanning
Test 1	(lessons 1-4)
Unit II. Recognition of lines and lines combinations	
Lesson 5 :	Recognition of straight lines of various length, width, and
Lesson 6 :	orientation
Lesson 7 :	Recognition of curved lines of various length, width, and
Lesson 8:	orientation
Test 2	Recognition of intersecting line combinations (straight lines)
	Recognition of intersecting line combinations (straight and curved lines)
	(lessons 5-8)
Unit III. Recognition of two-dimensional patterns	
Lesson 9 :	Recognition of simple geometrical shapes
Lesson 10 :	Recognition of geometrical shape combinations
Lesson 11:	Recognition of intersecting geometrical figures
Lesson 12:	Recognition of letters and numbers
Test 3	(lessons 9-12)
Unit IV. Movements of objects versus movements of self	
Lesson 13 :	Discriminating movements of objects versus movements of self
Lesson 14 :	Learning the skills of tracking
Lesson 15 :	Observation of movement (movement of familiar objects)
Lesson 16 :	"Eye-hand" coordination
Test 4	(lessons 13-16)
Unit V. Perception of three-dimensional space	
Lesson 17 :	Relative size
Lesson 18 :	Interposition
Lesson 19 :	Linear perspective

[73] Traduction personnelle.

Lesson 20 :	Recovery of an object's structure from motion
Test 5	(lessons 17-20)
Unit VI. Three-dimensional space : Applications	
Lesson 21 :	Viewing familiar objects
Lesson 22 :	Viewing familiar settings
Test 6	(lessons 21-22)
Unit VII. Three-dimensional space : Visuospatial phenomena	
Lesson 23 :	Flames
Lesson 24 :	Shadows
Lesson 25 :	Mirror images
Lesson 26 :	Movement (experiencing various forms)
Unit VIII. Three-dimensional space : Educational applications	
Lesson 27 :	Signature development
Lesson 28 :	Picture-drawing
Lesson 29 :	Body concept
Lesson 30 :	Mobility, mathematics, geography, biology & chemistry

Tableau 2 : « Educational program » (d'après Miletic et al, 1986)

Au cours d'une autre étude, spécifiquement consacrée à une tâche de coordination des points de vue, Miletic (1994 ; cité par Hatwell, 2003) a mis en évidence que la version modifiée de l'Optacon permet d'améliorer les performances chez des sujets aveugles précoces. Deux, puis trois objets géométriques différents sont disposés sur une plate-forme. Des aveugles et des malvoyants âgés de 13 ans participent à l'étude. Les sujets aveugles se divisent en deux sous-groupes : l'un explore la plate-forme manuellement, l'autre utilise la version modifiée de l'Optacon. Au cours de la phase d'apprentissage, le maniement du dispositif leur est enseigné. Lors de la phase expérimentale, on demande aux sujets de restituer le point de vue d'une poupée située soit sur leurs genoux, soit à côté soit à 45, 90, 135, 180, 225, 270 et 315°. Deux modes de réponse sont prévus :

1. Explication verbale
2. Reproduction du point de vue de la poupée.

Quel que soit le mode de réponse, les aveugles qui ont utilisé l'Optacon obtiennent des résultats significativement meilleurs que ceux qui ont exploré la plate-forme manuellement.

Avec le mode de réponse 1, les performances des malvoyants sont intermédiaires entre celles des deux sous-groupes d'aveugles sans toutefois se différencier significativement de ceux qui ont manié l'Optacon. Avec le mode de réponse 2, les aveugles équipés de l'Optacon n'obtiennent pas de résultats supérieurs à ceux des malvoyants. Le mode 1 a avantagé les

aveugles équipés de l'Optacon car ces derniers continuaient à percevoir la stimulation au moment où ils formulaient leur réponse.

L'auteur en déduit que les difficultés des aveugles dans des tâches spatiales telles que la coordination des points de vue provient de leur appréhension limitée de la disposition globale et du positionnement relatif des objets et non pas à de moindres aptitudes cognitives.

L'intérêt des dispositif de substitution sensorielles est double: d'une part, ils apportent une solution technique utile et d'autre part, ils constituent un outil épistémologique qui met en lumière le rôle de l'action dans la perception et qui permet d'observer la genèse d'une nouvelle modalité perceptive (Lenay et al., 2000). D'après ces auteurs, il est plus pertinent de qualifier ces outils de technologie de suppléance perceptive car:

1. Si substitution il y a, elle n'est pas sensorielle.
2. Il ne s'agit pas à proprement parler d'une substitution

1 . Le TVSS ne se contente pas de substituer à l'entrée visuelle une entrée tactile. En effet, si on présente au sujet des formes tactiles, celui-ci est dans l'incapacité de constituer des percepts. Comme la perception n'est rendue possible que par l'engagement propre du sujet alors le TVSS n'opère pas une substitution sensorielle mais une substitution sensori-motrice.

2 . Le terme de substitution est lui même contestable : ce dispositif de couplage bien qu'il permette la réalisation de tâches particulières ne peut rivaliser avec la richesse de l'expérience visuelle. Ces dispositifs ouvrent sur un espace de perception inédit, un nouveau possible et n'opèrent pas de remplacement d'une modalité par une autre.

Les travaux de Bach-y-Rita questionnent le paradigme classique de la cognition développée sur le modèle de l'ordinateur et selon lequel l'information déjà présente dans le monde est passivement reçue puis traitée. Effectivement, ses expériences semblent apporter une preuve empirique au fait qu'il n'y a pas de perception sans action. La théorie des lois de contingences sensori-motrices (O'Regan & Noë, 2001) vient développer cette idée. D'après ces auteurs, le sujet perçoit non pas les invariants de la sensation mais les invariants dans les boucles sensori-motrices. En d'autres termes, c'est par ses propres actions que le sujet construit des lois de co-variation entre les réponses motrices et les entrées sensorielles résultant d'autres réponses motrices.

3.1.2 Le minimalisme : un principe pour comprendre et concevoir

A l'Université de Technologie de Compiègne, au sein du Groupe Suppléance Perceptive, a été développé un dispositif haptique minimal[74] (Tactos) qui fournit également des arguments à la thèse selon laquelle la perception se construit dans le couplage entre actions et sensations (Lenay, 1997). Du fait de son état de développement initialement restreint, Tactos permet de suivre précisément l'émergence de nouveaux percepts. La conception de ce dispositif s'appuie ainsi sur une option méthodologique, qui s'avère être également un principe de conception : le minimalisme.

Pour établir un lien entre une cause supposée et ses effets, la méthode expérimentale réduit la complexité d'une situation en neutralisant certaines variables. Employer un artefact qui appauvrit considérablement le couplage humain/environnement ou humain/instrument sert cette finalité qui consiste à simplifier pour mieux comprendre. Ainsi Lenay (ibid.) a initialement utilisé un dispositif de substitution simplifié à l'extrême pour mettre en évidence le fait qu'il n'y a pas de perception sans action. Le dispositif en question comporte une unique cellule photoélectrique fixée sur un doigt de la main droite tandis qu'un seul vibreur tactile est placé sur l'autre doigt. Le stimulateur réagit en tout ou rien. Après quelques minutes d'exploration engageant le bras et la main sur laquelle est fixée la cellule, le sujet réussit à localiser une cible lumineuse. Grâce à la succession des sensations tactiles générées par ses mouvements propres, le sujet perçoit l'existence d'un objet distal. *« La perception exige une activité permanente consistant à osciller la main en changeant la position du poignet, de sorte que la stimulation apparaisse et disparaisse sans cesse »* (Lenay, Gapenne, Hanneton, Marque & Genouel, 2000, p. 296). Une nouvelle boucle sensation-action s'élabore dans le couplage minimal qui lie l'humain à son environnement (voir Figure 17).

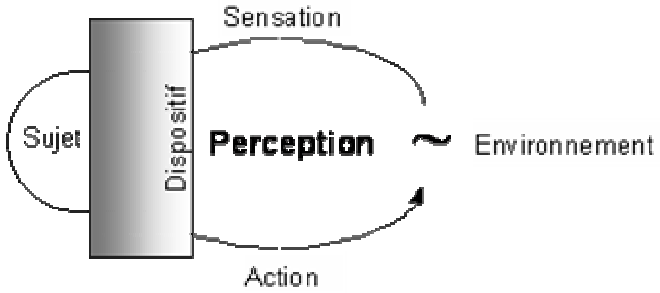


Figure 17 : Dispositif de couplage sensori-moteur (d'après Lenay, Gapenne, Hanneton et Stewart, 1999)

[74] La plage tactile comporte deux cellules braille (voir Figure 18) au lieu des 400 du TVSS

Ainsi, en réduisant la stimulation à sa plus simple expression, l'expérience de Lenay (ibid.) vient renforcer la thèse de Bach-y-Rita (). En outre, ce protocole exacerbe l'action propre du sujet. L'alternance entre stimulation et absence de stimulation associée à un mouvement de triangulation de la main pallient la pauvreté du signal.

Ainsi, le minimalisme a permis de déterminer les conditions nécessaires et suffisantes de l'émergence des percepts. En outre, il a contribué à rendre visible ce qui se trouve incorporé dans un couplage humain environnement plus riche. L'objet distal que la rétine capte dans son intégralité (à l'issue de rapides mouvements exploratoires) exige ici une oscillation constante et continue. De même, l'image restituée grâce à la plage de stimulateurs du TVSS rend disponible sous une forme bidimensionnelle les attributs spatiaux de l'environnement. Dans le cas d'un codage en tout ou rien, l'accès à la présence, à la forme et au positionnement des objets exige théoriquement un nombre accru de mouvements de va-et-vient sur l'objet et entre les différents objets.

Le minimalisme qui s'avère être un principe épistémologique peut servir de principe de conception et ce pour deux motifs :

Le premier n'est qu'une réédition de la réduction expérimentale. On peut supposer que si la prothèse est proposée dans sa forme la plus élémentaire alors il sera plus facile de découvrir ce qui dans les caractéristiques humaines et/ou matérielles rend possible le déplacement du pouvoir d'agir et pointer ainsi les déterminants de la faisabilité de la tâche.

Le deuxième est d'ordre technique : le minimalisme revient à privilégier la forme la plus épurée à la fois pour des raisons de coût, de transportabilité et de facilité d'utilisation (dans la mesure où la sobriété du design induit la simplicité du mode d'emploi). Une fois que la faisabilité de la tâche est acquise, il reste à décider de l'enrichissement de l'interface en fonction des gains en efficacité escomptés.

3.1.3 Connaissance de l'action et conception : choix d'un cadre d'analyse

On peut qualifier de clinique l'approche adoptée dans cette étude et en ce sens notre travail entretient une proximité avec la démarche proposée par Yves Clot (1999). Cette dernière relève d'une épistémologie de la constitution active et présente les particularités suivantes :

- Elle rejette tout réductionnisme cognitif aussi bien en s'affranchissant du modèle de l'ordinateur qu'en évitant de réduire l'activité psychologique à des processus strictement mentaux.
- Elle pointe les invariants du développement
- Elle contextualise les activités

Si en poursuivant une autre finalité autre que la connaissance en soi, le chercheur risque de se fourvoyer, la clinique de l'activité constitue une méthode qui permet de concilier à la fois les exigences de l'intervention et celle des investigations scientifiques. Clot (2004)[75] en fait à la fois un instrument d'action et un instrument de connaissance. Elle se distingue des méthodes classiques de l'analyse de l'activité en ce qu'elle porte non pas tant sur les invariants de l'action, ou encore schème dans la terminologie piagétienne, mais sur la structure de développement de l'activité *« l'objet de connaissance est moins l'activité que le développement de l'activité et ses empêchements »* (ibid.). Le détour par *« l'expérience de la transformation »* permet de mettre en évidence les lois psychologiques de son développement et de révéler au delà *« des invariants du fonctionnement celui des invariants du développement lui-même »* (ibid.).

Clot (1999) plaide pour une troisième voie entre la psychologie de la cognition et la psychologie de la subjectivité développée dans la tradition phénoménologique. Cette voie espère dépasser le dilemme entre psychologie des fonctions élémentaires dont la visée est généralisatrice et celle qui explore le vécu dans sa singularité. D'après Chartrier et Lautrey (1992 ; cités par Clot, 1999) la difficulté serait même de l'ordre du paradoxe : « *soit étudier de façon techniquement satisfaisante des processus élémentaires, tout en sachant que l'essentiel ne se trouve probablement pas là, soit étudier le niveau d'intégration le plus déterminant pour l'efficacité du fonctionnement cognitif, tout en sachant qu'il se prête mal, dans l'état actuel de l'art, à la réfutation empirique »* (p. 36). Des reconsidérations épistémologiques sont nécessaires pour contourner ce paradoxe. Cependant les choix méthodologiques risquent d'aller à contre-courant des approches scientifiques traditionnelles. Par exemple Amalberti et Valot (1990) ont, à partir d'un cas expert appelé *« paradigme de Joseph »,* élaboré un système d'aide s'inspirant du style d'un seul opérateur et les mêmes auteurs ajoutent que « *notre culture scientifique expérimentale justifie même pour les applications industrielles, d'étudier plus d'individus sommairement, plutôt qu'un seul*

[75] http://www.activites.org/v1n1/clot.pdf

individu cliniquement et dans le détail. Cette attitude dans le cadre particulier de l'expertise n'est pas forcément pertinente » (p. 326). Les critères de scientificité comme la prédictibilité, la généralisation des résultats, leur répétitivité sont alors à renégocier.

Une psychologie à la fois « compréhensive » et une psychologie « explicative » et prédictive mettrait à jour les déterminants de l'activité et ce qui fonde sa spécificité. Il s'agit de révéler, à travers les régimes d'actions retravaillés par le sujet, les mécanismes de production de l'activité: *« Comment l'activité du sujet produit-elle l'efficience et le sens de sa conduite ? Comment l'action se forme-t-elle avec et contre ses présupposés ? Selon quels procédés un genre social est-il « repris » par les sujets à l'épreuve de quelle zone de développement potentiel ? »* (Clot, 1999, p. 139). Les traces laissées par le sujet dans le milieu offrent une voie d'accès à l'organisation de l'action. Ces traces, qui sont de nature diverse (catachrèses, conflits de normes, verbalisations), sont capturées à l'aide de dispositifs d'observation. L'utilisation d'appareil d'enregistrement autorise des *« méthodologies d'observation différée»* telle que l'auto-confrontation. Cette méthodologie[76] consiste à filmer les opérateurs puis à leur demander de commenter le film de leurs propres activités, ou celles d'un collègue dans le cas de l'auto-confrontation croisée (Clot, Faita, Fernandez & Scheller, 2001). A ce niveau, Clot (1999) introduit les concepts de genre et de style pour rendre compte de l'activité. Le genre correspond à l'ensemble des règles de production et d'usage plus ou moins codifiées. Il participe des présupposés de l'action que sont : d'une part *« la morphologie sociale et matérielle » (p. 164)* et d'autre part *« l'activités des autres et ses autres activités » (p.167)*. Le style introduit une distance entre le sujet et son travail. Cet affranchissement de l'action rend possible son ajustement et signe l'appropriation psychologique des procédures : *« le style est une modulation du genre » (ibid.).* La définition est « située » pour rendre compte de la variabilité du style aux situations et de sa référence au genre. Clot (ibid.) ne l'envisage pas comme un attribut psychologique du sujet. L'auteur réédite le principe de la double orientation de la genèse instrumentale[77] (Rabardel, 1995) : l'instrumentation *« orientée* sujet » et l'instrumentalisation *« orientée* objet » et, l'applique au genre : instrumentation d'un sujet par un genre et instrumentalisation d'un genre par le sujet. Il propose ensuite de faire du style,

[76] Nous avons la possibilité d'enregistrer les trajectoires perceptives ce rend possible un accès et une analyse différée de l'activité. En revanche, l'auto-confrontation semble difficile à mettre en œuvre avec des sujets aveugles.

[77] L'instrumentation est le processus par lequel le sujet adapte ses schèmes à l'artefact. L'instrumentalisation est le processus d'évolution de l'artefact (voir partie 2.1.2.1).

à l'instar de l'artefact, une entité traversée par deux processus : subjectivation d'un sujet par un genre et subjectivisation du genre par le sujet. Clot (1999) voit dans les schèmes une pré-organisation de l'action singulière.

Par ailleurs, la question du sens des activités implique nécessairement celui des affects : *« regarder l'activité d'un sujet comme un attribut personnel relève de la science fiction ».* Clot (ibid., p.172) se réfère à Vygotski (1994) pour qui *« toute activité suppose la présence d'un besoin affectif »* (p .203). A l'occasion d'une série d'expériences Vygotski (ibid.) révèle comment la modification du sens de l'action amène l'enfant à poursuivre son activité de dessin en dépit de l'appauvrissement de la situation. On lui demande alors d'expliquer à un autre enfant comment s'y prendre : *« le sens de la situation déterminait totalement, pour l'enfant, la force du besoin affectif indépendamment du fait que cette situation perdait progressivement toutes les propriétés attrayantes venues du matériel et de la manipulation directe de celui-ci »* (ibid., pp. 231-232). Si, dans notre étude, nous n'appréhendons pas directement cette dimension de l'activité, il nous faut préciser que l'engagement et la motivation des sujets ont été des éléments moteurs dans la poursuite du projet. En effet, la participation à un projet qui concerne la communauté des aveugles, sa présentation projet aux parents et à l'institution, la régularité, la fiabilité des rencontres sujets-expérimentateurs ont contribué à l'adoption du dispositif par les collégiens. La difficulté voire l'impossibilité de proposer un accompagnement affectif lors du lancement d'un produit technologique inédit constitue fréquemment une limite à sa diffusion.

Dans la partie suivante, nous présenterons la mise en place de l'étude. Notre analyse étant centrée sur la genèse perceptive (dimension développementale de l'activité) et la structuration de l'action, nous avons opté pour un suivi longitudinal et approfondi des sujets. Ces derniers sont envisagés dans leur singularité et situés les uns par rapport aux autres : il s'agit de pointer des divergences et des convergences dans les stratégies mises en œuvre par les sujets.

Si on se réfère à l'opposition terrain/laboratoire (Leplat, 1986), notre étude se positionne entre ces deux pôles : étant donné que les sujets sont vus dans leur environnement familier et qu'une partie des séances s'effectue en situation non contrôlée (petits jeux, entraînements informels) la cadre général est plutôt celui du terrain. Néanmoins, notre dispositif, de part son minimalisme, s'éloigne de l'écologie de lecture de forme sur support traditionnel tandis qu'il

constitue une réduction compatible avec une démarche expérimentale[78]. La clinique de l'activité a ceci de particulier qu'elle se réalise dans un environnement appauvri par rapport à la situation visée (cours de mathématiques) et avec un couplage volontairement restreint. Ajoutons que ce couplage ne subit aucune modification tout au long de l'étude.

[78] A ce propos, il nous faut ajouter qu'au sein du Groupe Suppléance Perceptive, des expériences en laboratoire sont menées avec des groupes de sujets voyants.

3.2 Contexte de l'étude

Il nous faut préciser que, préalablement au lancement de ce projet, une longue phase d'immersion (un an et demi) a été réalisée au sein du Centre Normandie Lorraine (CNL). Pendant cette période, les chercheurs ont pris connaissance de l'institution et ont explicité le projet de recherche à l'ensemble de ses membres et ce, afin d'installer tous les partenaires dans une interaction signifiante. Cette approche a été poursuivie lors de la mise en place du projet en tant que tel lors de rencontres avec des représentants de l'Education Nationale (inspecteur pédagogique, principaux de collège et professeurs), les parents (et plus généralement la famille) et les collégiens[79]. En outre, notre étude s'inscrit dans un projet plus large qui bénéficie depuis septembre 2003 d'un financement de l'ACI Ecole et Sciences Cognitives. Il implique plusieurs partenaires que sont :

* Le Groupe Suppléance Perceptive (Costech UTC)
* Le Centre Normandie Lorraine (CNL)
* Le Laboratoire Psy.Co (Université de Rouen)
* La société Odile Jacob Multimédia

Parallèlement, un travail de nature exploratoire et préparatoire a été réalisé auprès de deux sujets adultes aveugles. Il s'agissait, d'une part, de s'assurer de l'utilisabilité de l'interface Tactos par une personne aveugle et, d'autre part, de vérifier la faisabilité d'une tâche de lecture d'objets mathématiques activité qui constituait de ce projet. Cette phase a également été l'occasion d'améliorer l'ergonomie du logiciel.

Le suivi des collégiens a été réalisé à la fois au CNL et dans des collèges de la région rouennaise. Le CNL, situé dans la banlieue de Rouen, est une structure, sous tutelle de l'Education Nationale, spécialisée dans l'accueil et le suivi de jeunes amblyopes et aveugles. La grande majorité des enfants et adolescents sont intégrés en milieu scolaire dit «normal» où ils bénéficient d'un suivi hebdomadaire. Le centre constitue ainsi un centre de ressources humaines (professeurs, éducateurs, psychologues…) et techniques (impression de documents en braille).

[79] Les collégiens avec qui nous avons interagi dans le cadre de ce projet ont été proposés par le CNL au regard de critères scolaires, sociaux et médicaux. Le projet leur a été présenté au cours de plusieurs rencontres lors desquelles ont été précisé les enjeux, les intérêts et les contraintes de leur participation et leur engagement.

La temporalité de l'étude en tant que telle a été définie afin d'appréhender l'appropriation du dispositif à travers l'évolution de l'activité exploratoire. La méthodologie n'ambitionne pas de mesurer et de généraliser des effets mais de comprendre comment l'appropriation de Tactos se manifeste dans la réussite des tâches et la poursuite de l'activité. De ce point de vue, le minimalisme permet d'explorer de façon précise et efficace des possibilités de genèse perceptive. « L'expérience de transformation » est saisie doublement à travers l'évolution des capacités perceptives mais également en comparaison avec une situation traditionnelle (voir section 3.6).

Les six sujets ont été rencontrés dans leur environnement familier (centre, collège, domicile) à raison d'une séance hebdomadaire d'une heure.

3.3 Sujets[80]

3.3.1 Les partenaires aveugles adultes

Les deux adultes sont associés au projet Tactos depuis son lancement en 1999. Les chercheurs du Groupe Suppléance Perceptive (GSP) qui souhaitaient alors rencontrer des personnes aveugles avaient pris contact auprès du club informatique de l'Association Valentin Haüy. Une version de Tactos fut installée et mise à la disposition des utilisateurs de la salle informatique. Lors des démonstrations, les deux adultes se sont montrés particulièrement intéressés par les recherches fondamentales et appliquées menées autour du dispositif. A l'issue de ces échanges sur la démarche scientifique du GSP et les perspectives de développement de la plate-forme Tactos, une collaboration étroite s'est nouée. Les deux adultes ont accepté de contribuer par leur savoir et leur expérience de vie au développement du projet. Une des premières versions du dispositif Tactos leur fut fournie et nous leur envoyions des images à explorer. Au démarrage de ce travail de thèse, les sujets adultes sont déjà familiers du dispositif.

- ***L'adulte 1***

L'adulte 1 est aveugle tardif. Agé de 51 ans, il a perdu la vue à 30 ans à la suite d'un décollement de rétine. Diplômé d'un BTS d'électronique informatique, il a été programmeur pendant quatre ans. Il dispose également d'une formation de kinésithérapeute. Il donne actuellement des cours d'initiation à l'informatique au sein d'une association. Ses compétences informatiques et son expertise sur l'utilisation du matériel bureautique par les aveugles ont été particulièrement précieuses pour la conception de l'interface. Il a également été consulté pour le design du stylet tactile.

- ***L'adulte 2***

L'adulte 2, âgée de 54 ans, est aveugle de naissance, avec une légère perception des variations d'intensité lumineuse. Sa scolarité a été effectuée au sein de l'INJA (Institut National des Jeunes Aveugles). En seconde, elle a rejoint le lycée parisien Victor Duruy. Après une terminale littéraire, elle a suivi des études de droit puis des études de psychologie à

[80] Les informations relatives aux sujets, notamment l'âge, correspondent aux informations dont nous disposions au début de l'étude.

l'Université Paris VII où elle a obtenu sa maîtrise de psychologie clinique. Ses considérations sur le dispositif et les mécanismes perceptifs ont alimenté le travail pluridisciplinaire du groupe. Lors de sa formation académique, elle exécutait sa prise de notes à l'aide de la tablette braille et du magnétophone. En cours de mathématiques, les enseignants employaient le cube à rythme et dans une moindre mesure des courbes en relief mais « *les bons élèves en géométrie, y arrivaient par l'abstraction* ». L'accès à la documentation universitaire se faisait par l'entremise d'étudiants bénévoles qui enregistraient les textes sur cassettes.

3.3.2 Les collégiens

Nous avons travaillé avec deux collégiens (collégiens 1 et 3) en intégration et deux dont la scolarité s'effectue au Centre Normandie Lorraine (collégiennes 2 et 4). Le collégien 1 et la collégienne 2 sont aveugles tardifs, les deux autres collégiennes sont aveugles de naissance.

- ***Le collégien 1***

Né avec une maladie de Coates, il a perdu la vue à l'âge de 19 mois[81]. Agé de 13 ans, il est en classe de cinquième, en intégration dans un collège de la région rouennaise. Les professeurs de mathématiques et de géographie du Centre Normandie Lorraine lui donnent régulièrement des cours de soutien au collège. Son parcours scolaire se déroule sans difficultés particulières. Il est très autonome avec les outils numériques mis à sa disposition : Scriba 40, ordinateur équipé de Tactos et de la synthèse vocale, imprimante. Il manifeste un intérêt pour la technologie et souhaite devenir informaticien.

- ***La collégienne 2***

Aveugle tardive, elle a perdu la vue à cinq ans suite à un accident de voiture. Sa scolarité a été très perturbée. Agée de 14 ans, elle est en classe de cinquième au CNL.

- ***La collégienne 3***

Aveugle complète de naissance, elle est en intégration en classe de cinquième dans un collège de la région rouennaise. Elle suit le cursus scolaire sans problème particulier.

- ***La collégienne 4.***

[81] Ce collégien, au regard des définitions officielles, est considéré comme un aveugle tardif compte tenu que sa cécité est intervenue après le deuxième semestre de la première année.

Agée de 12 ans, elle est aveugle de naissance. Elle présente néanmoins une sensibilité réelle aux modulations d'intensité lumineuse qu'elle peut exploiter dans certaines situations. Elle effectue, comme la collégienne 2, sa scolarité au Centre Normandie Lorraine.

3.4 Le matériel

3.4.1 Tactos

Le logiciel est composé de différents éléments matériels à savoir un ordinateur, un boîtier de cellules braille, une tablette graphique et un stylet (voir la Figure 18). Par ailleurs un composant logiciel permet d'interfacer ces différents éléments.

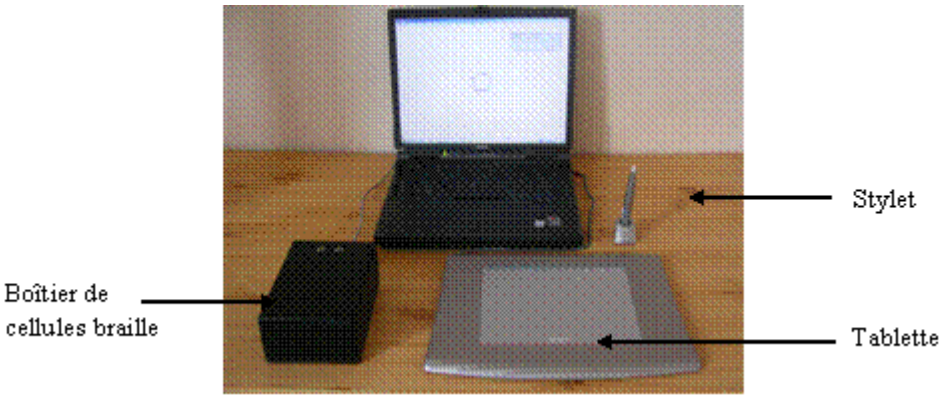


Figure 18 : Ensemble du dispositif de suppléance perceptive (version III)

La Figure 19 montre un voyant aveuglé utilisant Tactos. De sa main dominante, il dirige le stylet sur la tablette tandis que sa main non dominante reçoit la stimulation tactile.

Figure 19 : Utilisation de Tactos par un voyant aveuglé

Le boîtier braille

Les premières versions du boîtier braille comportent deux cellules braille de taille standard qui forment une plage tactile d'une surface de 0,8 x 1 cm². Les 16 picots peuvent être contrôlés indépendamment. Précisons que l'espace entre deux picots d'une même cellule est de 1,5mm tandis que l'espace entre deux picots contigus appartenant aux deux cellules différentes est de 2,5mm. Cet écart ne semble pas affecter la perception[82]. Plusieurs versions du boîtier braille ont été élaborées afin d'améliorer sa transportabilité. Lors de notre étude longitudinale, nous avons principalement utilisé la version III (voir Figure 18). Le boîtier comporte quatre cellules braille mais seules les deux premières cellules ont été utilisées[83].

Notre principe de conception minimaliste nous a amenés à restreindre la taille et le nombre de stimulateurs de la plage tactile. La fréquence de vibration des cellules braille est de 6Hz. Elle correspond à la bande de fréquence qui stimule les récepteurs de Meissner (de type I à adaptation rapide) et de Merkel (de type I, à adaptation rapide). Ces récepteurs cutanés (voir annexe 5), dont la densité est maximale au niveau de la pulpe des doigts, sont sensibles aux propriétés spatiales des objets. Les récepteurs de Meissner codent les détails spatiaux et les déformations de la peau. Les récepteurs de Merkel captent les informations relatives à la texture et aux contours des objets.

La tablette graphique et le stylet[84]

De façon standard, la tablette graphique (Wacom Intuos II) procure à l'utilisateur la possibilité de déplacer un curseur à l'écran modulo le déplacement d'un stylet à la surface de la tablette. Nous avons ajouté à ce fonctionnement de base la possibilité de spécifier les propriétés du pointeur ou curseur. Ainsi, à la pointe du stylet est positionné un champ récepteur virtuel dont on peut modifier la taille, la forme et le nombre de champs

[82] Le TVSS avec ses 400 stimulateurs répartis en quatre plages de 100 points présente ce type de disparité dans l'écartement : l'espace entre stimulateurs d'une même plage mesure 0,5 pouce, tandis que la distance entre deux stimulateurs adjacents de deux plages différentes est de 1,5 pouces. Dans les expériences de Bach-y-Rita (1972), cette différence, non remarquée par les sujets, ne perturbait pas leur activité perceptive.

[83] La conception d'un stylet intégrant des cellules braille est actuellement à l'étude (voir conclusion)

[84] Nous avons préservé le stylet au profit d'autres périphériques tels que souris, trackball, touchpad et clavier ; ce choix reposant sur les résultats obtenus par Sribunruangrit (2004) montrant que le stylet est à la fois le plus précis et le plus rapide de ces outils dans l'environnement Tactos.

élémentaires[85]. La pointe du stylet correspond au milieu du champ récepteur. Lorsque le champ récepteur, déplacé par les mouvements du stylet sur la tablette graphique, croise la forme alors la stimulation tactile est activée. Il est possible de définir la relation entre la matrice de champs récepteurs et celles de stimulateurs. Dans la Figure 20, le champ récepteur consiste en une matrice carrée de quatre champs élémentaires. Le champ élémentaire 1 est associé au picot de la première ligne et de la première colonne. Le champ élémentaire 2 est associé au picot de la première ligne et de la deuxième colonne. Lorsque le champ élémentaire rencontre un pixel coloré alors le picot correspondant va se soulever. Des études montrent (Gapenne, Lenay, Stewart, Bériot & Meidine, 2001 ; Sribunruangrit, 2004) qu'avec une matrice qui comporte plusieurs champs élémentaires les performances perceptives sont meilleures que dans la condition mono champ. C'est la raison pour laquelle, au cours de ce travail, nous emploierons uniquement des matrices à 16 champs élémentaires. Ainsi, les situations proposées constituent un enrichissement par rapport au minimalisme initial.

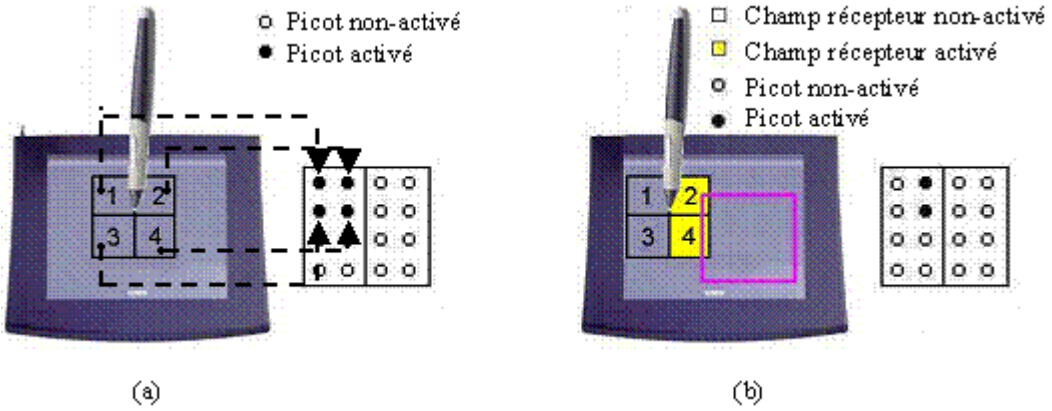


Figure 20 : a) Relation entre la matrice de champs récepteurs et la matrice de stimulateurs tactiles, b) principe du système de détection-stimulation. Schéma explicatif (d'après Sribunruangrit, 2004)

La Figure 21 illustre la relation entre le champ récepteur (une matrice carrée de 16 champs élémentaires) et la stimulation tactile lors de l'exploration d'un triangle rectangle. Aussi, comme on peut le comprendre l'activation des picots indique un contact partiel avec la figure (l'exploration de la figure est par conséquent séquentielle) et ne relève en aucun cas d'un

[85] Les champs récepteurs virtuels que nous utilisons sont souvent composites autrement dit ils sont constitués de n champs élémentaires.

codage braille. Les cellules braille ne sont donc utilisées ici qu'au titre de stimulateurs tactiles.

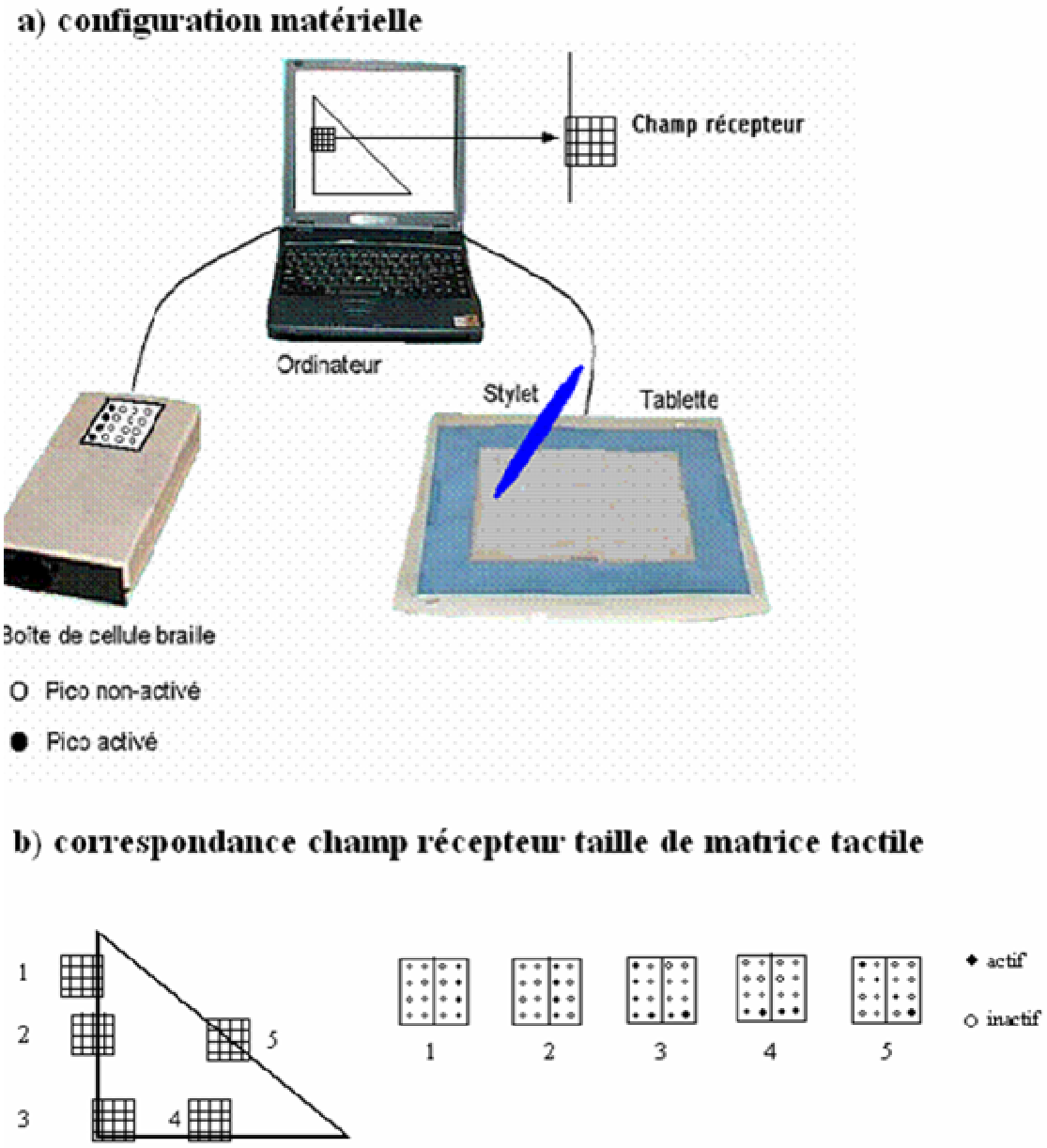


Figure 21 : Relation entre le champ récepteur et la stimulation tactile pendant l'exploration du triangle. Schéma illustratif (d'après Sribunruangrit, 2004).

L'interface logicielle Tactos (voir la Figure 22) s'organise en différents menus :

* Par le menu *fichier*, l'utilisateur active et désactive l'enregistrement de la trajectoire exploratoire.

* Le menu *effecteur* sert à paramétrer le logiciel en fonction de l'effecteur choisi (stylet, souris, touchpad) et à passer au mode écriture.

* Le menu *champ récepteur* permet de sélectionner un champ récepteur dans un répertoire.

* Par le menu *image*, l'utilisateur accède à un répertoire d'images prédéfinies.

* Le menu *stimulation sensorielle* permet de définir le type de stimulation (tactile et/ou sonore).

* L'utilisateur passe par le menu *tâche de fond* s'il souhaite utiliser Tactos en dehors de sa fenêtre. Par exemple, pour pouvoir explorer une image sous Géoplan (voir annexe 3) ou dans tout autre logiciel, le passage en mode « tâche de fond » est nécessaire.

Les fonctions sont toutes activables par des raccourcis clavier[86].

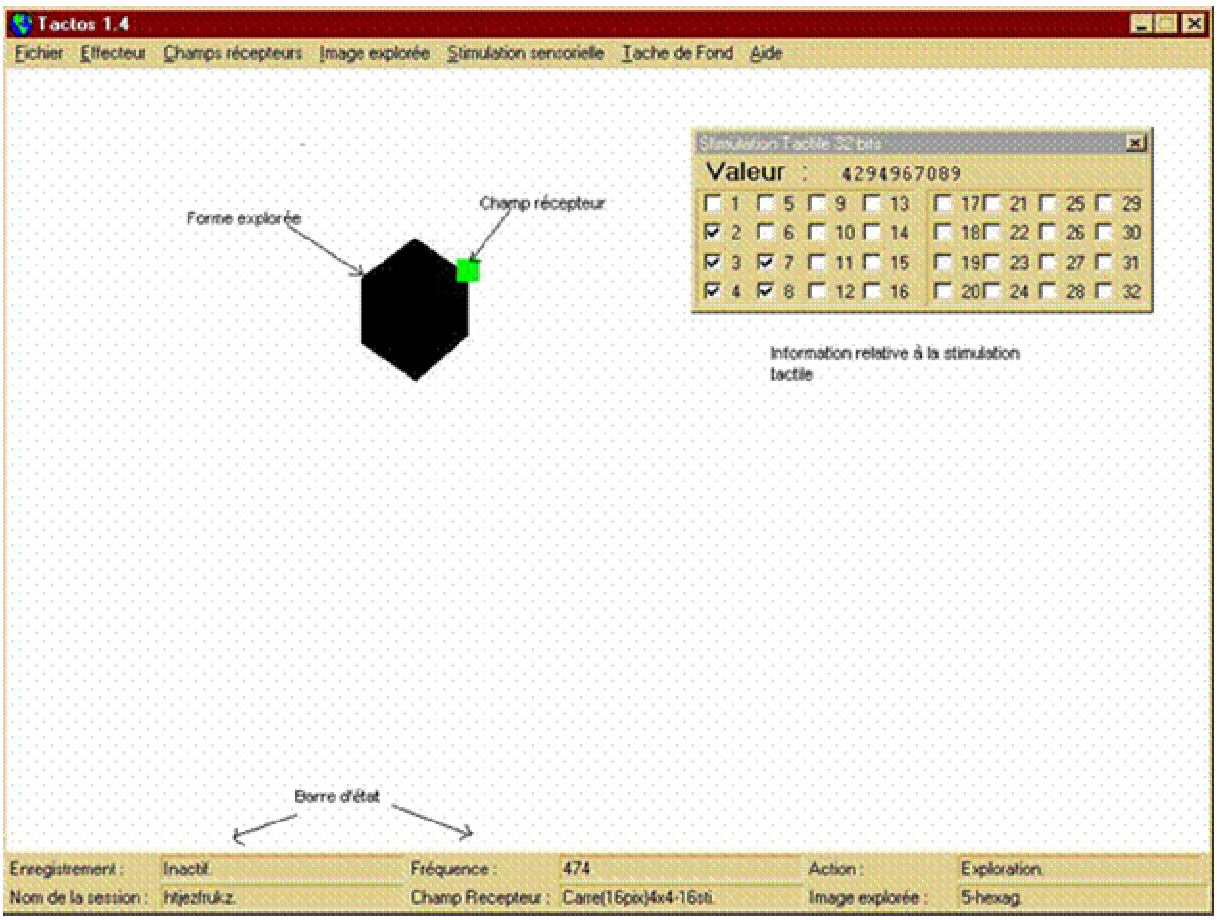


Figure 22 : Interface Tactos

[86] La structuration des menus, la présentation de la barre d'état ainsi que la définition des raccourcis clavier ont été améliorées grâce aux suggestions de l'adulte 1. Ainsi, les raccourcis claviers ont été définis pour être cohérents avec les raccourcis Windows et ceux de Jaws et faciliter leur mémorisation. Par exemple, le raccourci « cntrl I » permet de sélectionner une image et « cntrl C » un champ récepteur.

3.5 Etudes exploratoires et préparatoires auprès de deux adultes aveugles

Ces études exploratoires ont eu pour objectif d'évaluer et de valider la faisabilité de deux tâches de perception de formes mathématiques (lecture d'une courbe dans un repère et lecture de figures géométriques simples). Pour atteindre cet objectif, les deux sujets ont été d'une part, familiarisés avec le dispositif (matériel et logiciel) et, d'autre part, entraînés à la reconnaissance de formes élémentaires telles que des segments de droites rectilignes ou curvilignes. Ainsi, en prévision des évaluations finales (voir 3.5.6), nous avons proposé aux sujets, lors de quatre situations d'étude (voir 3.5.2, 3.5.3, 3.5.4 et 3.5.5) des tâches inspirées des travaux de Szeminska, Inhelder et Piaget (1970) qui visent la perception de propriétés figurales :

* Tâches de discrimination angles/courbes.
* Tâches d'évaluation de longueurs et de représentation de position.
* Tâches de conservation des longueurs.

3.5.1 Séances[87] de travail introductives

La séance 1 fut l'occasion d'une première rencontre et de l'installation de Tactos. A la séance 2, la doctorante a exposé l'objet de son travail, tandis que les deux partenaires aveugles lui ont fait par de leurs parcours professionnels. A la séance 3, il fut question de l'utilisabilité de l'interface. L'adulte 1 et l'adulte 2 ont été invités à faire part de leur appréciation du logiciel. Un premier recueil des difficultés posées par les différents objets de l'interface et des conflits entre le logiciel et la synthèse vocale a été réalisé et transmis aux ingénieurs. Ce fut l'initiation d'un travail systématique d'amélioration entrepris avec l'adulte 1.

La séance 4 fut consacrée à l'identification de figures simples prédéfinies. Elle sert à recueillir un premier aperçu de ce que les sujets sont en mesure d'accomplir avec des formes géométriques variées.

[87] Une séance est une période de travail et d'observation d'une durée d'une heure environ qui se déroule au domicile des sujets.

- ***Matériel***[88]

La matrice utilisée est un carré de 16 champs élémentaires chacun ayant une surface de 4x4 pixels. La surface totale de la matrice est ici de 16x16 pixels (voir Figure 23)

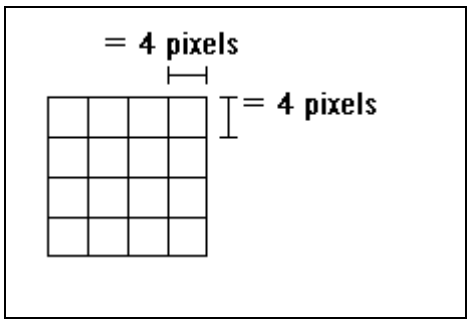


Figure 23 : Matrice M4

- ***Procédure***

Le temps d'exploration est libre. Le sujet est placé sur la forme.

Tâche : identification de sept formes géométriques.

Consigne : Explorer la figure puis la nommer.

- ***Résultats***

Les réponses des sujets sont présentées dans le Tableau 3.

	Sujet 1	Sujet 2
Triangle	« Un L .»	« C'est pas un carré, euh…c'est un carré.»
Droite inclinée	« Un rectangle penché de 2 cm de large. »	« Oh, il y a une grande ligne, une diagonale, enfin une variante de la droite hyperbole, parabole »
Cercle vide	« Un pont dont l'épaisseur est de 2 mm. »	« C'est un cercle, non ce n'est pas un cercle »
Un angle	« Trois segments qui se touchent. »	« Deux segments ». La forme lui évoque une tige.
Carré	« Un rectangle dont le premier tiers est plein, le deuxième vide et le troisième plein »	*Un problème technique survient : l'assistant Windows de l'ordinateur se déclenche et entre en conflit avec le logiciel Tactos. Le stylet ne répond plus.*
Pentagone plein	« Un triangle ». (au bout de 5mn d'exploration)	*Idem*

[88] Dans les expériences suivantes nous utiliserons la même interface et la matrice M4.

Hexagone plein	« Je ne sais pas ».	*Idem*

Tableau 3 : Réponses verbales données par chaque sujet pour chacune des figures présentées

Cette séance donne une première idée des difficultés perceptives auxquelles sont confrontés les sujets. Ces derniers ne perçoivent pas la forme de façon précise. Les figures perçues ont certes des caractéristiques communes avec la forme à explorer mais il existe plusieurs types d'erreurs d'interprétation :

1. La perception est partielle (trois cas chez l'adulte 1)
2. Les sujets perçoivent des éléments non éléments dans la figure explorée (un cas chez l'adulte 1 et un cas chez l'adulte 2)
3. Un trait est perçu comme une surface (trois cas chez l'adulte 1)

Le travail entrepris a ensuite consisté à préparer systématiquement les sujets à la lecture de courbes et de droites dans un repère.

3.5.2 Discrimination angle/courbe et de l'orientation

L'objectif de cette séance a été d'évaluer la capacité des sujets à reconnaître le caractère curviligne ou rectiligne et l'orientation d'une figure élémentaire.

- ***Matériel***

Les figures utilisées sont des segments et des courbes (voir Tableau 4). L'épaisseur du trait est égale à un pixel. Les orientations proposées sont :

- L'horizontale
- La verticale
- La première bissectrice
- 22, 5 degrés par rapport à l'horizontale
- 67, 5 degrés par rapport à l'horizontale
- (-22, 5) degrés par rapport à l'horizontale
- (-45) degrés
- (-67,5) degrés par rapport à l'horizontal

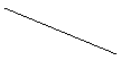
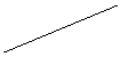
PHASE 1								
PHASE 2								

Tableau 4 : Figures utilisées au cours de la situation d'étude (taille réduite)

- ***Procédure***

Cette séance comporte deux phases. Au cours de chaque phase, le sujet doit explorer huit figures. Le sujet est placé sur la figure. Après chaque phase, les figures explorées sont décrites aux sujets.

Tâche : reproduction différée des figures explorées.

Consigne : Explorer la figure qui est un segment ou une courbe et qui peut prendre huit orientations différentes (elles sont énumérées), puis dessiner sur une feuille la forme perçue.

Temps d'exploration : limité à 90 secondes (les sujets ayant l'opportunité de répondre avant la limite).

Critères d'évaluation du dessin : le dessin est considéré comme correct (voir Tableau 5) si son orientation (à 10° près) et son aspect (courbe ou rectiligne) correspondent à ceux de la figure explorée. Le respect des dimensions n'est pas pris en considération. Sont également distingués le cas où l'orientation est correcte mais l'aspect erroné (voir Tableau 6) et celui où l'aspect est correct et l'orientation erronée (voir Tableau 7).

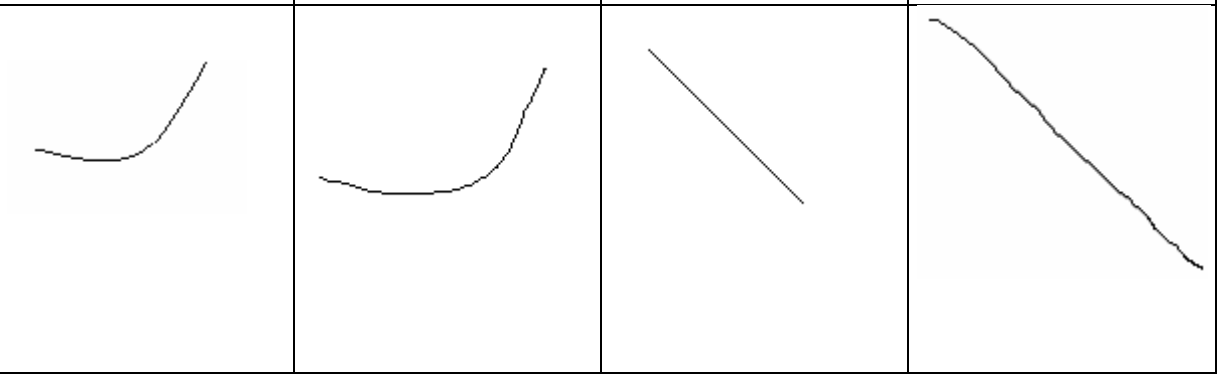
Figure	Figure produite	Figure	Figure produite
			

Tableau 5 : Exemples de dessins corrects (taille réelle)

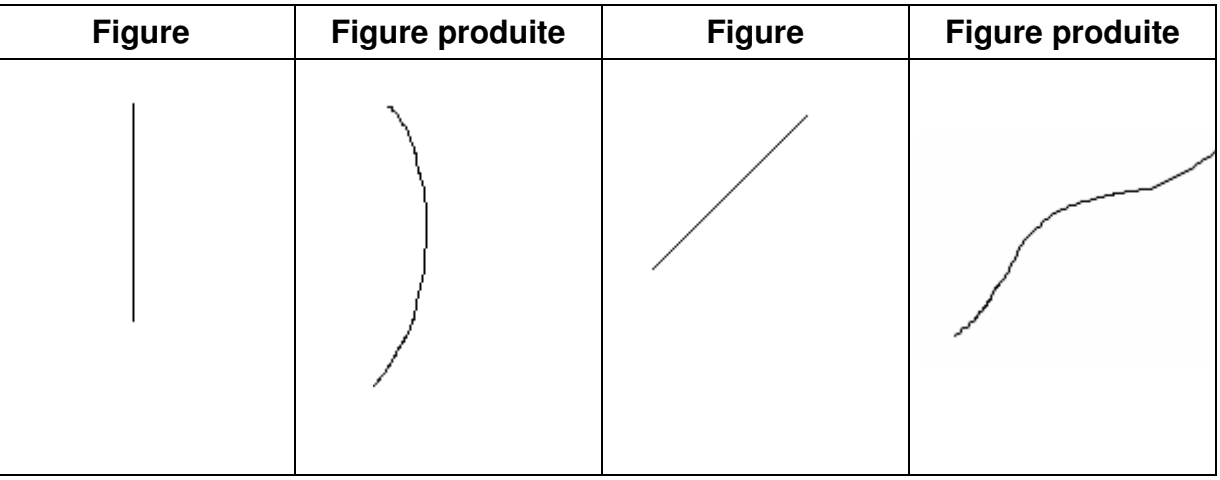
Figure	Figure produite	Figure	Figure produite
			

Tableau 6 : Exemples de dessins dont l'orientation est correcte et l'aspect erroné (taille réelle)

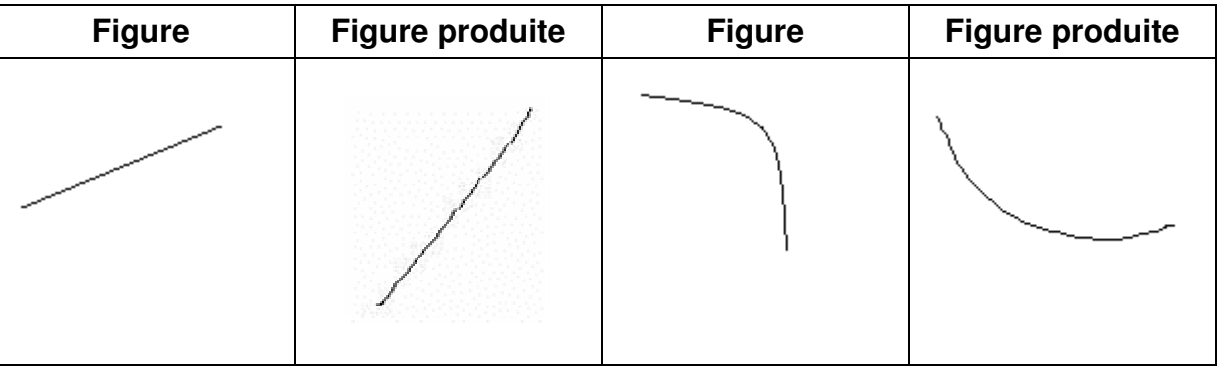
Figure	Figure produite	Figure	Figure produite
			

Tableau 7 : Exemples de dessin dont l'orientation est erronée et l'aspect correct (taille réelle)

- ***Résultats***

On observe chez les deux sujets une amélioration des performances de la phase 1 à la phase 2: le nombre de réponses entièrement correctes passe de deux à six chez le sujet 1 et de deux à

cinq chez le sujet 2 (voir Tableau 8). 22 figures sur 32 présentent une orientation correcte et 21 figures présentent un aspect correct. Considérant que la probabilité de se tromper sur l'orientation (huit cas possibles) est supérieure à celle de se tromper sur l'aspect (deux cas possibles) et que les résultats relatifs à ces deux propriétés (orientation et aspects) sont équivalents, on peut en déduire que la perception de l'orientation semble plus aisée que la discrimination droite/courbe.

	Sujet 1		Sujet 2	
	Phase 1	**Phase 2**	**Phase 1**	**Phase 2**
Orientation correcte, aspect correct	2	6	2	5
Orientation correcte, aspect erroné	2	1	4	0
Orientation erronée, aspect correct	2	1	1	2
Orientation erronée, aspect erroné	2	0	1	1
Non réponse	0	0	0	0
Total	8	8	8	8

Tableau 8 : Nombre de réponses relatives à l'orientation et à l'aspect par sujet et par phase

3.5.3 Perception du nombre de l'orientation et de la position des sécantes

L'objectif de la séance a consisté à évaluer la capacité à trouver le nombre de segments qui croisent une horizontale ainsi que l'orientation de ces segments et leur position relative.

- ***Matériel***

Les figures[89] sont composées d'un segment horizontal coupé par une ou deux sécantes. L'épaisseur du trait est d'un pixel (voir Tableau 9).

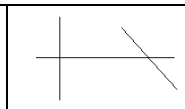
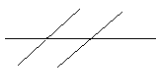
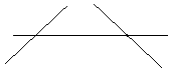
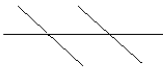
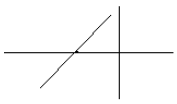
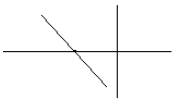
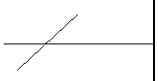
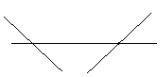
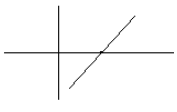
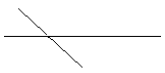
Phase 1						
Phase 2						

Tableau 9 : Figures utilisées (taille réduite) au cours de la situation d'étude 2

[89] Un exemple de figure, à la taille réelle, est présenté en annexe 6.

- ***Procédure***

Cette séance comporte deux phases. Au cours de chaque phase, le sujet explore une série de six figures. A la fin de chaque phase, les figures sont décrites au sujet.

Tâche : Détection du nombre de segments qui croisent une horizontale et perception de l'orientation et de la position relative de ces segments.

Consigne : Dire si un ou deux segments coupent l'horizontale. Donner l'orientation du ou des segments, sachant que les orientations possibles sont la verticale, l'oblique à 45 degrés et l'oblique à (-45) degrés. S'il existe deux segments préciser leur position relative, par exemple : en partant de la gauche, le segment vertical est situé avant le segment oblique (-45).

Temps d'exploration : limité à 120 secondes par figure (les sujets ayant l'opportunité de répondre avant la limite).

Critères d'évaluation de la réponse : cette dernière est considérée comme correcte si le nombre, la position relative et l'orientation sont corrects.

- ***Résultats***

Chez les deux sujets, les résultats augmentent d'une phase à l'autre (voir Tableau 10). Les erreurs sont variées et relativement fréquentes. Les orientations perçues correspondent à celles des segments mais leur position relative est erronée (inversion par permutation).

1. L'image perçue représente l'image en miroir de l'image explorée (inversion en miroir).

Les sujets ont fait part de leur difficulté à mémoriser la position relative des segments. Le sujet 2 évoque la prise de notes avec la tablette braille (où l'écriture se fait en sens inverse de la lecture (voir partie 2.1.1.1) pour expliquer la survenue d'erreur d'inversion.

	Sujet 1		Sujet 2	
	Phase 1	**Phase 2**	**Phase 1**	**Phase 2**
Perception correcte de l'ensemble de la figure	2	4	1	3
Un segment correct, un segment erroné	1	1	2	0
Un segment correct, un segment omis	1	0	1	0
Un segment perçu en plus	0	0	1	0
Réponse totalement erronée dont (inversion)	2 (2)	1 (1)	1 (1)	3 (1)
Non réponse	0	0	0	0
Total	6	6	6	6

Tableau 10 : Nombre de réponses par sujet et par phase

On recense cinq cas d'inversion. Ces dernières peuvent être de deux types (voir Tableau 11) :

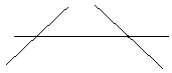
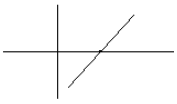
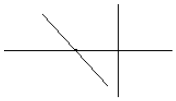
Inversion par permutation		**Inversion en miroir**	
Figure	**Figure décrite**	**Figure**	**Figure décrite**
			

Tableau 11 : Exemples d'inversions produites (taille réduite)

3.5.4 Perception de l'orientation d'une sécante et localisation d'une intersection

L'objectif de la séance consiste pour les sujets à statuer sur la localisation et l'orientation d'une sécante à l'horizontale. Le lieu d'intersection peut prendre quatre positions possibles.

- ***Matériel***

Les figures[90] (voir Tableau 12) consistent en un segment horizontal traversé par un segment vertical ou oblique. L'intersection se positionne au début, à la fin, au milieu, au quart ou au trois-quarts du segment horizontal. L'épaisseur du trait est égale à un pixel.

[90] Un exemple de figure, à la taille réelle, est présenté en annexe 6.

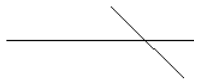
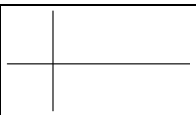
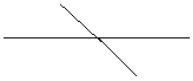
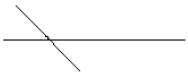
Phase 1				
Phase 2				

Tableau 12 : Figures utilisées (taille réduite)

- ***Procédure***

Cette séance comporte deux phases. Chaque phase comporte quatre figures. Le sujet est placé sur la figure.

Tâche : perception de l'orientation d'un segment et localisation de son intersection avec le segment horizontal. Après chaque phase, les figures explorées sont décrites aux sujets.

Consigne : Dire si la sécante à l'horizontale est verticale ou oblique ? Donner oralement le lieu d'intersection. Cinq positions (de gauche à droite) sont possibles : début, premier quart, moitié, dernier quart et fin.

Temps d'exploration : limité à 120 secondes par figure (les sujets ayant l'opportunité de répondre avant la limite).

- ***Résultats***

Les résultats sont équivalents chez les deux sujets et d'une phase à l'autre (voir Tableau 13). Les sujets ne commettent pas d'erreurs quant à l'orientation. Cette étude semble confirmer que l'orientation est une propriété de la figure que les sujets perçoivent avec facilité. Sur les 16 essais, on recense cinq erreurs de localisation. Ces dernières portent systématiquement sur les positions voisines.

	Sujet 1		**Sujet 2**	
	Phase 1	**Phase 2**	**Phase 1**	**Phase 2**
Orientation correcte, position correcte	3	3	3	2
Orientation correcte, position erronée	1	1	1	2
Orientation erronée, position correcte	0	0	0	0
Orientation erronée, position erronée	0	0	0	0
Non réponse	0	0	0	0
Total	4	4	4	4

Tableau 13 : Nombre de réponses par sujet et par phase

Nous constatons à nouveau que les sujets sont en mesure de percevoir correctement les orientations. Néanmoins, la tâche de perception de l'orientation est plus simple que dans la situation précédente. La localisation du lieu d'intersection reste approximative.

3.5.5 Localisation et lecture d'une forme simple dans un repère

L'objectif de la séance est de localiser une courbe dans un repère et de donner son orientation.

- ***Matériel***

Les figures consistent en une courbe située dans un des quatre cadrans d'un repère. L'épaisseur du trait est d'un pixel (voir Tableau 14).

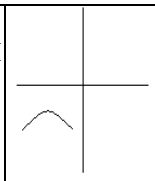
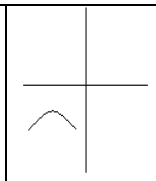
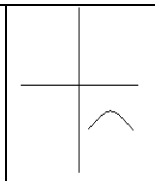
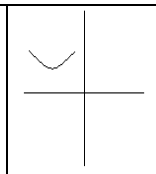
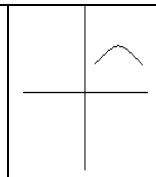
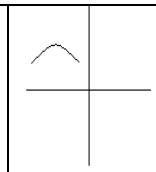
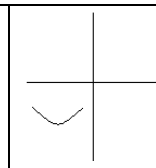
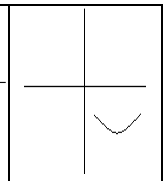
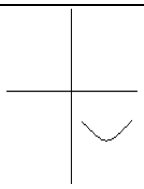
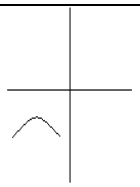
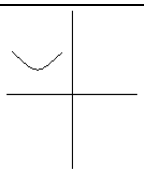
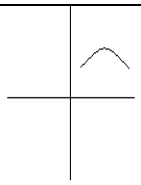
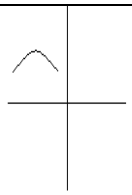
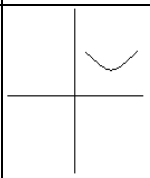
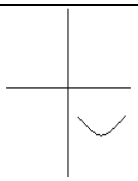
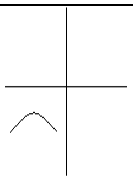
PHASE 1								
PHASE 2								

Tableau 14 : Figures utilisées (taille réduite)[91]

- ***Procédure***

Cette séance comporte deux phases. Le sujet est placé sur la figure à l'origine du repère. Après chaque phase, les figures explorées sont décrites aux sujets.

Tâche : Localisation d'une courbe et identification de son orientation.

Consigne : Dire dans quel cadran du repère (A, B, C ou D) se trouve la courbe et donner son orientation (« forme de u » ou « forme de n »)

Temps d'exploration : limité à 90 secondes (les sujets ayant l'opportunité de répondre avant la limite).

[91] Un exemple de figure, à la taille réelle, est présenté en annexe 6.

- ***Résultats***

Dans l'ensemble, les performances sont bonnes (voir Tableau 15). Le sujet 1 obtient des résultats proches à chaque phase (cinq bonnes réponses en phase 1 et six en phase 2) alors que ceux du sujet 2 baissent (passant de sept à cinq bonnes réponses). Les sujets ont mis en œuvre la même stratégie pour déterminer l'orientation de la courbe : une fois le repère identifié, pour reconnaître la courbe le sujet trace un trait horizontal et/ou vertical. En fonction de la localisation des croisements, les sujets en déduisent son orientation. Cette stratégie qui met en relation les éléments de la figure s'avère plus économique que l'exploration intégrale de la figure. Néanmoins, elle a donné lieu à des erreurs car les sujets ont parfois confondu le repère avec une portion de la courbe.

	Sujet 1		**Sujet 2**	
	Phase 1	**Phase 2**	**Phase 1**	**Phase 2**
Position correcte, orientation correcte	5	6	7	5
Position correcte, orientation erronée	1	1	0	2
Position erronée, orientation correcte	0	0	0	0
Position erronée, orientation erronée	0	1	0	1
Non réponse	2	0	1	0
Total	8	8	8	8

Tableau 15 : Nombre de réponses par sujet et par phase

- ***Conclusion des premières observations***

La discrimination curviligne/rectiligne est sujette à erreurs. Les sujets perçoivent plus facilement l'orientation des figures (voir 3.5.2). L'apprentissage favorise la perception de l'orientation des droites. Néanmoins, cette dernière n'est pas systématiquement assurée. La localisation précise d'un segment qui croise une droite ne semble pas non plus acquise et les sujets font part de leur difficulté de mémorisation (voir parties 3.5.3 et 3.5.4). Enfin, dans la dernière situation d'étude, les sujets adoptent des stratégies exploratoires plus économiques que le parcours intégral de la figure. Le changement de situation a ainsi fait émerger une autre famille de stratégies qui consiste à explorer partiellement la figure et à mettre en relation les différents éléments qui la compose.

Les différentes tâches proposées dans ces situations révèlent que l'activité perceptive reste approximative, malgré l'amélioration des performances observées au sein d'une même séance et d'une séance à l'autre. Par conséquent, l'objectif visé qui consiste à lire une courbe dans un repère orthonormé n'est pas aisément réalisable dans l'état actuel du couplage humain/machine.

La recherche de meilleures conditions d'appropriation et d'usage nous a amenés à envisager une assistance à l'activité exploratoire. Cette assistance consiste à recourir à la fonctionnalité de marquage sonore pour établir une distinction entre les différents éléments d'une figure et faciliter ainsi les stratégies exploratoires qui sont spontanément apparues chez les sujets.

3.5.6 Introduction d'une assistance à l'activité

- ***Objectif***

La première étude concerne la localisation/perception d'une courbe dans un repère et la seconde la perception de formes géométriques simples. L'objectif commun à ces deux expériences est d'appréhender l'apport d'une différenciation du signal (sonore/tactile) sur les performances perceptives. Cette différenciation se traduit par un enrichissement modal permettant de dissocier repère et courbe (Etude 1) et de rendre saillants les sommets des figures (Etude 2). Ainsi, nous avons fait l'hypothèse que le recours au marquage sonore permet d'obtenir de meilleurs résultats dans les deux situations.

3.5.6.1 Evaluation du marquage sonore lors de la lecture de forme dans un repère

Cette étude comprend deux séances de travail A et B effectuées à trois semaines d'intervalle et qui ont pour but de mettre en évidence l'effet du marquage sonore sur les performances des deux sujets.

- ***Procédure***

Chaque séance comporte deux phases. Après chaque phase, les figures explorées sont décrites aux sujets.

Tâche : Reconnaissance d'une forme dont la position et l'orientation varie dans un repère. Cette forme peut prendre quatre orientations et se trouver dans une partie du repère ou à cheval sur deux parties du repère. Nombre de formes proposées par phase : 12

Consigne : dire dans quelle(s) partie(s) du repère se trouve la courbe et donner son orientation. Est-ce un « u », un « n », un « c » ou un « c inversé » ?

- ***Séance A***

La figure consiste en une courbe qui est positionnée dans un cadran du repère ou à cheval entre deux cadrans. L'épaisseur du trait est égale à un pixel (voir Tableau 16).

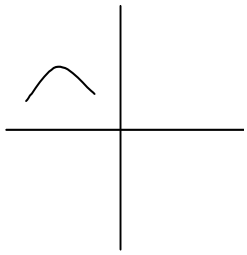
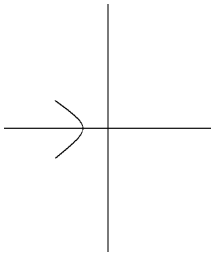
« n dans le cadran A »	« c inversé dans le cadran AC »
	

Tableau 16 : Exemples de figures utilisées lors de la séance A (taille réduite)

Temps d'exploration par essai : limité à 120 secondes (les sujets ayant l'opportunité de répondre avant la limite).

- ***Résultats de la séance A***

Les deux sujets progressent d'une phase à l'autre (Tableau 17). Néanmoins, les sujets confondent à nouveau le repère et la courbe comme dans la situation précédente. Cette confusion ne peut être dissipée par la stratégie de reconnaissance ainsi explicitée par les deux sujets : identifier le repère, accrocher la courbe et localiser par là sa position. Tracer une horizontale et une verticale et en fonction du nombre d'intersections déduire l'orientation de la courbe.

	Sujet 1		**Sujet 2**	
Réponses	**Phase1**	**Phase2**	**Phase 1**	**Phase 2**
Position correcte, orientation correcte	4	8	2	6
Position correcte, orientation erronée	4	1	5	3
Position erronée, orientation correcte	2	1	1	1
Position erronée, orientation erronée	1	1	4	2
Non réponse	1	1	0	0
Total	12	12	12	12

Tableau 17 : Nombre de réponses par sujet et par phase à la séance A

Les sujets ont donné leur réponse avant l'écoulement des 120 secondes : à l'issue de 90 secondes en moyenne chez le sujet 1 et de 80 secondes chez le sujet 2 (voir Tableau 18).

Sujet 1			Sujet 2		
Phase 1	**Phase 2**	**2 phases**	**Phase 1**	**Phase 2**	**2 phases**
96,83±31,8	83,5±36,50	90,16±34,16	69,36±23	91,27±19,74	80,31±20,97

Tableau 18 : Temps de réponse moyen (en secondes) par sujet et par phase à la séance A

- ***Séance B***

Afin d'alléger la tâche des sujets en réduisant le temps consacré à identifier le repère et en évitant la confusion courbe-repère, nous avons marqué le repère de façon sonore. Chaque passage du sujet sur le repère, marqué en rouge, déclenche un bip et, contrairement à la courbe, il ne donne lieu à aucune stimulation tactile. Nous avons également épaissit le trait des figures afin d'offrir un meilleur accrochage. La largeur du trait mesure deux pixels.

Le temps d'exploration par essai est limité à 90 secondes : cette durée a été définie en fonction du temps d'exploration moyen observé en séance A.

- ***Résultats de la séance B***

En dépit d'un temps plus court, l'apport de la bimodalité et la possibilité d'un accrochage accru par l'épaississement de la courbe ont eu une influence très nette sur les performances (voir Tableau 19 et Tableau 20).

	Sujet 1		Sujet 2	
Réponses	**Phase 1**	**Phase 2**	**Phase 1**	**Phase 2**
Position correcte, orientation correcte	11	11	7	11
Position correcte, orientation erronée	0	1	1	0
Position erronée, orientation correcte	0	0	1	0
Position erronée, orientation erronée	0	0	2	1
Non-réponse	1	0	1	0
Total	12	12	12	12

Tableau 19 : Nombre de réponses par sujet et par phase à la séance B

Les sujets ont donné leur réponse avant l'écoulement des 90 secondes. Le temps d'exploration a diminué d'une phase à l'autre chez les deux sujets.

Sujet 1			Sujet 2		
Phase 1	**Phase 2**	**2 phases**	**Phase 1**	**Phase 2**	**2 phases**
52,5±27,48	34,92±12,74	43,71±22,79	73,83±14,43	67,17±20,82	70,5±17,84

Tableau 20 : Temps de réponse moyens (en secondes) ± écart type par sujet et par phase pour la séance B

- ***Résultats synthétiques pour les séances A et B***

On observe une amélioration au cours de chaque séance puisque l'on passe de 6 bonnes réponses à 14 pour la séance A et de 18 à 22 pour la séance B.

D'une séance à l'autre (Tableau 21), on constate un progrès très significatif, (T_{48}=4,76 p<0,001) que l'on peut attribuer à la présence du repère sonore correctement utilisé par les sujets.

La vocation du repère dans notre étude est essentiellement de nature topologique. Il structure un espace de perception en quatre cadrans et permet des mises en relation : la courbe est à droite du repère, à cheval sur le repère, etc. Dans le cas de figure où le repère ne peut être discriminé de la courbe, les portions de repère font l'objet d'une recherche d'informations euclidiennes : suis-je sur une courbe ou une droite, l'horizontale ou la verticale. Une fois le repère identifié, le sujet cherche alors la position de la courbe et sa convexité. Avec un repère sonore l'information topologique est plus rapidement accessible ; il reste à distinguer l'horizontale de la verticale[92]. Ainsi, en introduisant cette distinction de modalité, on fait du repère une ressource et non pas l'objet de la reconnaissance.

	Phase 1	**Phase 2**	**2 phases**
Séance A	6	14	20
Séance B	18	22	40

Tableau 21 : Nombre de réponses correctes données par les deux sujets

Même si nous privilégions la modalité tactile et explorons ses potentialités, il est dès lors possible d'envisager des repères mixtes jouant de la complémentarité entre le sonore et le tactile. Le travail de Sribunruangrit (2004), auquel nous avons participé et qui sera évoqué dans la partie 3.11 approfondit cette question.

[92] A ce propos, l'un des sujets a suggéré que les axes x et y émettent des sons différents.

3.5.6.2 Evaluation du marquage sonore lors de la lecture de polygones

Le marquage sonore ayant eu une influence décisive sur la lecture d'une courbe dans un repère, nous avons examiné si son emploi peut améliorer la reconnaissance de figures géométriques telles que des polygones. Nous avons choisi de rendre saillants les points caractéristiques de ces figures en l'occurrence les sommets des polygones et le centre des ellipses et des cercles.

- ***Matériel***

Les figures sont des segments, des polygones, des cercles et des ellipses (Tableau 22). Dans la situation bi-modale, le passage sur les extrémités des segments, sur les sommets des polygones, et sur les centres des cercles et des ellipses génère un bip sonore. L'épaisseur du trait est de deux pixels.

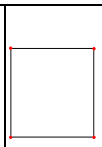
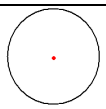
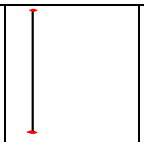
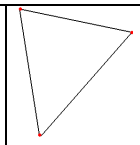
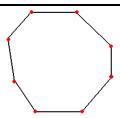
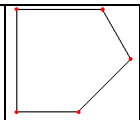
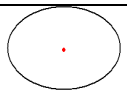
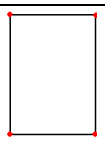
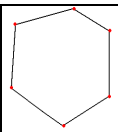
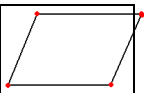
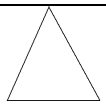
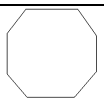
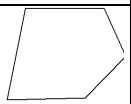
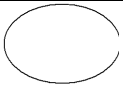
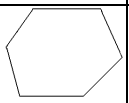
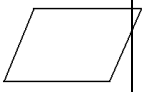
SERIE 1										
SERIE 2										

Tableau 22 : Figures explorées par le sujet 1 (taille réduite)[93]

- ***Procédure***

Cette expérience comporte deux phases. Une phase où les figures sont uni-modales et une phase ou elles sont bi-modales. L'ordre des phases est inversé d'un sujet à l'autre. Le sujet 1 commence avec les figures bi-modales. Le sujet 2 explore les figures de la série 1 (Tableau 22) en situation uni-modale et celles de la série 2 en situation bi-modale.

Tâche : reconnaissance de dix formes par phase

Consigne : Nommer la figure explorée. Le répertoire des figures contient des segments, différents polygones, des cercles et des ellipses.

[93] Un exemple de figure, à la taille réelle, est présenté en annexe 6.

Temps d'exploration : limité à 120 secondes (les sujets ayant l'opportunité de répondre avant la limite).

- ***Résultats de la séance***

La présence de points sonores aux sommets et aux centres des figures géométriques permet aux deux sujets d'être plus efficients dans la réalisation des tâches. On constate deux fois plus de bonnes réponses en situation bi-modale. La différence de performances (Tableau 23 et Tableau 24) entre les situations uni-modale bi-modale est significative ($T20=2,39$ $p<0,05$).

	Sujet 1		Sujet 2	
	Phase 1	**Phase 2**	**Phase 1**	**Phase 2**
Réponses correctes	7	5	3	9
Réponses fausses et non réponses	3	5	7	1
Total	10	10	10	10

Tableau 23: Nombre de réponses par sujet et par phase

	Uni-modale	Bi-modale
Réponses correctes	8	16

Tableau 24: Nombre de réponses correctes données par les deux sujets en fonction du type de figure (bi ou uni-modal) toutes figures confondues

Le temps d'exploration du sujet 2 chute, il est inférieur de 16 secondes dans la situation bi-modale (voir Tableau 25).

Sujet 1			Sujet 2		
Phase 1	**Phase 2**	**2 phases**	**Phase 1**	**Phase 2**	**2 phases**
92,67±33,89	95±21,7	93,89±27,33	113,6±18,87	77,1±34,9	95,35±33,11

Tableau 25 : Temps moyen ± écart type, par sujet et par phase

La différenciation des points remarquables rend saillantes les propriétés géométriques des figures proposées. Un polygone se définit par son nombre de côtés ou par son nombre de sommets. Il est plus facile dans la situation bi-modale de compter les sommets ; c'est d'ailleurs la stratégie adoptée par les sujets pour reconnaître la forme. L'existence du cercle et l'ellipse se déduisent, entre autres, par la présence du point central et l'absence de point sur le bord extérieur. La difficulté lors de la lecture de formes est de détecter une brisure de la ligne ou un changement de convexité d'une courbe. La présence de points sonores a l'avantage de limiter les pertes qui surviennent à ces endroits.

- ***Conclusion***

Cette étude est encourageante et nous invite à poursuivre notre travail de spécification de l'interface. Effectivement, nous avons pu montrer que deux sujets aveugles complets sont en mesure de lire des formes mathématiques dans un environnement numérique. En outre, nous avons mis en évidence que cette capacité peut être quasi optimale lorsque l'on utilise la bi-modalité pour mettre en exergue les propriétés géométriques de la figure ou pour marquer une distinction entre objet de la reconnaissance et outil pour la reconnaissance.

Une dernière séance de travail avec les sujets adultes a été consacrée à la lecture de droites dans un repère comportant des graduations.

3.5.7 Localisation d'une droite dans un repère orthonormé

Nous avons proposé aux deux adultes une tâche qui exige une localisation plus précise d'une portion de droite dans un repère orthonormé. Comme le repère sonore a favorisé la tâche de reconnaissance l'étude précédente, nous avons à nouveau employé ce type de marquage en le combinant avec la modalité tactile pour matérialiser les graduations.

- ***Matériel***

Les figures (voir Tableau 26) consistent en un segment positionné dans un repère orthonormé. Les axes x et y sont tracés en rouge, couleur qui donne lieu à une stimulation sonore. Les graduations sont en noir. L'épaisseur du trait est égale à deux pixels.

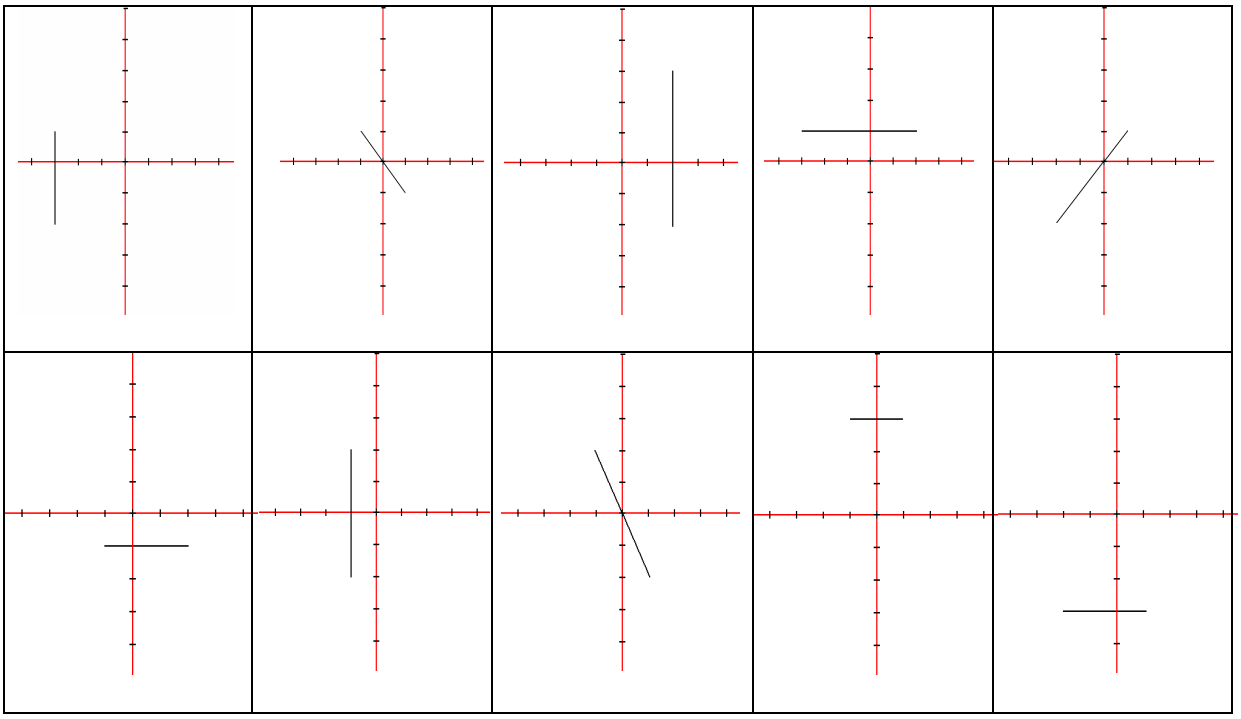


Tableau 26 : Figures utilisées[94]

- ***Procédure***

Les sujets explorent dix graphiques. Ils sont positionnés au milieu du segment.

Temps d'exploration : 150 secondes (les sujets ayant l'opportunité de répondre avant la limite).

Tâche : Perception et localisation précises d'un segment dans un repère orthonormé.

Consigne : situer le segment dans les cadrans, donner son orientation, sa longueur (en unités) et, dans la mesure du possible, les coordonnées de ses extrémités.

- ***Résultats***

Si les sujets sont en mesure de situer le segment dans les cadrans et d'en donner la pente, en revanche la lecture des coordonnées de ses extrémités a donné lieu à très peu de réponses correctes (voir Tableau 27). Les sujets commettaient des erreurs dans l'évaluation locale des distances (les segments n'étaient pas gradués), lors des allers-retours entre les axes et le segments ou lorsqu'ils tentaient de suivre les axes. Le marquage des axes a révélé ses limites.

[94] Un exemple de figure, à la taille réelle, est présenté en annexe 6.

L'absence de stimulation tactile entre les graduations et le déclenchement insuffisamment rapide des bips ont perturbé les sujets dans leur tentative de suivi.

	Sujet 1	Sujet 2
Localisation correcte des deux extrémités du segment, orientation correcte	2	0
Localisation correcte, orientation erronée	0	0
Localisation erronée, orientation correcte	8	10
Localisation d'une et une seule extrémité du segment	(3)	(1)
Non réponse	0	0
Total	10	10

Tableau 27 : Nombre de réponses par sujet

La plupart des explorations étaient réalisées jusqu'à épuisement des 150 secondes (voir Tableau 28).

Sujet 1	Sujet 2
139,3± 22,14	145,3 ± 11,78

Tableau 28 : Temps moyen (en secondes) ± l'écart type, par sujet

La lecture des coordonnées d'un point nécessite une projection orthogonale du point vers chacun des axes. Cette lecture est facilitée (y compris visuellement) lorsque un trait reliant le point à l'axe matérialise la projection. Cette activité a fait l'objet d'une assistance dans l'expérience de Sribunruangrit (2004) (voir partie 3.11).

- ***Conclusion des études exploratoires et préparatoires menées avec les deux adultes***

L'étape préparatoire, plutôt axée sur la réalisation de la tâche, pointe les limites d'une démarche purement évaluative face à une activité qui d'une part, est inédite et d'autre part, requiert un apprentissage. En effet, la réussite observée en fonction du type de tâche, si elle nous indique le degré d'utilisabilité du dispositif est insuffisante pour expliquer les échecs et les réussites. Une analyse sommaire de l'activité eût été plus fructueuse pour la proposition d'une assistance que le simple recueil des réponses. Ces résultats appellent donc une analyse plus fine de l'activité. Nous avons fait, en quelque sorte à nos dépens, le constat établi par ailleurs par des ergonomes comme Rabardel (1995) : *« les méthodes basées sur les fréquences d'erreurs et les performances sont considérés comme apportant peu d'éléments capables de nourrir le design ».* Nous étions parti d'un présupposé naïf selon lequel « les deux sujets aveugles les plus entraînés au monde » disposaient des techniques exploratoires

satisfaisantes. Nous verrons plus tard qu'il n'en est rien. Ce n'est qu'en nous interrogeant sur les stratégies observées chez les sujets aveugles, mais aussi chez les voyants qui ont participé à des expériences de laboratoires, que nous avons été conduits à mieux identifier les stratégies et à comprendre leur caractère déterminant i) dans la constitution des percepts, ii) dans l'élaboration de solutions de conception.

Parallèlement à cette étude préparatoire, le travail d'analyse et de catégorisation des stratégies exploratoires a permis de dégager trois types de stratégies :

1. Les stratégies d'accrochage-localisation, lesquelles se produisent lorsque le sujet cherche à détecter la figure.

2. Les stratégies de lecture, au sein desquelles figurent les mouvements de suivi continu et de balayage (définis dans la section 3.6)

3. Les stratégies anticipatoires visant :

* L'économie exploratoire qui, typiquement, se manifeste lorsque la figure est de grande taille.

* La focalisation sur une saillance : pour discriminer une figure le sujet va diriger son exploration vers un de ses éléments, par exemple, l'angle d'un triangle pour pouvoir déterminer si le triangle est rectangle.

* La focalisation sur une propriété au travers d'une exploration non figurale : pour percevoir une propriété morphologique, le geste exploratoire exécuté ne reproduit pas la forme de la figure. Par exemple, pour discriminer le cercle de l'ellipse, le sujet va se placer au centre de la figure puis par des mouvements radiaux essayer d'évaluer les distances entre le centre et le périmètre.

Ainsi, nous avons pu observer des stratégies anticipatoires présentant à la fois une économie exploratoire et des focalisations sur une propriété. Les stratégies de lecture et plus précisément la stratégie du suivi continu seront appréhendées lors plus loin. Dans notre travail de catégorisation des gestes exploratoires orientée vers la conception, nous avons au préalable comparé la situation prothétisée à la situation de lecture sur support traditionnel afin de mieux cerner leurs spécificités et leurs déterminants.

3.6 Etude de l'exploration et de l'identification de formes sur papier thermogonflé auprès de quatre collégiens aveugles[95]

- ***Objectif***

Les travaux consacrés à la lecture haptique de formes bidimensionnelles indiquent que les formes géométriques simples sont aisément identifiées par les aveugles (Millar, 1991). Nous savons également que les dispositifs de lecture haptique n'offrent pas des performances similaires (voir parties 2.2 et 3.5). Jansson[96] a cherché à comprendre les limites du PHANtoM en comparant la situation prothétisée et la situation d'appréhension directe d'objets tridimensionnels. Ce type d'approche permet de caractériser les stratégies perceptives (de définir des unités comportementales) dans les deux situations de lecture et de proposer des spécifications pour faciliter les explorations médiatisées. La présente étude établit ainsi une confrontation entre la lecture de figures en relief et la lecture de figures avec Tactos. Le mode d'accès aux propriétés avec le support classique éclaire la situation médiatisée tandis que l'analyse des explorations prothétisées apporte des considérations nouvelles sur l'exploration en situation traditionnelle d'autant que les descriptions concernant les explorations haptiques d'objets bidimensionnels sont rares dans la littérature. Ces allers-retours entre les deux situations nous ont amenés à l'élaboration d'une grille d'observation permettant le codage des vidéos de quatre collégiens aveugles explorant des formes simples.

3.6.1 Méthode

- ***Sujets***

Les quatre collégiens ont participé à l'étude.

[95] Cette étude a fait l'ojet d'une publication : Ali Ammar, A., Gapenne, O., Blomme, E., Rovira, K. (2005). « Analyse de l'exploration tactile sur support traditionnel chez la personne aveugle et conception de l'interface de lecture Tactos », *in* O. Gapenne, M. C. Manes Gallo, C. Brassac & L. Mondada, *Alternatives en sciences cognitives, enjeux et débats, Revue d'Intelligence Artificielle*, *19*, Hermes-Lavoisier, 339-354.

[96] http://www.ida.liu.se/~ssomc/papers/Jansson.pdf

- ***Matériel***

18 figures sur papier thermogonflé sont présentées :

· 3 petits segments
· 3 segments moyens
· 3 grands segments
· 3 angles
· 3 formes curvilignes (un cercle, un C et une vague)
· 3 formes composées (une croix et deux tableaux : un tableau aux cases étroites de deux lignes et trois colonnes, tableaux aux cases larges comportant trois lignes et deux colonnes).

L'intégralité des passations a été filmée à l'aide d'une caméra numérique fixée sur trépied.

- ***Procédure***

Chaque sujet est observé individuellement. Un ordre de présentation des figures a été défini au préalable, identique pour chaque sujet. Après présentation d'une figure et exploration de celle-ci, sans limite de temps, il est demandé au sujet de la nommer puis de la dessiner sur une feuille de papier.

- ***Elaboration d'une grille d'observation***

L'examen de la littérature et l'observation des enregistrements des trajectoires exploratoires produites par les sujets nous ont amenés à identifier des points de confrontation entre Tactos et l'exploration sur support traditionnel, qui nous ont conduits à l'élaboration d'une grille (voir annexe 5).

Nous avons ainsi privilégié les caractéristiques suivantes :

* La bi-manualité
* Les points de contact
* L'intégralité de l'exploration de la forme
* La continuité de l'exploration

La bi-manualité

Les études sur la perception tactile insistent sur le caractère bi-manuel de la perception chez l'aveugle. Dans ce cas, le sujet obtient des sensations tactiles là où il agit c'est à dire au bout des doigts qui constituent à la fois les capteurs et les effecteurs. Avec Tactos, la perception des objets se fait sur un mode différent car la zone de contact se limite à la pulpe de l'index et du majeur de la main non dominante. Cette dernière reçoit alors la stimulation des picots pendant que la main dominante joue un rôle moteur et proprioceptif. L'identification se joue alors dans la rencontre entre la succession de stimulations, qui signale la présence d'une partie de la forme, et le geste de la main sur la tablette qui plus généralement lie la succession de la configuration des picots dans des unités perceptives plus vastes. Que l'on considère le lieu de la sensation, ou le siège de la motricité, l'exploration sous Tactos est uni-manuelle.

Concernant la grille, l'exploration est dite uni-manuelle lorsqu'une seule main a été en contact avec la forme. Le mode bi-manuel qualifie l'exploration de la forme réalisée par les deux mains au cours d'un même essai. Et nous avons appelé mode mixte la présence de ces deux modes. De plus, Il nous a paru intéressant d'observer la façon dont le sujet se saisit de la forme car la position initiale est à la fois prise et repérage. Enfin, en extrayant une position globale, on attribue, d'une part, un sens à la position initiale et, d'autre part, on définit une allure exploratoire propre à chaque sujet. De ce mode d'accès privilégié, se détache ce qui demeure invariant dans l'orientation, la position, l'appui des paumes et la distribution de la mobilité.

Les points de contact

Tactos ne donne accès qu'à un point de contact avec la forme qui correspond à la position de la pointe du stylet. En revanche, l'accès pluri-digital sur le support traditionnel apporte simultanément des informations relatives à la forme et au positionnement des objets. Aussi, les doigts sont considérés selon leur présence sur la forme, les ruptures qui affectent cette présence et la mixité de leur statut. Ils ont à la fois une fonction de repère et une fonction d'exploration.

Il faut signaler que si les macro-mouvements, par exemple le déplacement le long d'un segment, sont synonymes d'exploration, les micro-mouvements notables aux accidents (sommet, angle, début et fin de ligne) peuvent relever de la discrimination comme du repérage. L'immobilisation des doigts est tout aussi ambiguë car elle signe un appui ou une

prise de repères. Enfin, nous examinons s'il existe un lien entre la taille de l'objet, sa complexité et les doigts mobilisés.

Continuité et intégralité

Sous Tactos l'identification d'objets impose un suivi linéaire qui contraste avec les mouvements simultanés et multi-directionnels de l'exploration tactile des aveugles sur support traditionnel. En outre, l'analyse des trajectoires instrumentées a permis d'identifier principalement trois types principaux de suivi de contour (trois catégories de gestes exploratoires) qui chacun à sa façon détermine la perception de la figure (Stewart & Gapenne, 2004) :

1. le suivi continu : le sujet cherche à maintenir un contact constant avec la forme
2. le micro-balayage : le sujet quitte volontairement la forme en oscillant le long de la ligne
3. le tapotement latéral : le sujet rebondit sur le contour sans le traverser.

Une des difficultés rencontrées lors du suivi de contour avec Tactos consiste à maintenir le contact avec la forme. Dans la stratégie du micro-balayage et du tapotement les interruptions sont volontaires. Les sujets s'écartent de la forme mais sont dans l'anticipation d'un nouveau croisement. Lorsque les mouvements du sujet ne donnent plus lieu à des sensations attendues, le sujet perd la forme. Le sujet peut, s'il a en mémoire le micro-geste précédent, revenir sur ses pas et toucher à nouveau la forme. Il ne s'agit pas seulement de croiser à nouveau la forme mais de revenir dans la zone dans laquelle s'est effectué le dernier accrochage. Ce qui semble problématique n'est pas tant le fait d'avoir eu une interruption dans le contact, que de ne pas savoir où dans l'espace d'exploration et où sur la forme a eu lieu cette rupture.

En ce sens, l'intégralité de l'exploration de la figure sur support thermogonflé a été considérée ainsi que le suivi continu. Lorsque ce dernier a lieu, on constate une unité de mouvement qui porte sur une entité entière comme un segment ou un cercle. A contrario, les éléments de discontinuités sont :

* des changements de direction (sans correspondance avec un accident)
* l'absence total de contact avec la forme (sont comptabilisées le nombre de fois où, au cours d'un essai, les mains ne sont pas en contact avec la figure)

* des mouvements pluridirectionnels ou disconjugués des mains ou des doigts

3.6.2 Résultats

3.6.2.1 Résultats globaux

Globalement, la perception des formes sur support thermogonflé est bonne : on relève 94% de réponses verbales correctes (confirmées par le dessin). En effet, si l'on se réfère aux productions qui font suite aux explorations, on note que l'ensemble des segments, la vague, le C et la croix sont reconnus dans 100% des cas. L'identification du cercle et des deux tableaux est, quant à elle, effective pour trois sujets sur quatre. Plus spécifiquement, on peut noter que :

* Les collégiens ont chacun un positionnement privilégié pour entrer en contact avec la forme. La position des paumes sur la feuille, leur appui et leur orientation sont stables intra-individuellement pour les 18 figures présentées successivement.

* Le nombre de doigts impliqués dans l'exploration augmente généralement avec l'allongement des segments et la présence des angles. Ce nombre croît de nouveau pour les segments curvilinéaires et les objets composites. Notons que les index jouent un rôle déterminant. Ils sont présents aussi bien aux accidents et sur les longueurs. Contrairement aux explorations d'objets tridimensionnels, l'emploi des pouces est rare. Ces derniers ont essentiellement un rôle d'appui.

* Dans plus de 80% des cas, les sujets utilisent les deux mains au cours de l'exploration.

* 84% des figures ont été explorées intégralement. On note que les explorations partielles portent sur : l'angle aigu (pour trois sujets), le tableau aux cases larges (pour trois sujets), le tableau aux cases étroites et la moyenne oblique (par un même sujet).

* Sur les 72 essais, on recense seulement dix absences totales de contact avec la forme.

3.6.2.2 Analyse individuelle

- ***Collégien 1***

Il emploie des termes précis dans la formulation des réponses : il parle de segment, de cercle et non de *« trait »* et de *« rond »*. Il qualifie précisément l'orientation des segments qui selon ses propres termes sont : *« horizontal, vertical ou diagonal »*. Il a également songé à qualifier la longueur des segments chaque fois qu'il était en présence de segments courts ou de segments longs. Les angles sont nommés angles. Il a mentionné ou cherché à mentionner s'ils étaient aigus, droits ou obtus (ne retrouvant pas l'adjectif obtus, il a parlé de *« grand angle »*). Les formes curvilignes sont correctement nommées : *« C'est un cercle », « c'est la lettre C », « des vagues »* dont il a compté les creux et les sommets. En revanche, le terme *« tableau »* ne

semble pas familier malgré une bonne perception de ces figures. Le collégien n'est vraisemblablement pas à l'aise avec la comptabilisation des lignes. Le premier tableau (aux cases étroites avec trois colonnes et deux lignes) est décrit de la sorte : « trois colonnes » et « une ligne en dessous avec un trait qui les sépare ». En ce qui concerne le deuxième tableau (aux cases larges avec trois lignes et deux colonnes), il parle de *« six rectangles »* qu'il compare au tableau précédent mais en précisant toutefois *« avec deux colonnes et deux lignes dans chaque colonne »*. Il ignore que dans un tableau une ligne correspond à un espace et non à un trait de séparation. Sa réponse est en apparence erronée mais non aberrante.

La position initiale des mains

L'orientation de la paume droite se trouve proche de l'horizontale et celle de la gauche proche de la verticale. Les paumes prennent parfois des orientations obliques plus convergentes. La position initiale semble offrir un cadre cartésien à l'espace d'exploration. La main droite proche de l'horizontale et les doigts fléchis constitue la singularité du collégien. Les paumes sont systématiquement levées.

L 'exploration globale

On observe une grande mobilité ou micro-mobilité des doigts. Les doigts de la main droite sont un peu plus mobiles, au sens où en général ils parcourent de plus grandes distances. Les mains sont en appui sur les pouces et les auriculaires.

Dans 94% des cas, le collégien 1 explore les figures de façon bi-manuelle. En général les mains se partagent l'exploration de la figure, les suivis continus sont donc partiels et simultanés. En effet, le suivi continu intégral d'un segment est peu fréquent, on ne rencontre que trois cas de quasi continuité sur un segment. On ne constate aucune interruption totale.

- ***Collégienne 2***

Les dessins sont, dans l'ensemble, fidèles aux modèles mais la dénomination des figures est difficile. Effectivement, le sujet manque de vocabulaire pour nommer les propriétés des segments et des angles présentés. Les segments sont appelés *« traits »*. Elle n'emploie aucun terme géométrique comme segment ou droite. L'oblique est dite *« de travers »*. Les mots *« vertical »* et *« horizontal»* sont connus mais elle ne les utilise pas spontanément. Elle précise parfois d'elle-même la taille du segment, éventuellement en la comparant à celle des segments précédents. Les angles sont décomposés en *« horizontale, verticale et de travers »*. L'angle droit est un *« L »*, l'expression *« angle droit »* est prononcée dans un deuxième temps.

L'angle aigu devient, face aux demandes de précision de l'expérimentateur, *« un triangle à qui il manque un trait »*. Elle identifie l'angle obtus comme un angle, seulement après avoir pivoté la feuille. Mis à part cercle qui est perçu ovale, les formes curvilignes sont toutes bien perçues. La collégienne commet des erreurs quand il s'agit de compter le nombre de cases des tableaux. L'exploration du deuxième tableau est incomplète : la ligne du haut est ignorée. L'expérimentateur l'invite à l'explorer et à rectifier son erreur.

La position initiale des mains

La paume gauche est souvent oblique, posée à plat et positionnée à cheval entre la feuille et la table. La paume droite est parfois à plat, parfois levée. Son orientation est tantôt verticale, tantôt oblique. La singularité de la collégienne 2 réside dans l'appui à plat des mains.

L'exploration globale

La position à plat est fréquente (comparativement aux trois autres sujets) mais non systématique. Elle a recours aux trois modes d'exploration. Cependant, le mode uni-manuel est plus rarement mobilisé. L'exploration en mode uni-manuel a ainsi porté sur la petite oblique, la grande verticale et la moyenne oblique. Tous les autres segments ont été explorés de façon mixte. En règle générale, on note un passage en mode bi-manuel pour les formes composées et curvilignes. Enfin, chez ce sujet, les explorations présentent de la continuité pour sept figures. Trois interruptions totales sont relevées.

- ***Collégienne 3***

Elle a une bonne perception des formes y compris des tableaux (à propos desquels elle ne commet pas d'erreur dans le comptage des cases). Elle manque parfois de vocabulaire pour nommer la forme. La collégienne 3 n'est pas très sûre d'elle. Ses réponses sont souvent inaudibles. De plus, les expérimentateurs doivent fréquemment la solliciter afin d'obtenir la taille et l'orientation des segments. A compter de la troisième réponse, elle esquisse timidement des réponses donnant l'orientation : *« vertical »*, *« horizontal »*, *« oblique »*. L'angle droit est perçu comme une forme composite. L'angle aigu est présenté comme un triangle à qui il manquerait un côté. L'angle obtus est décrit ainsi : *« une verticale et une oblique »*. La vague et le C sont correctement perçus, mais le sujet ne sait quel nom leur donner. Le C devient *« un cercle pas fermé »*. Avec les tableaux, le contour prime *« c'est un grand rectangle »*. Les lignes et colonnes sont évoquées dans un deuxième temps, mais non nommées comme telles : des *« traits qui coupent »*, *« un trait séparé en trois »*. L'une des

expérimentatrices demande à la collégienne 3 si elle connaît les tableaux. La réponse laisse penser qu'elle en a une idée assez vague.

La position initiale des mains

Les paumes sont levées et obliques, leur orientation converge. La paume gauche prend parfois une position proche de la verticale. Les poignets sont souvent positionnés au niveau des coins inférieurs. L'index et le majeur sont parfois joints.

L'exploration globale

La position des mains lors de l'exploration présente souvent des similitudes avec la position initiale. Comme le collégien 1, la collégienne 3 est bi-manuelle dans 94% des cas et les éléments de continuité n'apparaissent pas. Les mouvements sont multi-directionnels et souvent disconjugués. On note des « chassés croisés » dans le balayage : la main gauche qui couvre initialement une des deux moitiés de la feuille cède la place à la droite qu'elle remplace sur la partie laissée vacante. Les interruptions totales présentent deux occurrences.

- ***Collégienne 4***

Ce sujet a une bonne perception des objets exceptés des tableaux dont les cases sont mal comptabilisées. Les segments sont appelés *« trait »*, *« droite »* voire *« parallèle »*. Les termes « «horizontal » et « vertical » sont connus de la collégienne 4 mais elle ne les mentionne pas spontanément. Elle finit par les employer, non sans un certain enthousiasme. Elle ne précise pas la longueur des segments et utilise des adjectifs anthropomorphiques pour spécifier leur orientation : *« debout, couché, penché »*. L'angle droit est d'abord perçu comme un *« L »* (le *« L »* ne devient angle droit qu'une fois pivoté). Quand l'une des expérimentatrices lui demande de décrire l'angle exploré, le sujet qualifie la taille de la figure et non pas la mesure de l'angle. Ainsi l'angle aigu et l'angle obtus sont appelés *« grands angles »*. Les formes curvilignes sont aisément dénommées, ses réponses sont respectivement : *« des vagues »*, *« un rond »* et *« la lettre C »*. Avec le tableau aux cases étroites, la collégienne n'a pas tenu compte des colonnes et dénombre trois rectangles. Avec le tableau aux cases larges, le nombre de cases est donné de façon fort approximative. Néanmoins, elle est la seule à avoir employé le mot tableau.

La Position initiale des mains

La main gauche se positionne au milieu de la feuille, en diagonale avec la paume levée. La main droite oblique, doigts joints, reste souvent localisée au niveau du coin inférieur droit. La paume droite est tantôt levée, tantôt en appui sur la tranche.

L'exploration globale

La majorité des formes est explorée de façon uni-manuelle (de la main gauche qui est la main dominante chez ce sujet). Le suivi continu concerne dix figures. La continuité du mouvement prend la forme d'allers-retours sur les segments. Les angles ainsi que le cercle font l'objet de suivi continu (mais non exclusif). La main droite est mobilisée pour explorer les formes curvilignes et les tableaux Lors des explorations bi-manuelles, les mains se localisent au milieu de la forme et leurs orientations diagonales convergent. Cinq interruptions totales sont recensées.

3.6.2.3 Les stratégies exploratoires

Une analyse des profils exploratoires a révélé que le facteur « nombre de doigts » est discriminant à la fois pour les sujets et les figures. Nous avons identifié, en terme de doigts impliqués dans l'exploration, cinq types de stratégies :

- St1 : Un index mobilisé

  St2a: Deux index de la même main

  St2b : Un index de chaque main
- St3 : Trois à quatre doigts mobilisés
- St4 : Cinq à six doigts mobilisés
- St5 : Sept à huit doigts

La fréquence d'utilisation de chacune de ces stratégies varie effectivement d'un sujet à l'autre (voir Figure 24). Ceci nous amène à relever trois profils. Le profil P1 correspond à une majorité d'exploration avec cinq à six doigts et parfois jusqu'à huit doigts. Les collégiens 1 et 2 appartiennent à ce profil. Le profil P2 qui correspond à la collégienne 3 est caractérisé par une répartition équitable entre St3 et St4, St5 étant absente. Dans le profil P3, la collégienne 4 utilise St1 dans 28% des cas et cinq doigts au plus. Si l'on considère le facteur « nombre de mains », il apparaît que seul le collégien correspond au profil généralement décrit dans la littérature à savoir bi-manuel et multi-digital. Les trois autres présentent des modes mixtes. Ces profils indiquent par ailleurs que les sujets n'utilisent pas exclusivement un type de

stratégie ; ils en changent principalement en fonction des figures proposées. Ainsi 92% des petits segments sont explorés avec un à deux doigts tandis que pour les formes curvilignes et les figures composées la stratégie St4 prédomine. Pour les moyens et les grands segments, les sujets sollicitent en général trois à quatre doigts pour les explorer. Enfin, pour les angles on retrouve presque autant de stratégies St3 que St4.

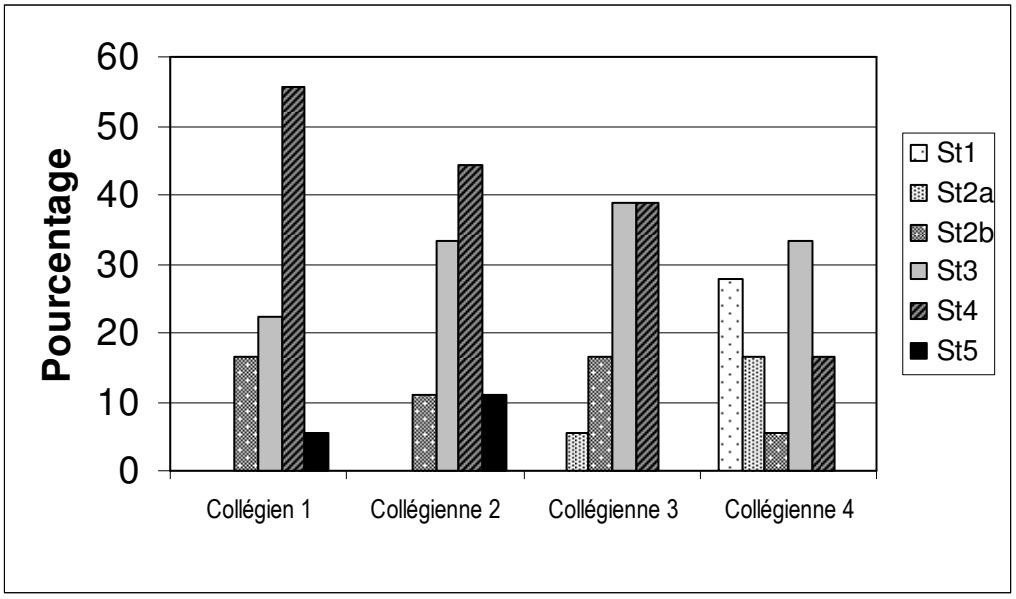


Figure 24 : Pourcentage d'utilisation des stratégies par sujet

3.6.3 Conclusion et perspectives pour la conception

Les bonnes performances d'identification enregistrées au cours de cette étude ne sont pas surprenantes et sont conformes aux résultats obtenus dans des études antérieures. Millar (1991) a observé que, pour des formes géométriques simples, la reconnaissance est de 100% pour le cercle, 91% pour le triangle, 83% pour le carré et 45% pour la croix alors qu'elle ne dépasse pas les 5% pour la représentation de la figure humaine et le dessin de la maison.

Si, en accord avec les données de la littérature sur la psychologie de la perception tactile chez l'aveugle, nous observons que la majorité des explorations est bi-manuelle et qu'aucun sujet n'est exclusivement uni-manuel, on notera que la bi-manualité n'est systématique que pour deux sujets sur quatre. Par ailleurs, la collégienne 4 a eu recours à une stratégie uni-digitale pour sept figures, et dix ont été explorées de manière continue. Ce sujet présente ainsi le mode exploratoire qui se rapproche le plus de la situation médiatisée via Tactos. Or, lorsque ce mode est employé, il se montre tout à fait efficace. Il convient alors de caractériser ce qui contraint le changement de stratégie. La collégienne 4 a étendu son champ tactile en

mobilisant beaucoup plus de doigts et en utilisant notamment sa main non-dominante pour les formes curvilignes et les tableaux. Ces formes ont aussi fait l'objet d'explorations pluri-digitales et bi-manuelles chez les autres sujets.

Il serait intéressant de mener cette expérience à plus grande échelle, avec des sujets voyants et non voyants, de différents groupes d'âge, afin de vérifier si les trois profils identifiés suffisent à refléter la diversité des stratégies. Par ailleurs cela devrait permettre de dégager des procédures génériques d'accès aux propriétés de la figure (e.g. généralisation de la relation entre le nombre de doigts et la complexité des figures ou encore des types de mouvements). En outre, concernant les autres caractéristiques de l'exploration à savoir position des mains, continuité et type de mouvements, nous n'avons pas pu établir de regroupements sur la base de profils exploratoires.

En dehors des difficultés de lecture des dessins complexes, l'identification de graphiques 2D et d'objets physiques en situation traditionnelle ne pose donc pas de problèmes majeurs. En revanche, les technologies numériques qui proposent des interactions non-visuelles sont loin de garantir des résultats aussi satisfaisants. Les études réalisées avec des prototypes tels que le PHANToM (section 2.2) incriminent l'unicité du point de contact et la limitation de sa surface en contact avec l'objet. Effectivement, dans la situation traditionnelle, les sujets modulent l'empan tactile en fonction des dimensions de la forme. Nous avons également observé des mouvements simultanées ou en alternance des deux mains qui témoignent d'une mise en relation topologique des éléments de la figure : par exemple, le collégien 1 a simultanément immobilisé ses doigts sur les creux et les bosses de la vague. Il nous est possible de compléter cette comparaison entre les deux situations en soulignant la rapidité et la facilité d'accrochage de la forme en relief y compris lors des explorations uni-manuelles. Contrairement au mode médiatisé, le nombre de ruptures de contact sur support traditionnel demeure exceptionnel. En outre, l'utilisation de la main avec tous ses degrés de liberté autorise un éventail large de stratégies exploratoires. Nous avons pu relever ainsi des styles propres à chaque sujet et qui possèdent tous leur efficacité. Ces styles consistent en l'usage préférentiel de certaines stratégies digitales, dévoilant aussi une variabilité intra-sujet en fonction du type de forme.

Si cette analyse conclut à la supériorité de la situation traditionnelle, nous devons, néanmoins nuancer ce tableau :

* La familiarité des sujets avec ce type de support a été acquise au cours d'un apprentissage développé sur plusieurs années,

* Un des sujets a spontanément utilisé une stratégie qui se rapproche fortement de la stratégie exploratoire du suivi continu observée avec Tactos. Ce suivi continu mono-point coïncide également avec les stratégies des sujets voyants aux yeux bandés qui explorent des formes en relief (Hatwell, 1986).

* Enfin, dans les deux situations, les explorations des sujets présentent des insistances (identifiées sous la forme de micro-mouvements ou d'ancrage) aux niveaux des accidents topologiques.

La situation médiatisée limite de façon mécanique le nombre de stratégies possibles. On peut également se demander si ce niveau de contrainte se traduit aussi par une différence importante dans l'efficacité des stratégies possibles alors que sur support traditionnel les stratégies identifiées se sont toutes montrées efficaces. Avec Tactos, le suivi continu, nous a paru au cours des séances d'entraînement d'une efficacité supérieure à ce que nous avions pu observer avec les adultes aveugles ou aux performances rapportées par les études réalisées au sein du groupe suppléance perceptive. La situation suivante appréhende la question des performances perceptives et de leur évolution en lien avec une stratégie suggérée, en l'occurrence le suivi continu.

3.7 Etude de l'exploration et de la reproduction différée de figures géométriques simples auprès des collégiens et des adultes aveugles

- ***Objectif***

Après avoir formé les collégiens à la pratique de Tactos et au suivi de lignes, nous avons proposé aux six sujets aveugles une tâche de lecture et de reproduction d'objets graphiques simples. L'étude se déroule sur cinq séances. Il s'agit, d'une part, d'observer l'évolution des performances intra et inter-sujets au cours des différentes séances et d'autre part, d'analyser les trajectoires. Ainsi, ce travail vise à identifier les différentes stratégies exploratoires et à examiner le lien entre un type de stratégie et le niveau de performance. Nous avons formulé deux hypothèses :

1. Les performances augmentent au fil des séances ; la stabilisation des stratégies permettant d'atteindre de meilleurs résultats.
2. Le suivi continu et intégral de la forme facilite la perception de la forme.

3.7.1 Méthode

- ***Sujets***

Les six partenaires aveugles ont participé à l'étude. Ils sont tous familiers du dispositif.

Pendant les cinq séances de travail précédant cette étude, les collégiens ont été formés à l'utilisation du logiciel Tactos et entraînés à la reconnaissance de figures géométriques simples (droites, carrés, triangles, rectangles). Ils avaient pour consigne « d'essayer de rester accroché à la forme et de suivre l'orientation du trait en s'aidant de l'information donnée par les cellules braille ».

- ***Matériel***

Nous utilisons la version de Tactos précédemment présentée (voir Figure 18) et la matrice M4 (voir Figure 23).

Le répertoire de figures proposées comporte des quadrilatères, des formes composées de deux segments, des triangles et des formes curvilignes. L'épaisseur du trait est égale à quatre pixels (voir Tableau 29).

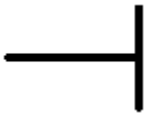
	Figure 1	Figure 2	Figure 3	Figure 4
SEANCE 1				
SEANCE 2				
SEANCE 3				
SÉANCE 4				
SÉANCE 5				

Tableau 29: Figures test (taille réelle)

- ***Procédure***

Les collégiens ont réalisé chacune des séances à une semaine d'intervalle. Les adultes, dont la participation a été décidée après coup, ont effectué l'ensemble des essais au cours d'une même demi journée.

Phase d'apprentissage

Lors de la séance, un court entraînement précède l'exploration des quatre formes de la session. Les sujets parcourent respectivement une horizontale, une verticale et une oblique. Ils sont invités à suivre la droite de façon continue. Les sujets sont placés en début de ligne.

Consigne : suivre la ligne, puis donner son orientation.

Temps d'exploration : limité à 30 secondes (les sujets ayant l'opportunité de répondre avant la limite).

Phase test

Au cours de la phase test, le sujet est placé directement sur la forme.

Consigne : explorer la forme puis la dessiner.

Temps d'exploration : limité à une minute (les sujets ayant l'opportunité de répondre avant la limite).

Deux types de traces ont été enregistrées par le logiciel Tactos: les trajectoires exploratoires et la reproduction différée de la figure[97] des sujets. Nous avons défini trois critères d'évaluation du dessin.

[97] Par souci de commodité, nous emploierons le terme dessin afin de désigner la reproduction différée de la figure

- ***Critères dévaluation du dessin[98]***

Lorsque le critère est satisfait un point est attribué dans le cas inverse la note est 0.

1. Dessin appartenant à la même famille géométrique que la figure : si la forme dessinée est un triangle et que la forme explorée est également un triangle, alors le critère est satisfait. Le tracé est dit correct (voir Tableau 30).

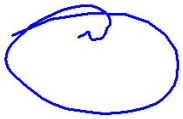
Figure	Dessin correct	Dessin incorrect
		

Tableau 30 : Exemples de tracé correct et incorrect

2. Précision du tracé : lorsque le dessin reproduit fidèlement les propriétés de la figure (voir Tableau 31) alors le dessin est considéré comme précis.

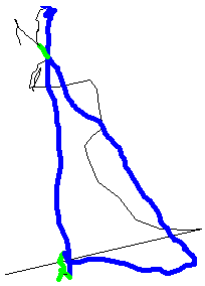
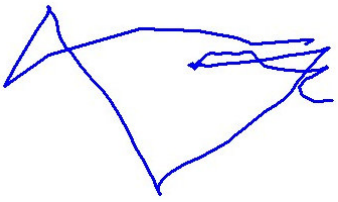
Figure	Tracé correct et précis	Tracé correct mais imprécis
		

Tableau 31 : Exemples de tracés précis et imprécis

[98] Il faut rappeler que les dessins sont produits à main levée avec le stylet sur la tablette. Le sujet peut ainsi conserver le même outil pour l'exploration et la production du dessin. En revanche, le dessin avec le stylet n'est pas des plus aisé compte tenu de l'absence de rugosité du support. Ceci s'ajoute au fait que le traçage s'opère sans contrôle visuel.

3. Compatibilité de l'exploration et de la production : lorsque la forme reproduite correspond aux trajectoires exploratoires alors le dessin est considéré comme compatible (voir Tableau 32).

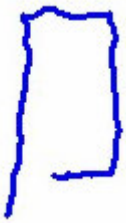
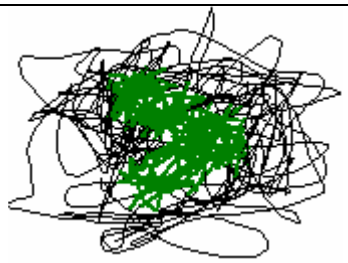
Figure	Traces de l'exploration	Dessin compatible
		
Figure	**Traces de l'exploration**	**Dessin non compatible**
		

Tableau 32: Exemples de compatibilité et de non-compatibilité de l'exploration et la production

Afin de décrire les stratégies perceptives, six caractéristiques exploratoires ont été retenues et une grille de codage des mouvements a été élaborée (voir Tableau 37).

- ***Critères d'évaluation quantitative de la trajectoire exploratoire***

Nous avons ainsi considéré les observables suivants :

1. L'intégralité de l'exploration
2. Le taux de couverture de la figure (en pourcentage)
3. Le taux de contact (en pourcentage)
4. Le temps maximal de contact (en secondes)
5. Le nombre de ruptures de contact
6. La vitesse moyenne de déplacement (en pixels par seconde)

1. l' intégralité de l'exploration : si le sujet a exploré l'ensemble de la figure alors le critère est satisfait et un point est attribué, dans le cas inverse la note est 0 (voir Tableau 33).

Figure	Exploration intégrale	Exploration incomplète

Tableau 33 : Exemples d'explorations intégrale et partielle

2. Le taux de couverture de la forme : cet observable indique en pourcentage la proportion de la figure qui a été parcourue par le sujet (voir Tableau 34)

Figures					
Traces de L'exploration					
Taux de couverture	Entre 0 et 24%	Entre 25 et 49%	Entre 50 et 74%	Entre 75 et 99%	100%

Tableau 34 : Illustrations des différents niveaux de couverture

La couverture est envisagée selon une autre dimension : celle des passages prolongés et/ou répétés. Ce phénomène se traduit visuellement par des « pâtés » (voir Tableau 35)).

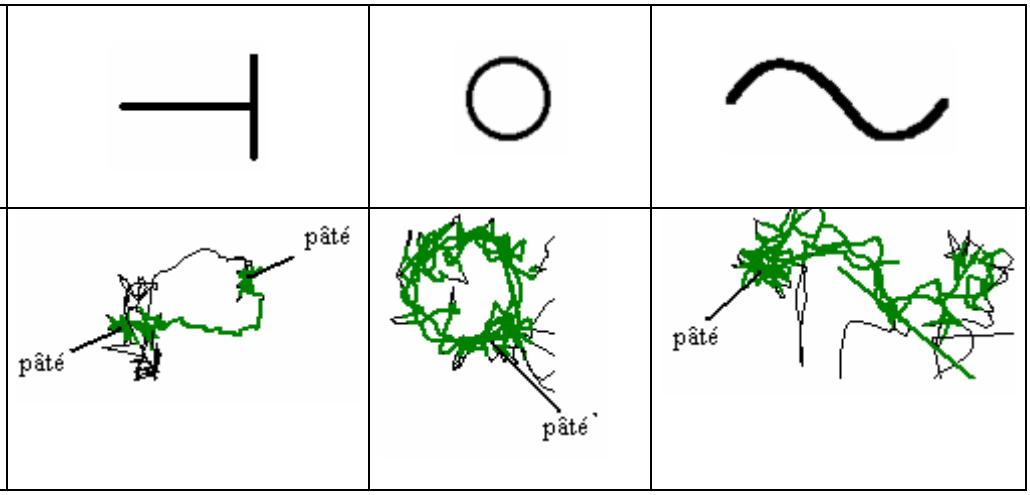
Figures			
Traces de l'exploration			

Tableau 35 : Exemples de traces d'explorations comportant des pâtés

3. Les ruptures de contact, comptabilisées par le logiciel Tactplayer (voir annexe 5), elles sont de différente nature :

* Les brèves sorties surviennent fréquemment et aussi bien sur les longueurs qu'aux extrémités.

* Les pertes prolongées se caractérisent par des errances de plusieurs secondes en dehors de la forme. Nous avons systématiquement comptabilisé les pertes de plus de cinq secondes.

* Les boucles de recherche correspondent à des sorties volontaires. Le sujet prend l'initiative de quitter la forme et se lance dans des boucles de recherche à partir d'une extrémité ou d'un angle. (voir Tableau 36)

* Les pertes initiales : il existe également des sorties fréquentes en début d'exploration. Bien que positionné sur la forme, parfois le sujet n'arrive pas à s'y maintenir car le stylet a tendance à glisser sur la tablette graphique. Cette situation entraîne généralement une errance de quelques secondes.

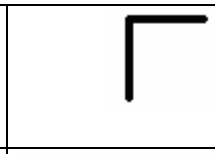
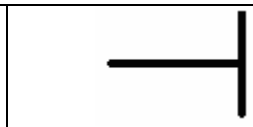
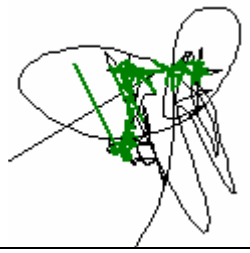
Figures			
Traces d'exploration			

Tableau 36 : Exemples d'explorations avec boucles de sorties volontaires de fin de lignes

4. Le taux de contact : cet observable établit le rapport entre temps de contact (en secondes) et le temps total de l'essai (en secondes). Il est calculé automatiquement par le logiciel Tactplayer (voir annexe 5)

5. Le temps maximal de contact indique pour un essai le temps de contact le plus long (en secondes). Il est calculé automatiquement par Tactplayer.

6. La vitesse moyenne de déplacement : elle indique la moyenne des vitesses instantanées ce qui donne une indication de la vitesse globale.

Ces indices descriptifs permettent de situer les sujets les uns par rapport aux autres et d'apprécier la variabilité des différentes composantes de l'exploration. Afin de mettre en évidence l'efficacité des stratégies, il faut alors établir un rapprochement entre les valeurs des indices et les résultats obtenus.

- ***Evaluation qualitative des mouvements exploratoires***

Les mouvements sont distingués selon leur longueur et leur aspect rectiligne ou oscillatoire. Les différents types de mouvements identifiés sont définis dans le tableau suivant. L'occurrence et la localisation du mouvement sont codées à l'aide d'une grille (voir Tableau 37). La synthèse de ces données contribue à définir un style exploratoire par sujet.

Macro mouvements	
Suivi continu sur une longueur entière	Le sujet suit la direction de la ligne et évite de la perdre.
Suivi continu complet de la forme	Le sujet a été en mesure de suivre la forme entière d'une « traite. »
Macro balayage ou scanning	Le sujet traverse la forme de part en part. Le changement de direction du geste se produit après le parcours d'une longue distance.
Grandes boucles de recherches	Le sujet quitte la forme à un endroit pour la recroiser à un autre après avoir parcouru une longue distance
Mouvements intermédiaires et micro mouvements	
Tapotement latéral	Le sujet quitte la forme effectue une demi boucle sans la traverser avant de toucher la forme à nouveau
Portion de suivi continu avec retour en arrière	Le sujet parcourt une partie de la longueur et revient sur ses « pas. »
Balayage de l'épaisseur du trait ou encore micro-balayage	Le balayage d'une périodicité courte s'effectue perpendiculairement au trait sans donner forcément lieu à des sorties.
Petites boucles	Les mouvements esquissés sont circulaires et ont lieu sur la forme ou dans son voisinage restreint (on observe fréquemment ce genre de mouvement en fin de ligne).
Petits mouvements pluridirectionnels	Le sujet parcourt une zone limitée en changeant fréquemment de direction. Les traces locales prennent la forme d'une étoile.

Tableau 37 : Grille de codage des différents types de mouvements

3.7.2 Résultats

3.7.2.1 Performances des collégiens

- ***Collégien 1***

Le dessin

Au cours des quatre premières séances, le collégien 1 a systématiquement exécuté un dessin correct de la figure. En séance 5, seulement deux figures ont été correctement reproduites. Le nombre de dessin précis varie entre un et trois lors des quatre premières séances. En cinquième séance, aucun dessin précis n'est relevé. Le critère de comptabilité est assez bien satisfait avec au moins trois dessins compatibles par séance.

L'exploration

La capacité à mener des explorations intégrales se manifeste dès la séance 1. Au final, 19 figures ont été explorées intégralement. Le trapèze constitue l'exception : son niveau de couverture se situe entre 74 et 99%. Des pâtés (voir définition dans la section 3.7.1) se localisent aux angles, aux extrémités, entre deux segments (dans le cas des formes étroites) et dans une moindre mesure sur les segments.

Le nombre moyen de ruptures de contact varie entre 15 et 30. On recense une dizaine de boucles de recherche, celles-ci survenant notamment lors de l'exploration de formes ouvertes. A six reprises, on assiste à une perte de contact avec la forme au démarrage de l'exploration (recherches initiales). Le taux de contact moyen est compris entre 78 et 90%, le temps d'accroche maximale moyen entre 8 et 18 secondes. La vitesse moyenne se situe entre 29 et 37 pixels par seconde. On constate des différences entre la séance 4 et la séance 5 concernant le taux de contact (76% en séance 4 contre 90% en séance 5), le temps d'accroche maximale (huit secondes en séance 4 contre 18 en séance 5) et le nombre de ruptures dans l'exploration (32 en séance 4 contre 15 en séance 5). On peut supposer que l'aisance éprouvée par le sujet en séance 4 a donné lieu à des sorties plus fréquentes et plus longues. Si on fait abstraction de la séance 4, on observe alors que le nombre de pertes diminue progressivement (31 pertes en séance 1 contre 15 en séance 5) et que le taux de contact (77% en séance 1 contre 90% en séance 5) et le temps d'accroche maximale augmentent de façon linéaire (neuf secondes en séance 1 contre 18 en séance 5). Nous verrons que cette évolution va se confirmer lors de l'étude suivante.

Chez Le collégien 1, le suivi continu, plus ou moins rectiligne, concerne l'ensemble des explorations. Huit d'entre elles comportent un épisode de suivi continu de l'ensemble de la forme. Les micro-mouvements se présentent dans toute leur diversité et portent sur l'ensemble des figures. Le tapotement latéral apparaît occasionnellement (quatre occurrences) et essentiellement lors des premières explorations. Les macro-mouvements sont plus rares (deux occurrences). Au cours d'un essai, le sujet exécute plusieurs types de mouvements (voir Tableau 38). Ainsi, le sujet peut débuter son exploration aussi bien par des micro-mouvements multidirectionnels (en étoile) que par du suivi continu[99].

[99] Certains mouvements restent cependant difficiles à classer dans l'une des catégories désignées dans la grille.

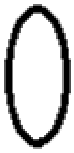
Figure			
Trace de l'exploration	exploration avec boucles de recherche	exploration avec tapotement latéral et macro-mouvements	Exploration présentant du suivi continu et des insistances locales

Tableau 38 : Exemples de traces exploratoires du collégien 1

Il est possible de recenser des points communs entre les explorations sur support traditionnel et les explorations médiatisées. Dans les deux situations, une grande variété de mouvements s'y déploie. La couverture de la forme qui, dans l'exploration traditionnelle, se manifeste par l'emploi des deux mains et un nombre de doigts supérieurs à cinq se traduit ici par un taux de contact et de couverture élevés. Le suivi continu de l'ensemble de la forme est nettement plus présent sous Tactos ; il s'explique par :

* Des formes beaucoup plus petites que celles utilisées lors de la lecture sur papier thermogonflé
* L'unicité du point d'action (sur support traditionnel, les mains se partageaient l'espace d'exploration)

- ***Collégienne 2***

Le dessin

A la première séance, la collégienne 2 n'a satisfait que le critère de compatibilité. Le nombre de dessins corrects (deux dessins corrects en séances 2, 4 et 5 et un dessin correct en séance 5)

et de dessins précis (un dessin précis aux séances 4 et 5) ne progressent pas lors de ces cinq séances. Les formes dessinées sont néanmoins cohérentes avec les traces de l'exploration.

L'exploration

Sur l'ensemble des séances, la collégienne a réalisé quatre explorations intégrales : deux en séances 2 et une aux séances 3 et 4. Elle a néanmoins réussi, lors des séances 4 et 5, à reproduire correctement des figures malgré des explorations partielles. En fonction des propriétés morphologiques de la figure et du fait de sa familiarité avec le répertoire des figures proposées, le sujet a ainsi pu réaliser des inférences. Les pâtés et les insistances sont nombreux et constituent parfois l'essentiel de l'exploration.

Le nombre moyen de ruptures reste compris entre 22 et 28. On recense en tout huit cas de pertes prolongées (temps hors contact supérieur à cinq secondes) et sept pertes initiales. Le taux de contact moyen (compris entre 65 et 70 %), et le temps d'accroche maximale moyen (compris entre 8 et 12 secondes) varient peu d'une séance à l'autre. La vitesse connaît une augmentation brutale en séance 2 et passe ainsi de 15 à 40 pixels par seconde. Cette hausse s'explique par une situation de perte prolongée de la vague (14 secondes) : hors figure, le sujet a eu tendance accélère ses déplacements.

Une grande variété de micro-mouvements établit la direction de la ligne ou la mesure de l'angle. 18 essais sur 20 présentent des micro-mouvements. Seules deux explorations ont comporté essentiellement du suivi continu. La collégienne peut rester localisée longuement sur une partie de la forme. Elle épuise alors l'ensemble des micro-mouvements répertoriés dans une sorte de piétinement (du micro-balayage et des retours sur les traces précédentes) (voir Tableau 39). Le temps imparti n'est plus suffisant pour mener une exploration intégrale. Le suivi continu (14 occurrences) est acquis à l'issue d'une familiarisation avec la forme. Le nombre de tours complets de la forme demeure plus faible que chez les autres adolescents (trois occurrences). Les explorations donnent une impression de lenteur contredite par les mesures de vitesse. Le retour fréquent sur les traces précédentes, que ce soit en suivi continu ou par des mouvements de balayage, est à l'origine de ce semblant d'immobilité.

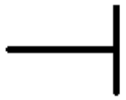
Figure			
Trace de l'exploration	exploration avec suivi continu, « pâtés » et boucles de sorties.	exploration comportant des « piétinements »	exploration ayant présenté un tour complet de la forme, malgré des situations de perte prolongée

Tableau 39 : Exemples de traces exploratoires de la collégienne 2

Un parallèle peut être établi avec l'ancrage plus appuyé des explorations sur support traditionnel. En revanche, sur papier thermogonflé, la collégienne 2 n'avait aucune difficulté à parcourir la forme dans son intégralité.

- ***Collégienne 3***

Le dessin

Après avoir progressé jusqu'en troisième séance (le nombre de dessins corrects et précis passent respectivement de 1 à 4 et de 0 à 3), les scores décroissent (deux dessins corrects et un dessin précis en séance 5). En cinquième séance, on ne relève aucun dessin correct. La compatibilité du dessin concerne en moyenne trois dessins sur quatre.

L'exploration

13 formes ont été explorées intégralement : deux aux séances 1 et 5 et trois aux séances 2, 3 et 4. Cinq explorations offrent un taux de couverture entre 75 et 99%. Deux explorations présentent un taux de couverture entre 25 et 49%. Les pâtés et les insistances prennent place aux accidents topologiques.

Le nombre moyen de ruptures de contact est compris entre 23 et 40. On comptabilise deux situations de pertes prolongées et deux pertes initiales. Le taux de contact moyen varie de 53% à 75%. Le temps d'accroche maximale moyen évolue peu, il oscille entre 5 et 10 secondes. La vitesse moyenne de déplacement se situe entre 15 et 32 pixels par seconde. Le taux de contact, le nombre de ruptures de contact et la vitesse sont assez contrastés entre la séance 2 et la séance 3 (séance à laquelle, la collégienne a obtenu les meilleurs scores). Le taux de contact est minimal en séance 2 et maximal en séance 3. Le nombre de ruptures de contact et la vitesse sont maximaux en séance 2 et minimaux en séance 3. De la séance 3 à la séance 5, ces caractéristiques sont relativement proches, celles-ci témoignent d'une consolidation de la stratégie de suivi continu.

L'analyse de l'exploration nous confirme que, figure après figure, le suivi continu se met progressivement en place. En effet, les premières explorations plutôt multidirectionnelles finissent par laisser place à des explorations dites « prototypiques » (en référence aux explorations observées lors de la lecture de forme sur papier thermogonflé) avec insistance aux sommets et aux extrémités et suivi continu sur les longueurs, voire à des explorations exclusivement en suivi continu (voir Tableau 40). Les micro-mouvements concernent 18 formes. 18 explorations présentent des déplacements en suivi continu et six figures font l'objet d'un tour complet. Malgré l'acquisition de cette aptitude, on constate néanmoins des explorations totalement discontinues comme celle du rectangle de la quatrième séance (qui n'aurait pas dû présenter de difficulté) et du losange. On relève occasionnellement du tapotement latéral (trois occurrences) et du macro-balayage (trois occurrences).

Figures			
Traces de l'exploration	exploration discontinue (ruptures fréquentes) observée en séance 1	Exploration présentant du suivi continu	exploration présentant une grande discontinuité dans les déplacements

Tableau 40 : Exemples de traces exploratoires de la collégienne 3

Sur support traditionnel, les éléments de continuité n'apparaissaient pas nettement et les mouvements étaient pluridirectionnels et disconjugués : cette tendance est présente dans bien des explorations sous Tactos mais le sujet développe ici une capacité au suivi continu qui se solde néanmoins par des résultats encore incertains.

- ***Collégienne 4***

La reproduction différée de la figure

De la première à la quatrième séance, le nombre de dessins corrects et le nombre de dessins précis augmentent progressivement. Ils évoluent respectivement de 1 à 4 et de 0 à 3. En dehors de la première séance où l'on ne relève qu'un seul dessin compatible, le critère de compatibilité est systématiquement satisfait.

L'exploration

Si l'intégralité de l'exploration n'est pas réalisée à la première séance, le sujet progresse de façon notable sur ce point puisqu'aux séances suivantes, le taux de couverture est essentiellement de 100%. Les pâtés se répartissent aux angles, aux extrémités, aux intersections et sur certains segments.

Le nombre moyen de ruptures de contact varie de 19 à 35. Le nombre de « pertes initiales » s'élève à neuf. La valeur des observables fluctue modérément d'une séance à l'autre en ce qui concerne le taux de contact moyen (entre 65 et 80%), le temps d'accroche maximale moyen (entre 5 et 11 secondes). En revanche, la vitesse moyenne des déplacements oscille fortement d'une séance à l'autre passant de 15 à 48 pixels par seconde de la séance 1 à la séance 2 puis, de 20 à 50 pixels par seconde de la séance 3 à la séance 4. Les critères de l'exploration ne partagent pas la même évolution que ceux du dessin. A résultats proches, par exemple en séance 3 et 4, les valeurs prises par le temps maximal ou le taux de contact diffèrent.

Le suivi continu apparaît dès les trois premiers essais et concerne la quasi totalité des explorations (19). Le suivi continu complet de la forme concerne la moitié des explorations, proportion la plus élevée au sein des sujets. Toutes les explorations comportent des micro-mouvements. A partir de la deuxième séance, le sujet élargit sa palette exploratoire en faisant usage d'une plus grande variété de micro-mouvements. On constate également trois cas de macro-balayage (voir Tableau 41).

Figure			
Trace de l'exploration	exploration dite « prototypique »	exploration comportant des macro-mouvements	exploration mixte alternant micro-mouvements (côté haut) et suivi continu

Tableau 41 : Exemples de traces exploratoires de la collégienne 4

Les explorations de la collégienne 4 sur support traditionnel présentaient des similitudes avec l'exploration sous Tactos : stratégies mono manuelles voire mono digitales et des mouvements continus. Cette tendance à la continuité se confirme ici par sa capacité à effectuer des tours complets de la forme (10 occurrences).

3.7.2.2 Performances des adultes

- ***Adulte 1***

Le dessin

Le sujet a exécuté seulement un dessin correct (à la session[100] 1). Il n'y a aucun dessin précis. Le nombre de dessins compatibles est de deux à la session 1 et de trois aux sessions suivantes.

L'exploration

17 figures sont explorées intégralement. Le taux de couverture des trois autres se situe entre 75 et 99%.

Le nombre moyen de ruptures se situe entre 42 et 61, mais on ne recense pas de pertes prolongées. Les caractéristiques de l'exploration évoluent peu. Le taux de contact moyen se situe entre 37 et 45%. Le temps d'accroche maximale moyen tourne autour de trois secondes. La vitesse, plus variable, fluctue entre 65 et 98 pixels par seconde.

Dans l'ensemble, les valeurs des observables reflètent bien le style exploratoire. Comme l'indique le temps maximal de contact, le sujet ne reste pas accroché à la forme. Sa stratégie consiste à traverser la forme de part en part de façon multidirectionnelle et en resserrant éventuellement l'amplitude du scanning. Les macro-mouvements concernent au moins 15 figures et le tapotement latéral (stratégie privilégiée par le sujet) 18 figures. Le tapotement latéral est exécuté de façon quasi exclusive ou en alternance avec du macro-balayage et du micro-balayage (plus rarement) (Tableau 42).

[100] Comme les adultes ont effectué l'ensemble des essais au cours d'une demi-journée, nous préférons employer le terme de session plutôt que celui de séance.

Figure			
Trace de l'exploration	Exploration présentant du macro-balayage	Exploration avec une dominante de tapotement latéral	exploration avec macro-balayage et tapotement latéral

Tableau 42 : Exemples des traces exploratoires de l'adulte 1

- ***Adulte 2***

Le dessin

Ce sujet réussit à reproduire correctement quelques figures : une seule aux sessions 3 et 5, deux en session 3 et trois en session 4. L'évolution du nombre de dessins corrects partagent des points communs avec celle des collégiens : un assez bon score en session 4 et une chute en session 5. On ne relève aucun cas de dessin précis. La compatibilité est bonne dans l'ensemble. Le sujet donnait généralement sa réponse sans avoir exploité les soixante secondes d'exploration.

L'exploration

De la session 1 à la session 4, le sujet exécute essentiellement des explorations intégrales. A la dernière session, l'intégralité a beaucoup chuté. On relève 16 explorations intégrales et 4 dont le taux de couverture varie dans un intervalle de 75 à 99%.

Le nombre moyen de ruptures de contact diminue progressivement entre la deuxième et la cinquième session passant ainsi de 83 à 44. Le taux de contact moyen varie peu (il est compris

entre 43 et 52%). Le temps d'accroche maximale moyen reste sensiblement le même, il n'excède jamais trois secondes. Les explorations se caractérisent par des mouvements exploratoires particulièrement rapides : de 100 à 142 pixels par seconde.

Le style exploratoire de l'adulte 2 consiste essentiellement en un scanning multidirectionnel de la forme (voir Tableau 43). L'amplitude du balayage peut se restreindre. Il existe quelques cas de micro balayage de l'épaisseur du trait notamment avec les formes ouvertes. Le suivi continu demeure rare (un cas).

Figure			
Trace de l'exploration	exploration avec macro-balayage multidirectionnel	exploration avec balayage resserré et un épisode de suivi continu	Exploration partielle avec macro-balayage

Tableau 43 : Exemples de traces exploratoires de l'adulte 2

3.7.2.3 Evolution des performances des collégiens

Dessin correct

A la première séance, il existe une différence importante entre le collégien 1 et les autres sujets. Cet écart est comblé à la séance 3 par les collégiennes 3 et 4. Trois sujets sur 4 chutent en cinquième séance (voir Figure 25). Il semblerait que cette diminution provienne de la difficulté à explorer le X (forme ouverte de la séance 5) et le losange (quadrilatère de la séance 5). En outre, l'ellipse (forme curviligne de la séance 5) était, du fait de la faible résolution de la plage tactile, difficilement discernable d'un rectangle. Il existe deux formes d'évolution des résultats : chez les collégiennes 3 et 4, l'évolution du score prend la forme d'une courbe en cloche alors que chez le collégien 1 et la collégienne 2, la variabilité inter séance est beaucoup plus faible.

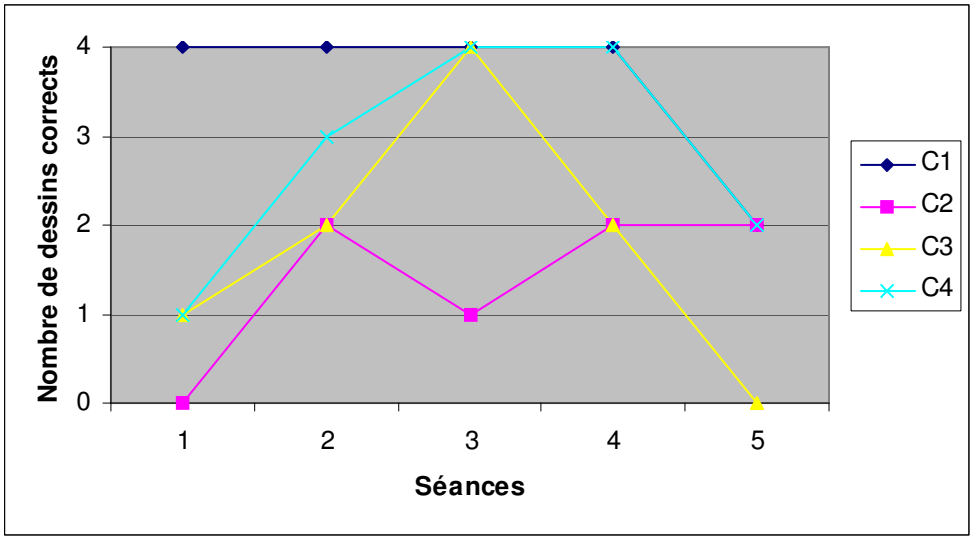


Figure 25 : Evolution du nombre de dessins corrects chez chaque collégien

Précision du dessin

Pour ce critère également, le collégien 1 démarre avec une avance sur les trois autres collégiennes (voir Figure 26). Il sera dépassé à la troisième séance par les collégiennes 3 et 4 dont la progression suit une évolution analogue à celle de la justesse du tracé. A nouveau le score de la collégienne 2 montre un léger progrès en séance 4 et 5.

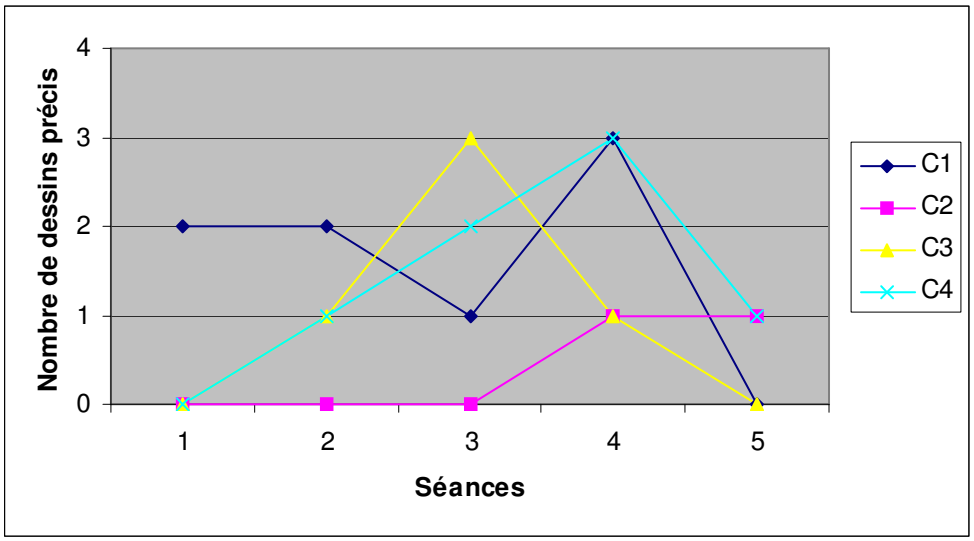


Figure 26 : Evolution du nombre de dessins précis chez chaque collégien

Compatibilité

Les scores sont assez bons et varient peu d'un sujet à l'autre (voir Figure 27). La collégienne 4 qui avait obtenu un mauvais score à la séance 1 rejoint les autres collégiens à la séance 2.

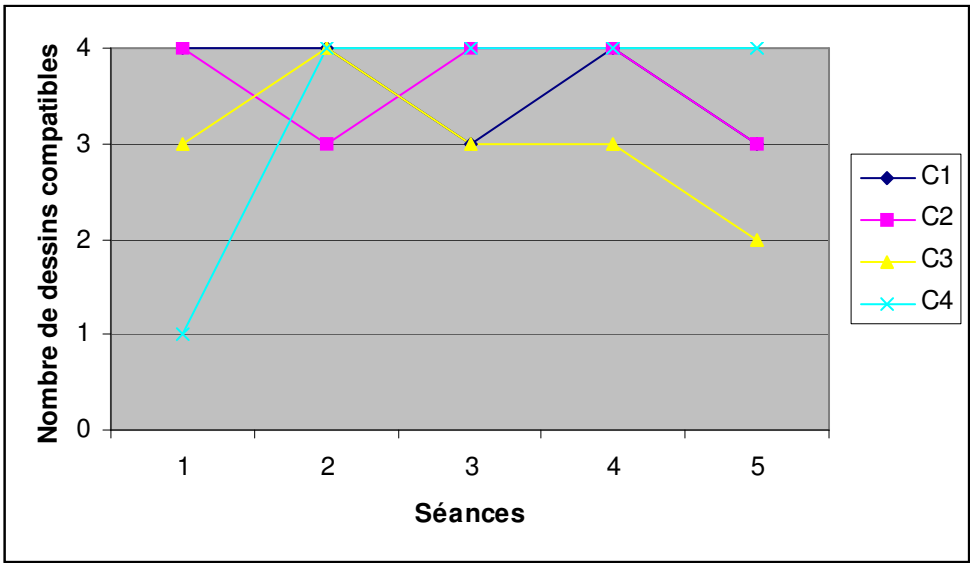


Figure 27 : Evolution du nombre de dessins compatibles avec l'exploration chez chaque collégien

3.7.2.4 Comparaison des performances en fonction du type de forme chez les collégiens

Dessin correct

Dans l'ensemble, les sujets ont éprouvé plus de difficultés lors de l'identification de formes ouvertes (voir Figure 28). Les formes les mieux identifiées sont les triangles.

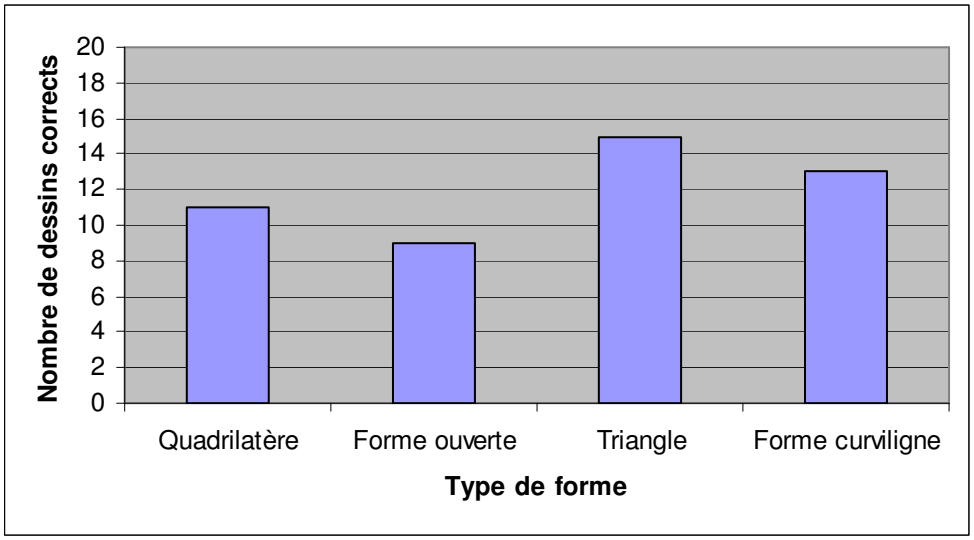


Figure 28 : Nombre de dessins corrects par types de forme chez les quatre collégiens

Précision du dessin

Le manque de précision affecte particulièrement les formes curvilignes (voir Figure 29). Les tracés des sujets ne respectaient pas suffisamment les proportions des dessins explorées (voir Tableau 44).

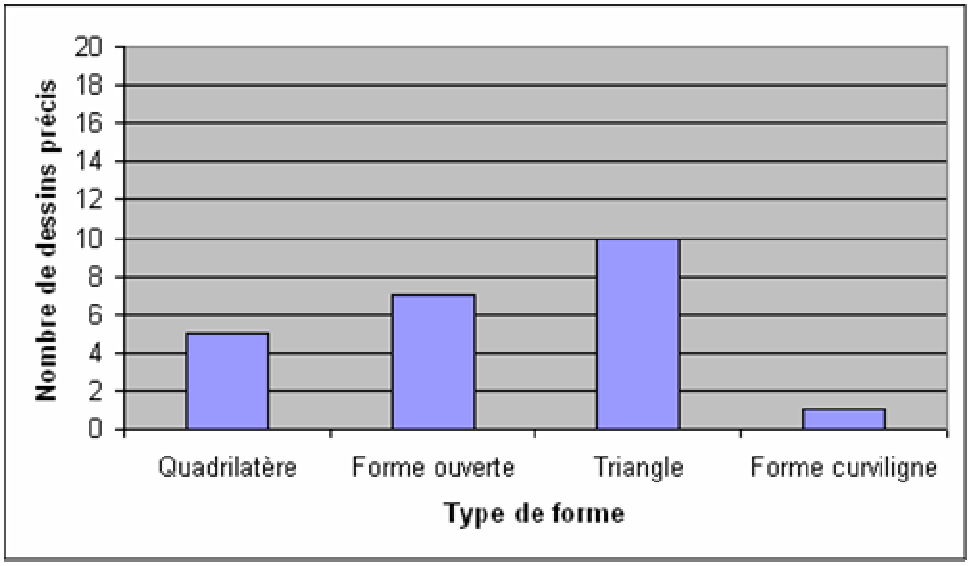


Figure 29 : Nombre de dessins précis par type de forme chez les quatre collégiens

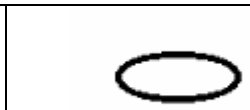
Figure			
Figure dessinée			

Tableau 44: Exemples de tracés imprécis bien que corrects (cf. critères)

Examinons à présent comment évoluent chez les collégiens les caractéristiques globales de l'exploration.

3.7.2.5 Caractéristiques de l'activité exploratoire chez les collégiens

Intégralité de l'exploration

La variabilité inter sujets est importante (voir Figure 30). Le collégien 1 réalise essentiellement des explorations intégrales. La collégienne 2 obtient systématiquement un score inférieur à celui des trois autres sujets. Les collégiennes 3 et 4 évoluent de façon similaire.

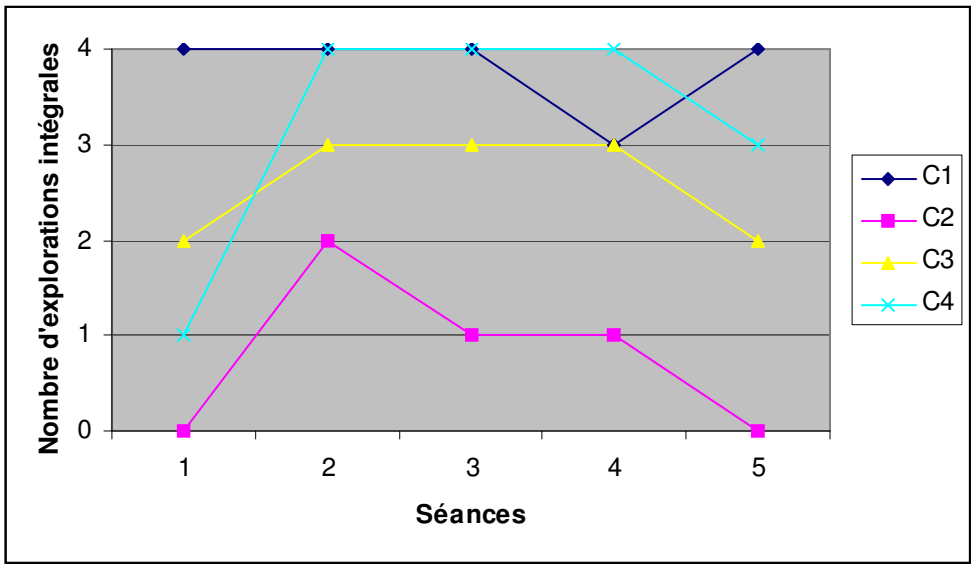


Figure 30 : Evolution du nombre d'explorations intégrales chez chaque collégien

Ruptures de contact avec la forme

D'une séance à l'autre, et d'un sujet à l'autre les valeurs sont relativement proches, à deux exceptions près (voir Figure 31). Ainsi à la séance 2, le nombre de ruptures de contact de la collégienne 2 augmente et se situe bien au-dessus de celui des autres sujets. En séance 5, le nombre moyen de rupture de contact du collégien 1 chute à 15.

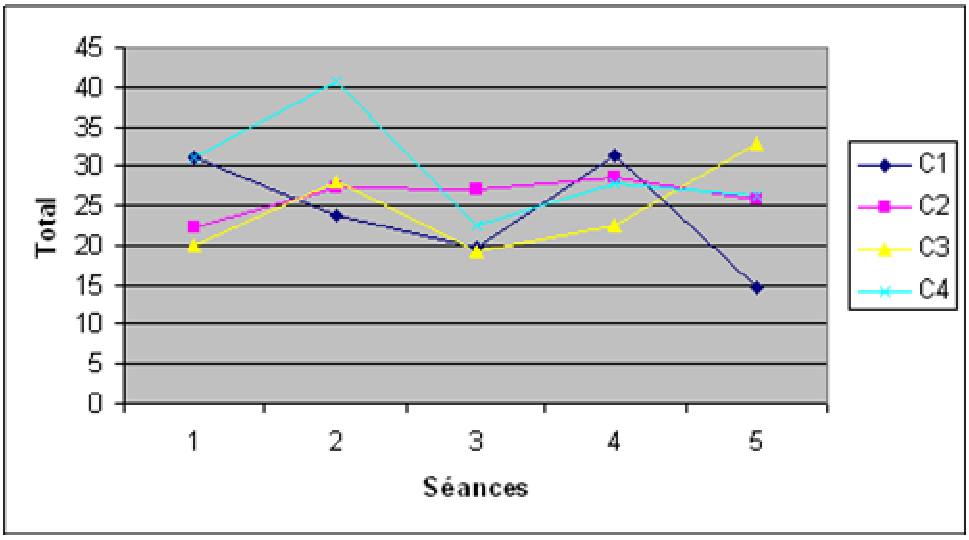


Figure 31 : Evolution du nombre moyen de ruptures de contact chez chaque collégien

Taux de contact

Les taux de contact des quatre collégiens sont relativement proches (voir Figure 32).

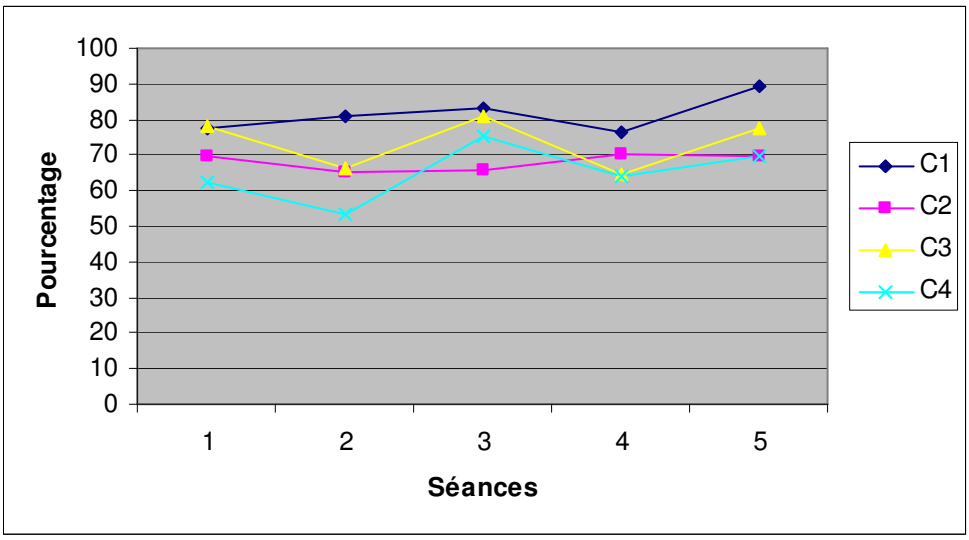


Figure 32 : Evolution du taux de contact moyen chez chaque collégien

Temps maximal d'accroche

De la séance 1 à la séance 4, le temps d'accroche maximal des sujets varie de 5 à 12 secondes (voir Figure 33). On n'observe pas de différences notables d'un sujet à l'autre. En séance 5, le

collégien 1 se démarque des autres sujets ; la valeur moyenne de son temps maximal de contact atteint alors 18 secondes, ce qui semble dénoter l'émergence d'un suivi continu épuré.

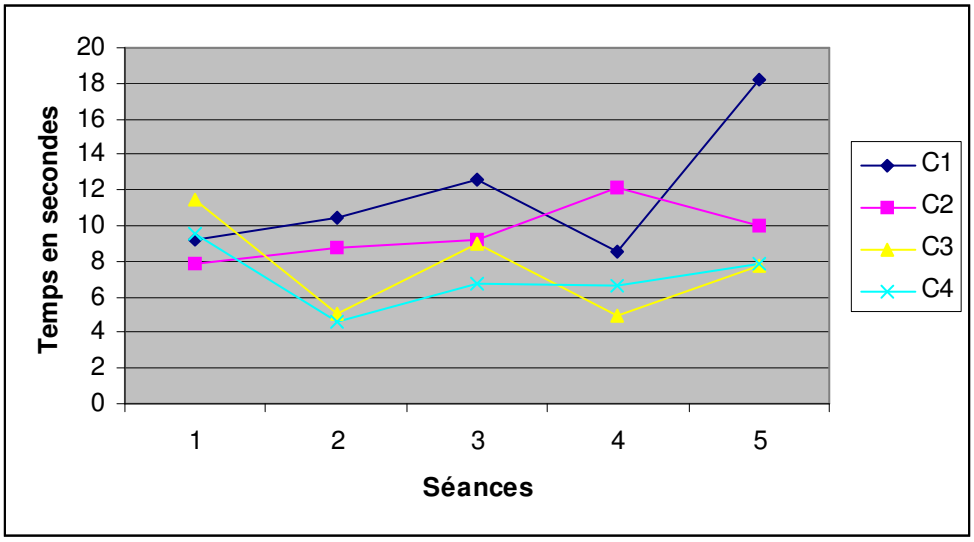


Figure 33 : Evolution du temps d'accroche maximale moyen chez chaque collégien

Vitesse d'exploration

La vitesse moyenne fluctue entre 20 pixels et 40 pixels par seconde (voir Figure 34). La vitesse du collégien 1 varie peu alors que celles des trois autres sont sujettes à de fortes variations. De la première à la troisième séance, la vitesse de déplacement des collégiennes 2, 3 et 4 présente la même évolution « en dents de scie ».

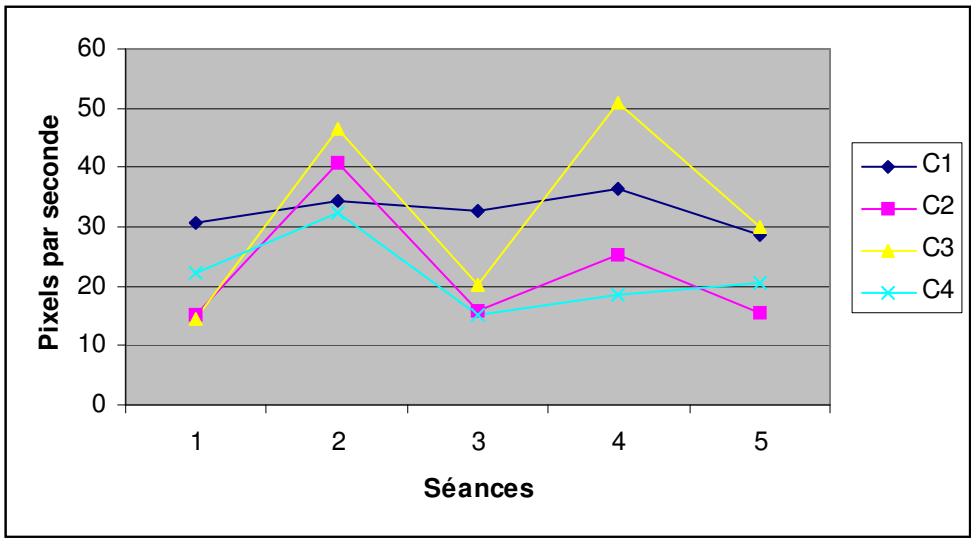


Figure 34 : Evolution de la vitesse d'exploration chez chaque collégien

3.7.2.6 Caractéristiques de l'activité exploratoire en fonction du type de forme chez les collégiens

Les formes ouvertes, notamment celles qui comportent un embranchement, font plus souvent l'objet d'explorations partielles. Les différences sont moins marquées entre les trois autres types de forme. On relève neuf explorations intégrales pour les formes ouvertes, 13 pour les quadrilatères, 14 pour les triangles et 16 pour les formes curvilignes.

Le nombre de ruptures de contact est très légèrement supérieur avec les formes ouvertes (28) et les formes curvilignes (27) qu'avec les quadrilatères et les triangles (24). Le taux de contact présente très peu de différences d'un type de forme à l'autre, sa moyenne oscille entre 70 et 75%. Le temps d'accroche maximale moyen varie peu et se situe autour de neuf secondes. Les différences de vitesse sont ténues : 25 pixels par seconde pour les quadrilatères, 27 pixels/sec. pour les formes ouvertes et les triangles, 28 pixels/sec. pour les formes curvilignes.

- ***Conclusion***

La chute des résultats en séance 5 vient contredire notre hypothèse initiale d'une progression constante. Nous attribuons cette baisse à la complexité des figures explorées en séance 5. Par ailleurs, l'évolution du nombre de dessins corrects et précis est différente d'un sujet à l'autre. La progression de la collégienne 4 est celle dont la régularité est la plus conforme à notre hypothèse. La collégienne 3 connaît une progression continue de la séance 1 à la séance 3. Le collégien 1 maintient son niveau de la première à la quatrième séance. Les résultats de la collégienne 2 ne s'améliorent pas vraiment.

Tous sujets confondus, le nombre de dessins corrects est moyen (48 figures sur 80). La précision de la reproduction ne concerne que 22 explorations sur 80. Même si les formes curvilignes (particulièrement difficiles à reproduire à main levée et sans retour visuel et tactile) ont été le plus affectées par le manque de précision, la faiblesse de ces résultats ne découle pas seulement de difficultés dans l'exécution du dessin. La compatibilité entre le dessin et les traces de l'exploration confirme que les sujets dessinent fidèlement ce qu'ils pensent avoir perçu. En outre, dans l'étude consacrée aux explorations sur papier thermogonflé, la précision des dessins réalisés par les sujets était satisfaisante. Il semblerait alors que, via Tactos, les sujets peinent à se forger une image précise de la forme explorée. Néanmoins, les résultats se sont améliorés au fil des séances (exception faite de la séance 5). Cependant, les différences relatives aux explorations (vitesse et intégralité) ne permettent pas

d'inférer une bonne ou une mauvaise perception de la figure. En revanche, les variables retenues reflètent bien les différences entre les stratégies exploratoires des collégiens et celles des adultes. La section suivante établit une comparaison entre les adultes et les adolescents aussi bien du point de vue des critères d'évaluation que de celui des caractéristiques de l'exploration

3.7.2.7 Comparaison des adultes et des collégiens

Les deux adultes, n'obtiennent pas de meilleures performances que les collégiens. Cet écart de performance en faveur des collégiens porte sur le nombre de dessins corrects et sur le nombre de dessins précis.

Dessin correct

L'adulte 2 réalise autant de dessins corrects que la collégienne 2 qui obtient le plus mauvais score. Les résultats des trois autres collégiens sont supérieurs à ceux des adultes (voir Figure 35).

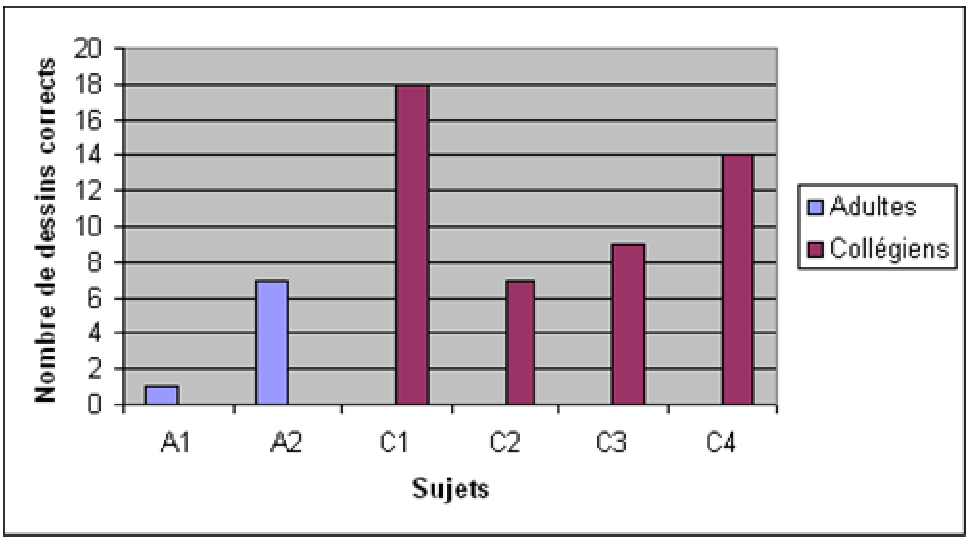


Figure 35 : Nombre de dessins corrects par sujet

Dessin précis

Alors que les adolescents peinent à se représenter la forme avec précision, les adultes ne satisfont jamais ce critère (voir Figure 36).

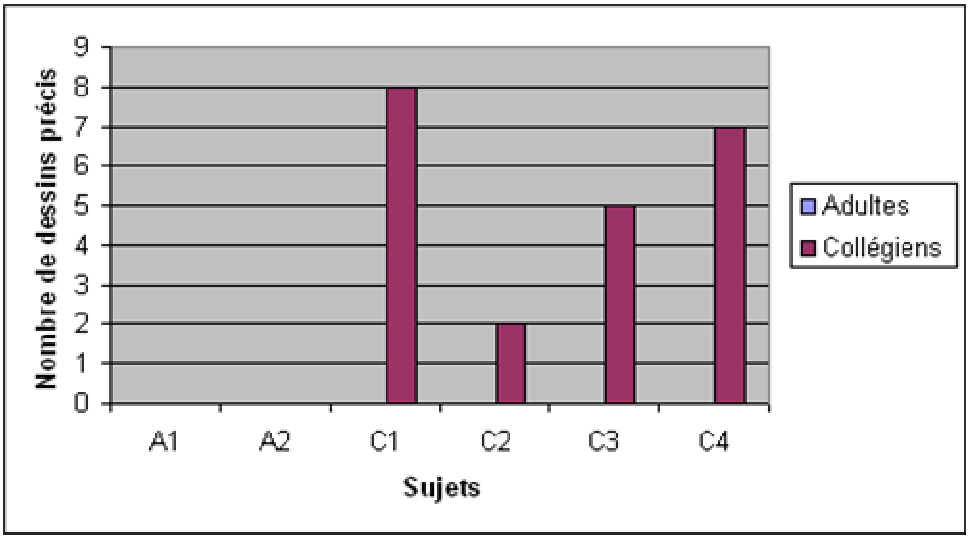


Figure 36 : Nombre de dessins précis par sujet

Dessins compatibles

L'adulte 1 qui a eu des difficultés à se remémorer la forme explorée obtient le score le moins élevé, la collégienne C3 le dépasse seulement d'un point. Le score de l'adulte 2 est proche de celui des trois autres collégiens (voir Figure 37).

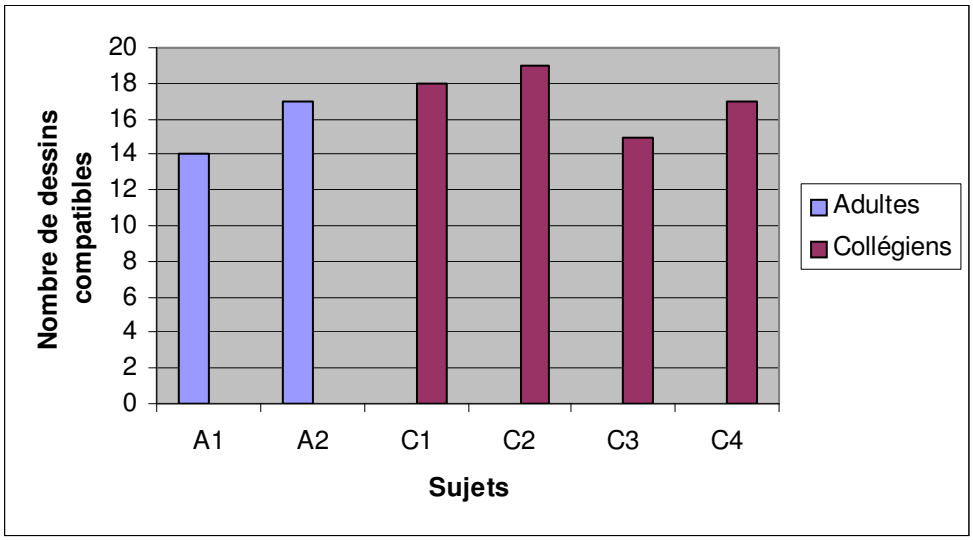


Figure 37 : Nombre de dessins compatibles avec les traces de l'exploration par sujet

Examinons si les données relatives aux caractéristiques exploratoires permettent d'expliciter les différences entre adultes et adolescents.

- ***Comparaison entre les explorations des adultes et celles des collégiens***

Intégralité de l'exploration

L'intégralité de l'exploration et un taux de couverture élevé ne semblent pas une condition suffisante de la bonne perception de la figure. En effet, les adultes réalisent souvent des explorations intégrales qui ne donnent pas lieu à la reproduction correcte de la figure.

En revanche, les différences en matière de nombre de ruptures de contact, taux de contact, temps maximal d'accroche et vitesse de déplacements viennent corroborer l'analyse des mouvements codés à l'aide de la grille : adultes et adolescents se distinguent de façon nette. Bien qu'encouragés à suivre l'orientation du trait, les adultes ont néanmoins effectué pour l'essentiel des « scanning » plus ou moins amples de la forme.

Ruptures de contact

Les sujets adultes, qui privilégient les mouvements de balayage, semblent rechercher une alternance régulière entre stimulation et absence de stimulation. Par conséquent, leur nombre moyen de ruptures de contact s'élève à 55 (adulte 1) et 70 (adulte 2) (voir Figure 38).

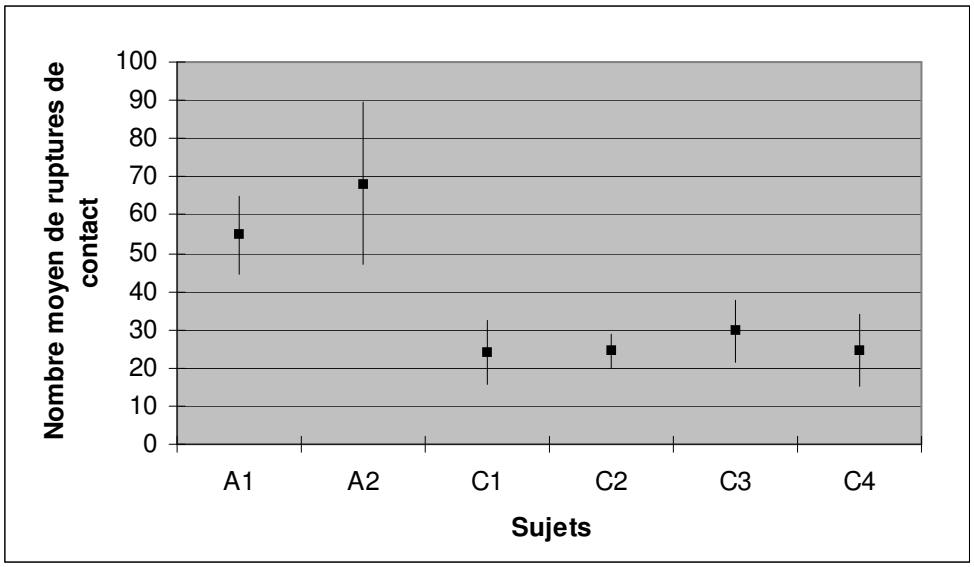


Figure 38 : Nombre moyen de ruptures de contact par sujet

Taux de contact moyen

Le taux de contact moyen de l'adulte 1 est de 40% et celui de l'adulte 2 de 46% (voir Figure 39) alors que les collégiens sont plus souvent présents sur la forme que hors forme.

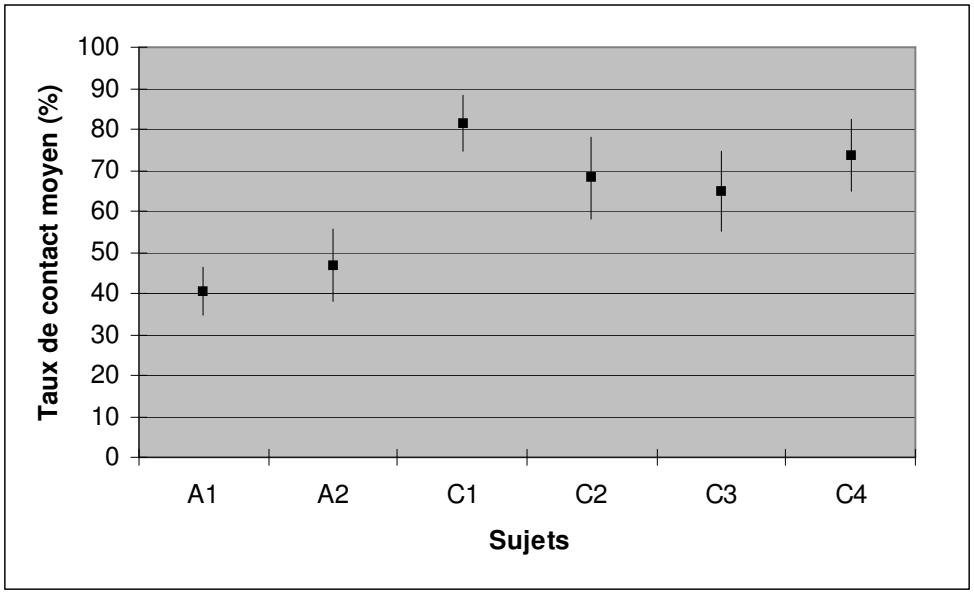


Figure 39 : Taux de contact moyen par sujet

Temps d'accroche maximale moyen

Formés à la méthode d'exploration dite du suivi continu, les collégiens peuvent parcourir la forme sans la perdre pendant une dizaine de secondes (voir Figure 40) tandis que le temps d'accroche maximale moyen prend des valeurs faibles chez les adultes (moins de 3,5 secondes).

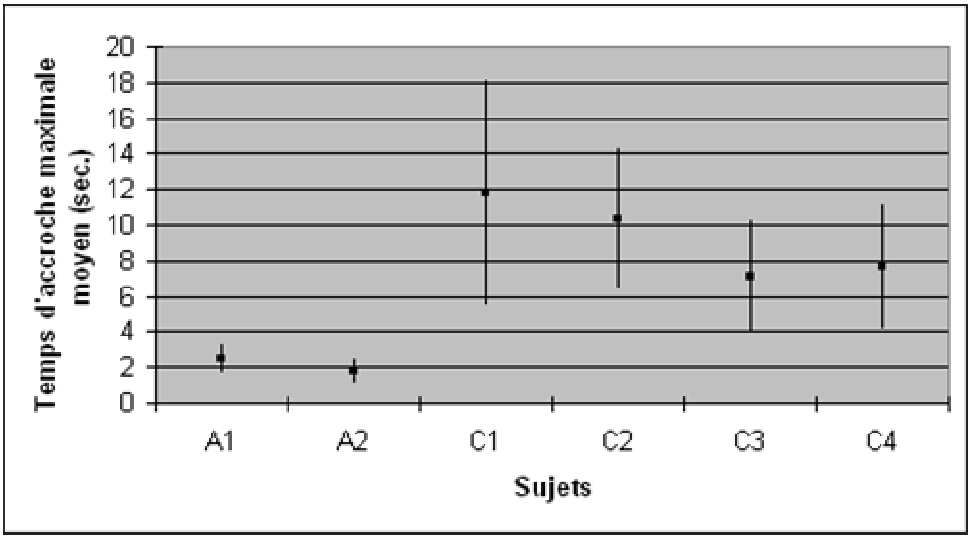


Figure 40 : Temps d'accroche maximale moyen par sujet

Vitesse moyenne

Chez les adultes, l'épaisseur du trait (voire la forme entière) est traversé de part en part avec rapidité ce qui contraste avec les déplacements des collégiens (voir Figure 41).

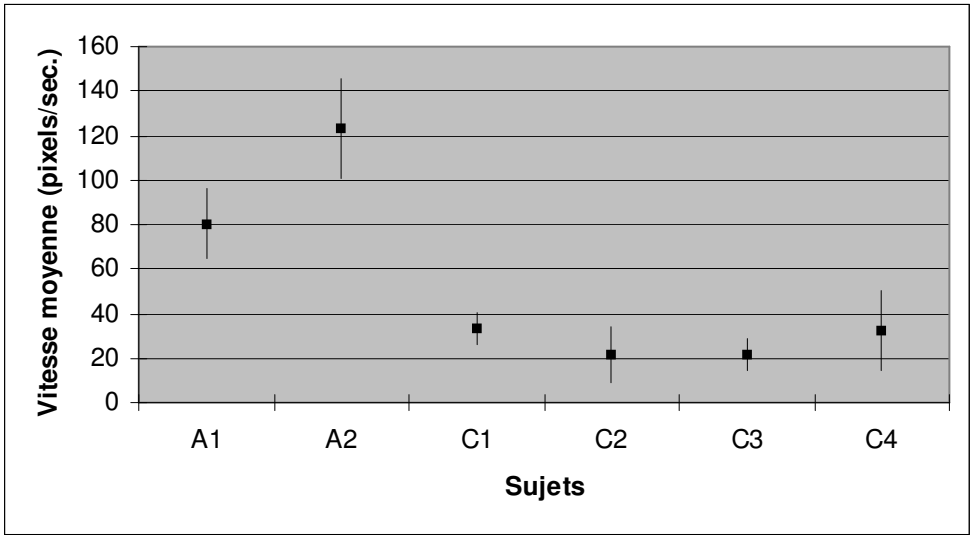


Figure 41 : Vitesse moyenne par sujet

A partir de ces données, on peut définitivement contraster deux stratégies exploratoires : des mouvements oscillatoires rapides qui traversent la forme chez les deux adultes et une stratégie d'accrochage local où les ruptures sont contraintes par les accidents topologiques chez les quatre collégiens. Il semblerait alors que le suivi continu accompagné de micro-balayages favorise mieux l'identification de la forme que le macro-balayage et le tapotement latéral.

3.7.3 Conclusion et perspectives pour la conception

Malgré le rappel de la consigne, les adultes n'ont pas pu se départir de leur style exploratoire adopté dès le début de l'appropriation de Tactos. Si ce dernier s'est montré satisfaisant pour différencier des figures dont les sujets avait déjà une idée (courbe dans un repère, intersection) en revanche il ne permet pas une perception précise des formes. Au cours d'une précédente étude (voir 3.5.6.2), nous avions observé que les adultes réussissaient à reconnaître les polygones seulement lorsqu'une assistance à l'activité était fournie (marquage sonore). Il en ressort que pour une appropriation aisée du dispositif, les utilisateurs gagnent à être initiés d'emblée à des techniques d'exploration à même de favoriser une perception fine. Sous l'effet répété de tâches qui ne nécessitent pas de précision motrice ou qui n'encouragent pas les sujets à exploiter la configuration des picots, les sujets développent des techniques qui seront difficilement modifiables en l'absence d'un nouvel entraînement systématique. Néanmoins, la suggestion d'une technique particulière a donné lieu à des performances très différentes chez les collégiens et ce malgré des caractéristiques exploratoires relativement proches. La chute en séance 5, nous enseigne que le niveau de maîtrise de l'ensemble des sujets reste incertain malgré les améliorations locales. Ces résultats nous ont invités à encourager les sujets à mettre en œuvre la stratégie de suivi et à considérer les performances obtenues à l'issue d'un nouvel apprentissage (voir étude suivante).

A cette étape du parcours de conception nous sommes également en mesure d'apporter des éléments de réflexion sur la démarche générale. Lors de notre étude exploratoire avec les deux adultes, notre objectif consistait essentiellement à vérifier la faisabilité d'une tâche. La prise en compte des stratégies exploratoires n'était pas systématique. L'activité a été décrite de façon globale et essentiellement à travers les difficultés rencontrées. Cette première analyse nous a amenés à proposer une assistance. Des études réalisées par d'autres laboratoires et dont le protocole expérimental avait essentiellement une visée évaluative ont conduit à des solutions similaires (voir partie 2.2). Néanmoins, ce type de méthodologie ne permet pas d'appréhender l'appropriation d'un dispositif. Si l'on se réfère à une conception constructiviste de l'instrument, en le considérant dans sa dimension artefact et dans sa dimension usage, alors on ne peut faire l'impasse d'une analyse approfondie de l'activité et de son évolution au cours du temps. En montrant le caractère décisif de la technique exploratoire, cette étude plaide en faveur d'une approche clinique.

3.8 Etude de l'exploration et de la reproduction différée de frises, de lettres et de formes curvilignes auprès des collégiens aveugles

- ***Objet***

Cette étude a été conduite trois mois après la précédente. Pendant cet intervalle de temps, les sujets ont continué à s'entraîner à l'usage de Tactos. Comme la stratégie du suivi continu nous a semblé plus efficace, nous avons encouragé les collégiens dans cette nouvelle étude à la consolider grâce à une série d'exercices portant sur des formes habituellement sujettes à erreur et à omission. Afin d'affiner le suivi, nous avons renforcé le niveau de contrôle du geste en choisissant une matrice plus petite. A travers ce travail nous cherchons à savoir si la maîtrise d'une technique exploratoire favorise la perception des changements de direction, des embranchements multiples et des formes curvilignes. Cette situation permet également d'appréhender les progrès réalisés depuis la dernière étude et de constater une éventuelle convergence dans les stratégies exploratoires.

3.8.1 Méthode

- ***Sujets***

Les quatre collégiens[101] ont participé à l'étude. Les exercices ont eu lieu lors des séances hebdomadaires réalisées au collège.

- ***Matériel***

L'interface Tactos est la même que celle de l'étude précédente.

La matrice utilisée est un carré de 16 champs élémentaires chacun ayant une surface de 2x2 pixels. La surface totale de la matrice est ici de 8x8 pixels (voir Figure 42).

[101] Un écrasement de données informatiques a provoqué la perte de l'ensemble des trajectoires exploratoires de la collégienne 3 ainsi que le fichier des explorations de lettres de la collégienne 4

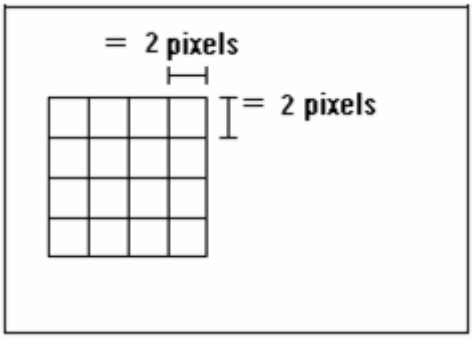


Figure 42 : Matrice M2

Trois types de figures ont été conçus : des frises, des formes curvilignes et des lettres (Tableau 45, Tableau 46 et Tableau 47).

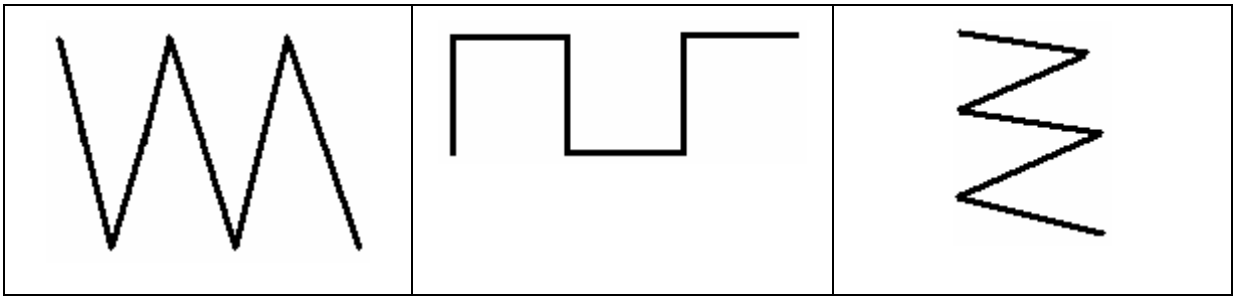


Tableau 45 : Exemples de frises utilisées lors de l'étude

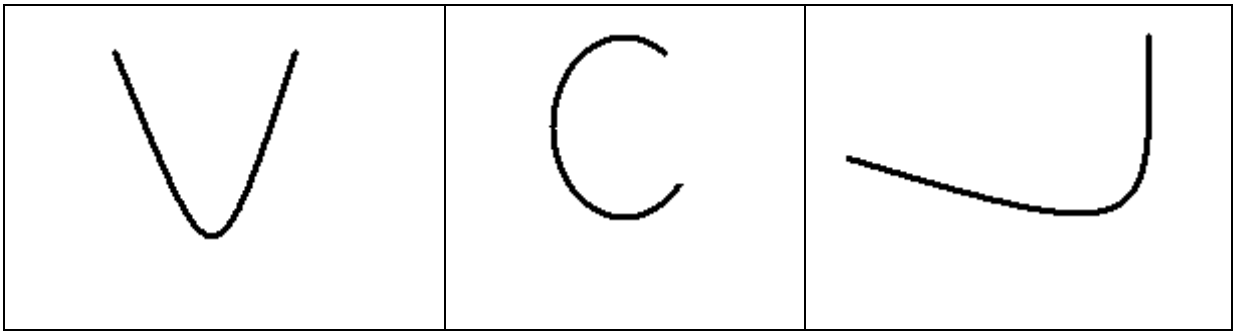


Tableau 46 : Exemples de courbes utilisées lors de l'étude

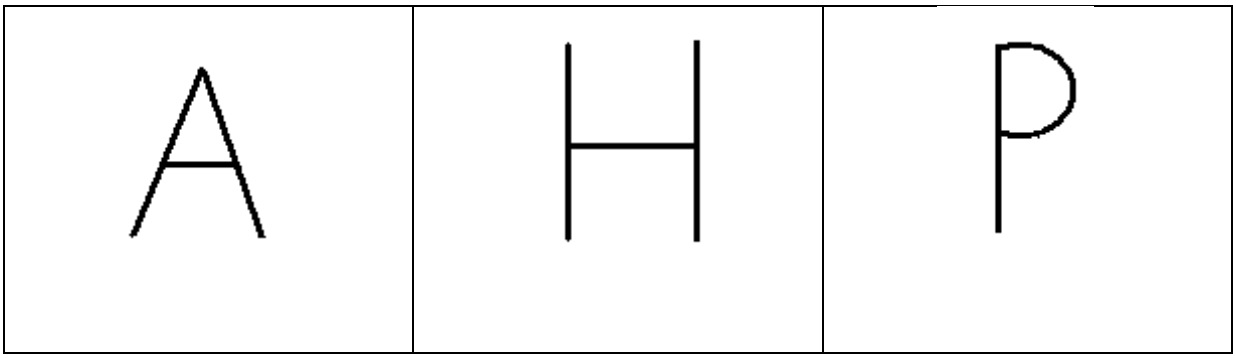


Tableau 47 : Exemples de lettres utilisées lors de l'étude

- ***Procédure***

Chaque séance hebdomadaire est consacrée à un type de forme : en séance 1, les frises ; en séance 2, les lettres ; en séance 3, les formes curvilignes. A titre d'entraînement, le sujet explore un jeu de trois figures dans les mêmes conditions que la phase test. Pendant la phase test, le sujet explore un jeu de cinq formes choisies de façon aléatoire par l'expérimentateur/expérimentatrice dans le répertoire prédéfini pour la séance. Le sujet est placé sur la forme, à l'une de ses extrémités. Le temps d'exploration est limité à une minute. A la fin de son exploration, le sujet reproduit la forme sur la tablette graphique.

- ***Critères d'évaluation du dessin et d'analyse des explorations***

Les critères d'évaluation du dessin et d'analyse des explorations sont les mêmes que ceux de l'étude précédente (voir partie 3.7.1).

3.8.2 Résultats

3.8.2.1 Résultats par sujet

- ***Le collégien 1***

Le dessin

Les cinq frises ont été correctement reproduites. On dénombre quatre dessins corrects pour les lettres et les formes curvilignes. La proportion de dessins précis témoigne d'un réel progrès depuis l'étude précédente puisque quatre lettres, trois frises et trois formes curvilignes ont été reproduites avec précision. On relève pour chaque type de forme quatre dessins compatibles avec les traces de l'exploration.

L'exploration

Le sujet a mené moins d'explorations intégrales que lors de l'étude précédente. Les 60 secondes se sont avérées insuffisantes pour parcourir intégralement les frises (Tableau 48) ou certaines lettres. Le taux de recouvrement des figures est systématiquement supérieur à 50%. Le sujet a réalisé des inférences car des explorations partielles l'ont conduit néanmoins à des reproductions correctes et précises de la figure (Tableau 49)

Figure	Trace de l'exploration	Figure dessinée

Tableau 48 : Exemple d'une exploration incomplète ayant néanmoins donné lieu à un dessin correct et précis chez le collégien 1

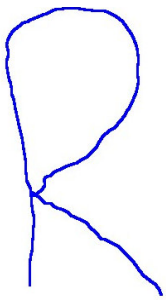
Figure	Trace de l'exploration	Figure dessinée
		

Tableau 49 : Exemple d'une exploration incomplète ayant néanmoins donné lieu à un dessin correct et précis chez le collégien 1

Le nombre moyen de ruptures reste limité avec, en moyenne, sept pertes pour les frises, huit pour les lettres et 11 pour les formes curvilignes. Le taux de contact moyen est très élevé : 92% pour les frises, 90% pour les lettres et 85% pour les formes curvilignes. Le temps d'accroche maximale moyen atteint 30 secondes pour les frises, 26 pour les lettres et 24 pour

les formes curvilignes. Enfin, la vitesse moyenne se situe entre 10 et 20 pixels par seconde (10 pixels/sec. pour les frises, 15 pour les lettres et 20 pour les formes curvilignes).

Les caractéristiques d'exploration et les trajectoires indiquent que le sujet a recours au suivi (Tableau 50). Contrairement à l'étude précédente, les explorations devenues beaucoup plus fluides se laissent plus facilement décrire. Le suivi continu très régulier connaît des ralentissements et des sorties très brèves aux changements de direction ou aux extrémités. Les pertes initiales sont nombreuses (huit). Elles s'avèrent particulièrement pénalisantes avec les formes longues comme les frises : le sujet qui recroise la forme au hasard est amené à parcourir deux fois la même portion de forme. Cependant, à la dernière séance, le sujet a mis en œuvre avec la parabole et la forme sinusoïdale une technique de retour qui consiste à se déplacer en ligne droite.

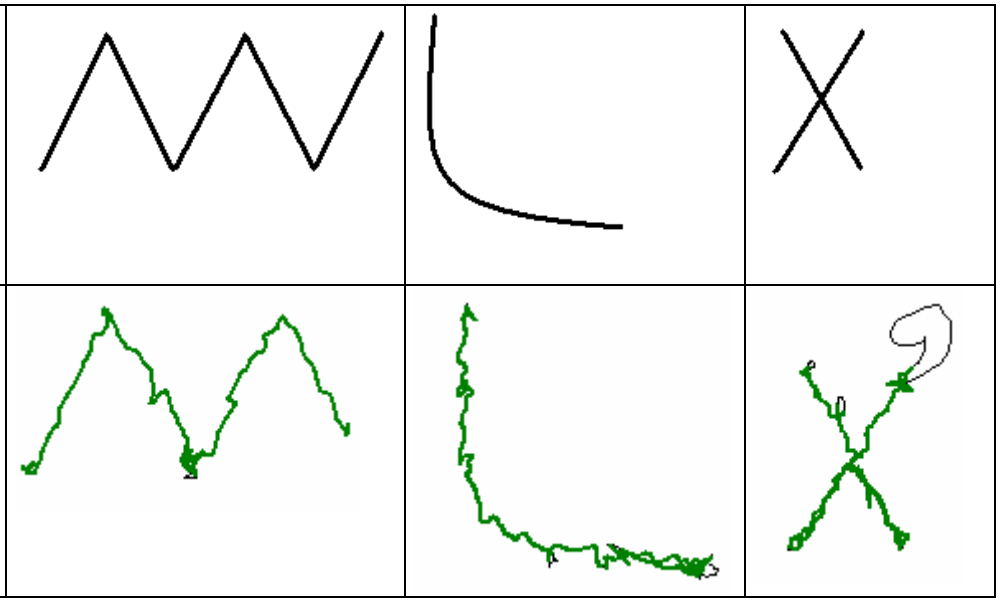
Figure			
Trace de l'exploration			

Tableau 50 : Exemples d'explorations montrant très peu de traces hors figure

Comparaison entre les deux études

Le taux d'accrochage a augmenté de 81 à 90%. L'évolution est très nette en ce qui concerne le nombre de ruptures de contact, le temps maximal d'accroche, et la vitesse d'exploration. Le nombre de ruptures est passé d'une moyenne de 33 à une moyenne de 15. Le sujet reste en moyenne 27 secondes sans quitter la forme alors que ce temps était de 11 secondes lors de l'étude précédente La vitesse de déplacement a diminué de 34 à 15 pixels par seconde (pixels/sec.).

Conclusion

Si le suivi continu est acquis, ces résultats laissent présager qu'avec l'expérience, le sujet peut accroître sa vitesse de déplacement ou trouver des techniques plus économiques que le suivi continu pour revenir sur ses « traces ». Cependant, il est des cas où le sujet n'identifie pas la forme malgré un suivi continu intégral comme dans le cas de l'ellipse et du T. Ces formes qui étaient proposées dans l'étude antérieure n'auraient, en principe, pas dû poser de difficultés particulières. Mais dans l'ensemble, la maîtrise exploratoire est attestée par la précision du suivi et des reproductions.

- ***La Collégienne 2***

Ce sujet a réalisé un progrès très net entre les deux études. Elle a correctement reproduit trois frises, deux lettres et quatre formes curvilignes. Elle confirme sa capacité à mieux identifier ce dernier type de forme. On relève ainsi trois dessins précis pour les formes curvilignes alors que le résultat est nul pour les frises et de un pour les lettres. La compatibilité entre le dessin et l'exploration est moindre avec les lettres (deux) qu'avec les frises (cinq) et les formes curvilignes (cinq).

Exploration

Quatre formes curvilignes ont été explorées intégralement. On relève seulement une exploration intégrale pour les deux autres types de forme. Les taux de couverture montre, en revanche, une nette amélioration. Par exemple, le X et l'ellipse qui avaient été explorés partiellement dans l'étude précédente ont été totalement parcourus et bien perçus dans cette étude (Tableau 51).

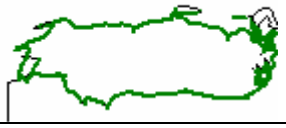
	Figure	Trace de l'exploration
Etude 1		
Etude 2		
		

Tableau 51 : Exemples de traces exploratoires observées lors des deux études

La collégienne 2 adhère plus facilement aux formes curvilignes. Ainsi, le taux de contact moyen (83% contre 71 et 78% pour les frises et les lettres) et le temps moyen d'accroche maximale (17 secondes contre 11 pour les frises et les lettres) ont augmenté lors la séance 3 tandis que le nombre de ruptures de contact a diminué graduellement : 26 ruptures avec les frises, 23 avec les lettres et 16 avec les formes curvilignes. La vitesse a légèrement diminué en séance 3 passant de 20 pixels/sec. pour les frises et pour les lettres à 16 pixels/sec. pour les formes curvilignes.

Le suivi continu domine largement malgré des insistances locales notamment au démarrage (voir Tableau 52). Les sorties en fin de ligne et aux changements de direction donnent lieu à des boucles plus étendues que chez le collégien 1. Le « piétinement » qui avait caractérisé les explorations de l'étude précédente s'est manifesté à nouveau lors de l'exploration des lettres.

Les pertes initiales sont nombreuses ; en revanche, les séjours prolongés (plus de cinq secondes) hors forme sont beaucoup moins nombreux (deux).

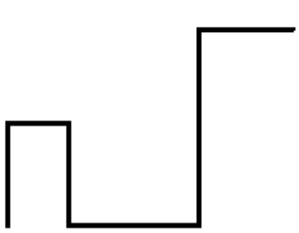
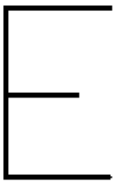
Figure			
Trace de l'exploration			

Tableau 52 : Exemples de traces exploratoires de la collégienne 2

Comparaison entre les deux études

Le nombre moyen de ruptures de contact a faiblement diminuée passant de 24 à 22. Le taux de contact moyen a augmenté de 69 à 77%. Le temps d'accroche maximale moyen est passé de 11 à 14 secondes. La vitesse moyenne a baissé légèrement : 22 pixels/sec. lors de l'étude précédente contre 18 pixels/sec. dans de la présente étude. Ces valeurs ne reflètent pas l'amélioration des performances constatées entre ces deux études.

Conclusion

Il semblerait que la stratégie du suivi, particulièrement aboutie avec les formes curvilignes, ait favorisé chez la collégienne 4 une meilleure perception des figures. Néanmoins, des progrès restent à faire dans la détection des embranchements et l'exploration méthodique des formes composées.

- ***Collégienne 4***

Dessin

Le nombre de dessins corrects est de quatre aussi bien pour les frises que pour les lettres. Le nombre de dessins précis est plus important avec les formes curvilignes (quatre) qu'avec les frises (deux). La compatibilité reste aussi bonne que lors de l'étude précédente (cinq avec les frises et quatre avec les formes curvilignes).

Exploration

Comme les deux autres collégiens, la collégienne 4 peine à explorer intégralement les frises proposées (deux explorations intégrales). Les cinq formes curvilignes ont été intégralement explorées.

Le taux de contact moyen est légèrement supérieur avec les frises (77%) qu'avec les formes curvilignes (69%). Il en va de même du temps d'accroche maximale moyen : dix secondes avec les frises contre sept avec les formes curvilignes. Les différences en terme de ruptures de contact (25 avec les frises, 27 avec les courbes) et de vitesse moyenne de déplacement sont ténues (15 pixels/sec avec les frises, 17pixels/sec. avec les formes curvilignes).

Le suivi continu, clairement mis en place lors de l'exploration des frises, se maintient avec les formes curvilignes. Les insistances locales se répartissent principalement aux extrémités et aux changements de direction (Tableau 53). Les ruptures de contact y sont plus nombreuses. Dans l'ensemble les explorations sont fluides. On relève néanmoins un cas où le sujet est resté localisé sur une portion de la forme et n'en a pas exploré plus du quart.

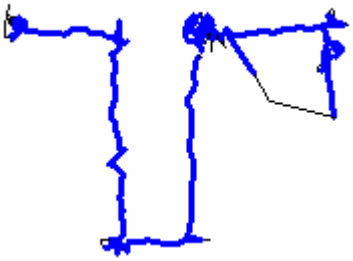
Figure			
Trace de l'exploration			

Tableau 53 : Exemples de traces exploratoires de la collégienne 4

Comparaison entre les deux études

En dehors de la vitesse d'exploration qui passe de 32 à 16 pixels/sec., les valeurs du nombre moyen de ruptures (24,5 puis 25,6), du taux de contact moyen (73,6 puis 72,6%) et du temps d'accroche maximale moyen (7,6 et 8 secondes) sont équivalentes d'une étude à l'autre.

Conclusion

Le sujet a continué à progresser entre les deux études. Sa capacité à effectuer des tours complets de la forme à effectuer du suivi continu sur les longueurs, déjà présente lors de l'étude précédente se confirme.

3.8.2.2 Comparaison inter sujets

Le dessin

La variabilité inter-sujets est beaucoup moins importante que lors de l'étude précédente. Les résultats de la collégienne 4 se rapprochent de ceux du collégien 1. La collégienne 2 a considérablement réduit l'écart qui la séparait des deux autres sujets quant au nombre de dessins corrects (Figure 43).

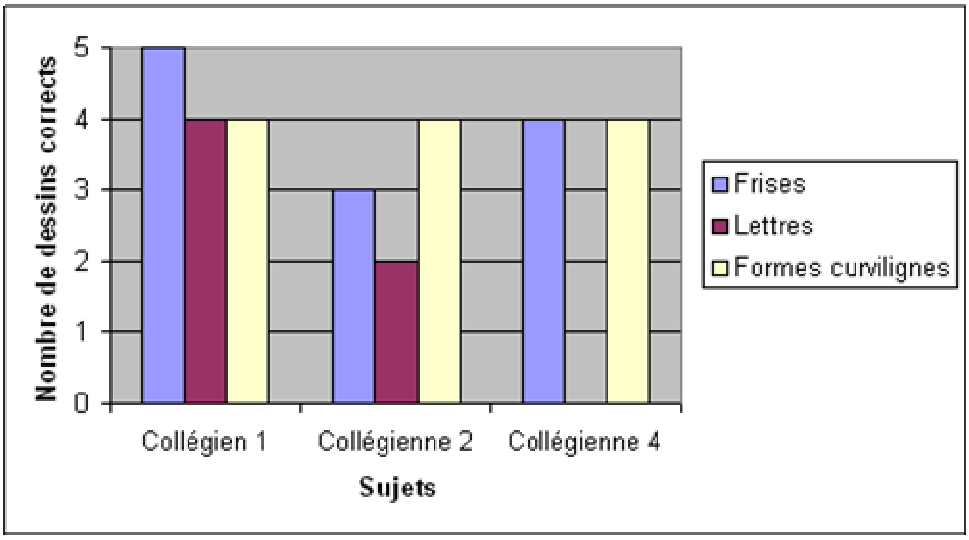


Figure 43 : Nombre de dessins corrects par sujet et par type de forme

Les résultats en précision de la collégienne 2 sont encore inférieurs à ceux des deux autres collégiens (Figure 44).

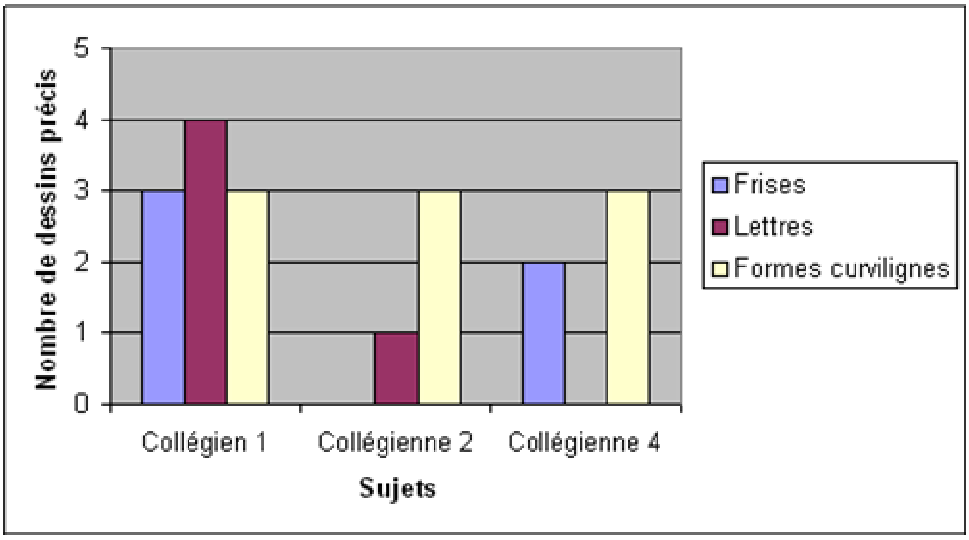


Figure 44 : Nombre de dessins précis par sujet et par type de forme

Les scores en compatibilité sont assez bons chez les trois collégiens (Figure 45).

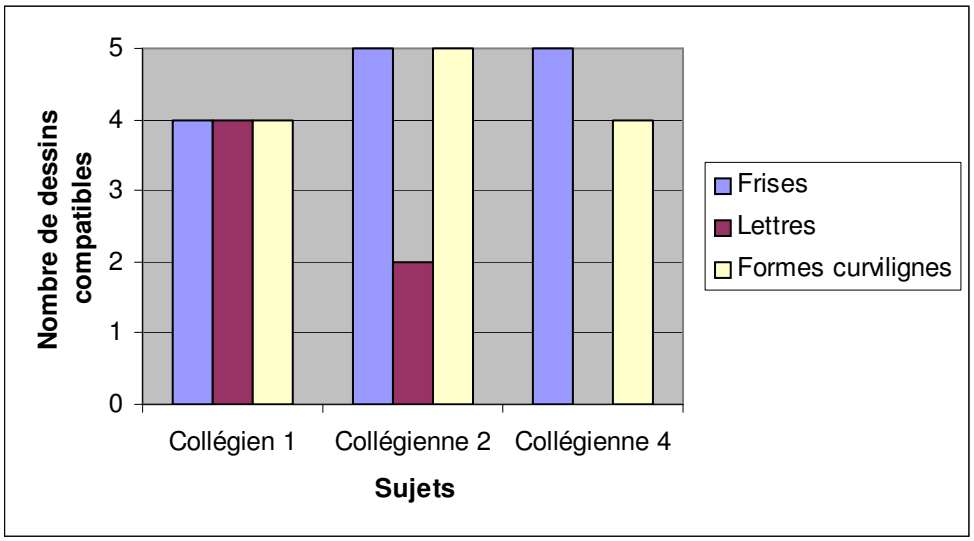


Figure 45 : Nombre de dessins compatibles avec les traces de l'exploration par sujet et par type de forme

L'exploration

Les trois collégiens n'ont pas eu le temps d'explorer l'intégralité des frises (Figure 46).

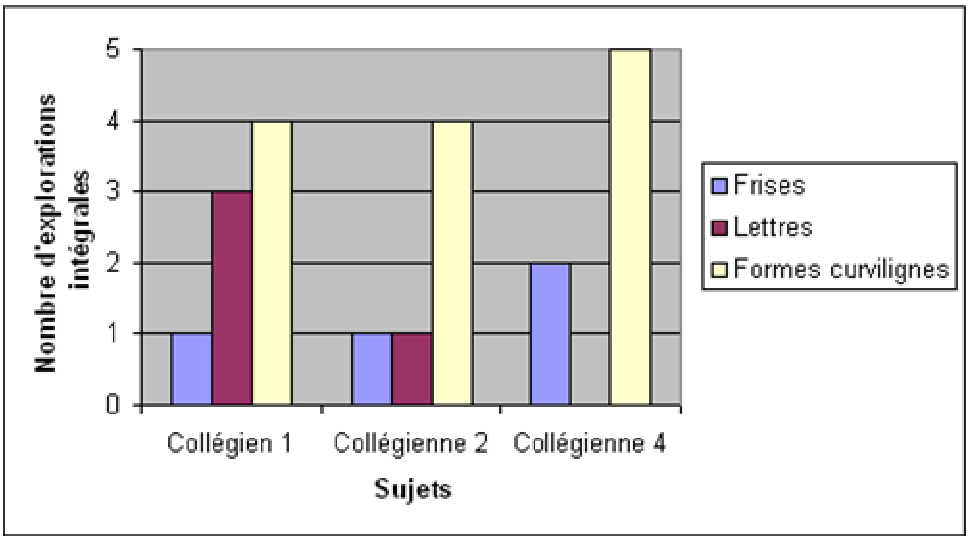


Figure 46 : Nombre d'explorations intégrales par sujet et par type de figure

Le collégien 1 se distingue des deux autres collégiennes en ce qui concerne le nombre de ruptures dans l'exploration (7 ruptures en moyenne contre 20 chez la collégiennes 2 et 23 chez la collégienne 4).

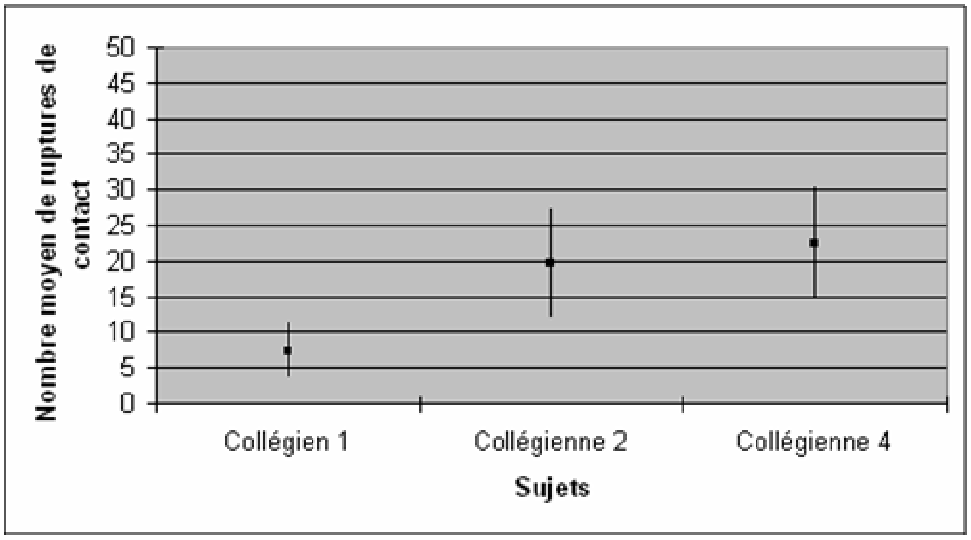


Figure 47 : Nombre moyen de ruptures de contact par collégien

Le taux de contact du collégien 1 (89%) et de la collégienne 4 se différencient nettement (70%) et la collégienne 2 se situe à un niveau intermédiaire.

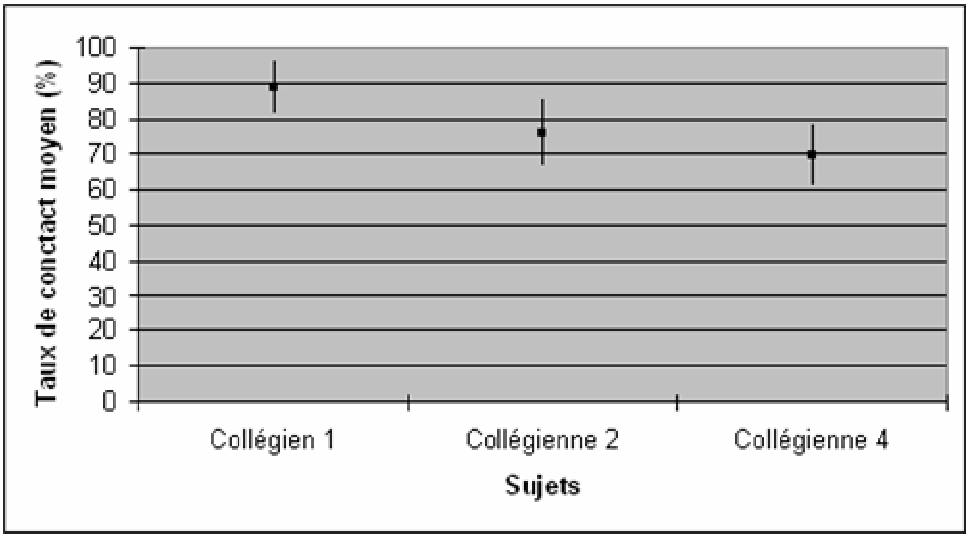


Figure 48 : Taux de contact moyen par collégien

Le temps d'accroche maximale moyen est particulièrement élevé chez le collégien 1, il atteint 26 secondes, alors que ceux des collégiennes 2 et 4 varient respectivement autour de 12 et 7 secondes.

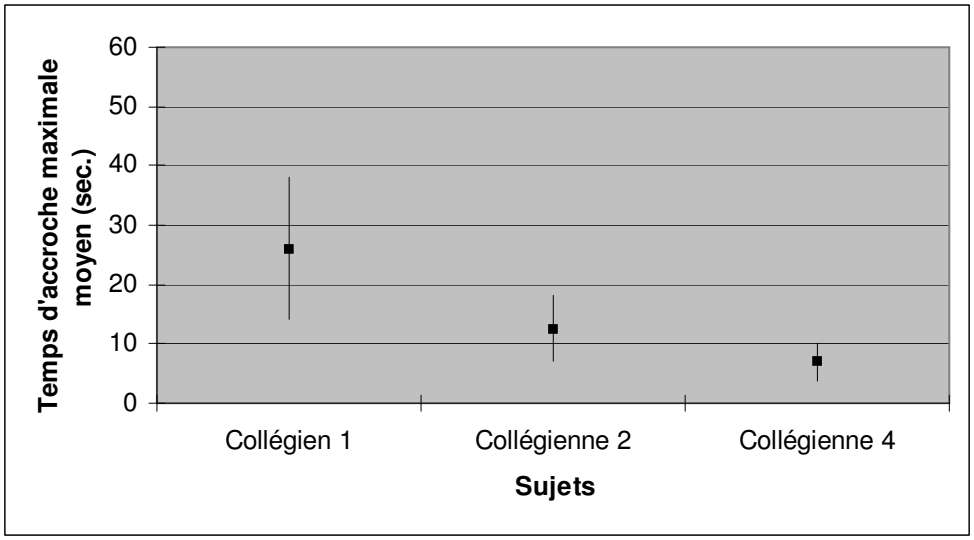


Figure 49 : Temps d'accroche maximale moyen par collégien

Les vitesses moyennes ont des valeurs proches chez les trois collégiens : 15pixels/sec. Chez le collégien 1 et 21pixels/sec. chez les collégiennes 2 et 4.

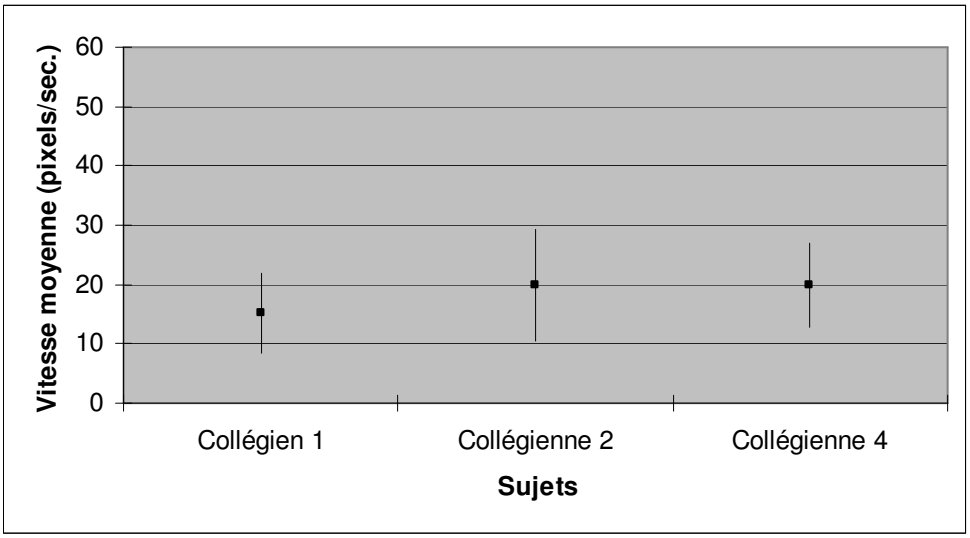


Figure 50 : Vitesse moyenne par collégien

Si les explorations des trois collégiens ont convergé vers le suivi continu, il existe cependant des singularités dans les styles exploratoires qui donnent lieu à des performances perceptives équivalentes (sur la base des dessins). Ainsi, le collégien 1 et la collégienne 4, dont le mode d'accrochage diffère quelque peu (le collégien 1 peut adhérer très longtemps à la figure tandis

que le suivi continu de la collégienne 4 est rompu régulièrement), obtiennent cependant des résultats proches.

Il nous reste à examiner si ces stratégies personnelles peuvent être modulées en fonction de la de la tâche et de son degré de facilité. En effet, dans l'étude précédente, nous avions constaté que le collégien 1 avait relâché son «agrippement » quand il éprouvait de la facilité. Les résultats de l'étude sur la catégorisation (voir section suivante 3.9) nous révéleront comment les collégiens se comportent avec un nouveau type de tâche.

3.8.3 Conclusion et perspectives pour la conception

Les traces de l'activité traduisent clairement une acquisition de la stratégie de lecture enseignée. Les explorations sont devenues fluides. L'exécution du geste favorise nettement la perception de la figure. Les sujets ont indéniablement progressé et les écarts de performances se sont resserrés. Cette convergence ne contrarie pas l'émergence de style propre, puisqu'on observe des différences dans les caractéristiques de l'exploration notamment entre le collégien 1 et la collégienne 4.

Néanmoins, toutes les formes n'ont pas été explorées intégralement. La diminution de la vitesse d'exploration a certes favorisé un meilleur accrochage mais a été parfois insuffisante pour réaliser la tâche demandée. Dans le cas des formes à embranchements, on se heurte à une limite du couplage stratégie-dispositif puisque ce type de forme contraint à des allers–retours linéaires. En situation traditionnelle, les embranchements multiples sont gérés plus facilement du fait de la taille du champ récepteur (la pulpe du doigt couvre l'ensemble de l'embranchement, ce qui n'est pas toujours le cas avec la matrice utilisée) et de la multiplicité des points d'action (déplacements simultanés). La prochaine étape consisterait à les encourager à accélérer leur vitesse d'exploration.

Par ailleurs, les embranchements et les formes longues (si le sujet n'est pas positionné à une extrémité) impliquent une ré-exploration de portions de la forme. On peut également imaginer un entraînement pour que les sujets privilégient l'économie exploratoire quand il redécouvre une partie de la figure. Dans ce cas le micro-balayage paraît plus adapté. Pour la reconnaissance d'un lieu déjà exploré, le sujet pourrait avoir recours à la fonctionnalité du marquage sonore.

Si l'on évoque les trois types de stratégies déjà mentionnées (localisation, lecture et anticipation) alors on peut dire qu'à cette étape du parcours d'apprentissage les sujets maîtrisent la stratégie de lecture. Le protocole de cette étude n'offre pas les moyens d'appréhender les stratégies anticipatoires (dans la mesure où les sujets avaient pour consigne de produire un suivi continu et intégral du contour) et de localisation-accrochage (le sujet était positionné sur la forme). L'étude suivante, consacrée à la catégorisation, met en en évidence des stratégies d'anticipation. Les résultats de cette étude suggèrent un programme d'entraînement systématique à la perception de lignes qui passe en premier lieu par l'acquisition du suivi continu. Ce type de mouvement nous paraît le plus adapté pour aider le sujet à allouer son attention entre les trois pôles que sont :

1. La configuration spatiale des picots (qui peut indiquer l'orientation du trait)
2. Les gestes effectués par la main dominante (perception kinesthésique)
3. La figure : les percepts sont mis en extériorité, le sujet immergé[102] dans le monde virtuel perçoit l'objet là où se situe sont point d'action.

Pour acquérir la technique du suivi continu, le sujet commence par reconnaître l'horizontale, la verticale et l'oblique à 45° pour apprendre à associer ces trois éléments que sont : l'orientation du trait, la direction du geste effectué, et l'évolution dynamique du pattern tactile.

De même, le sujet apprend à détecter la présence d'angles et d'embranchements (l'augmentation brusque du nombre de picot le renseigne sur la présence d'accidents topologiques). Il peut alors identifier des polygones ou suivre des lignes brisées, différencier les formes curvilignes des formes obliques (en prêtant attention à la labilité du pattern et au retour proprioceptif). Ce programme est en même temps une recommandation.

[102] Cet aspect a été développé par Auvray (2004) dans sa thèse de Doctorat sur l'immersion et la perception spatiale.

3.9 Etude sur la reconnaissance et la catégorisation de formes

- ***Objectif***

Dans cette section seront présentés les résultats d'une étude sur la reconnaissance et la catégorisation de formes conduite par Elodie Blomme et à laquelle nous avons participé. Les tâches proposées supposent l'acquisition du suivi continu et la perception des points remarquables, habiletés développées au cours des deux études précédentes. Les résultats donnent ainsi de l'intelligibilité au travail progressif qui a été mis en place avec les quatre collégiens. En outre, la réalisation des tâches permet d'observer comment les sujets se comportent lorsque leur attention ne porte plus exclusivement sur la perception de la figure.

La tâche de reconnaissance

La tâche de reconnaissance consiste à retrouver une cible parmi deux distracteurs. Elle comporte 16 essais dans huit conditions différentes (deux essais par condition). Les conditions manipulées sont : la forme (forme similaire ou forme différente du distracteur), la taille, le nombre d'angles, l'ouverture, l'orientation, le parallélisme et la valeur d'angle (voir Tableau 54).

La tâche de catégorisation 1 (tri spontané)

La première tâche de catégorisation, qui comporte neuf essais, est un tri spontané de quatre figures. Ces dernières se différencient selon trois dimensions. Sont ainsi comparées les dimensions taille versus orientation, taille versus forme et forme versus orientation. Le sujet doit constituer deux groupes avec les deux figures qui vont le mieux ensemble. Plusieurs stratégies classificatoires sont alors possibles :

* Deux stratégies de type dimensionnelle : le sujet privilégie l'une ou l'autre dimension.
* Quatre stratégies de type holistique : une figure est associée à deux autres figures possédant deux dimensions différentes respectivement. Dans le cas des figures du Tableau 55, le regroupement peut porter sur les objets (1, 2, 3), (1, 2, 4), (2, 3, 4) et (1, 3, 4) (voir Tableau 55).

La tâche de catégorisation 2 (appariement)

La deuxième tâche de catégorisation comporte huit essais et consiste à apparier la cible avec l'une des trois figures « qui va le mieux avec ». Les trois figures se distinguent selon deux

dimensions. A nouveau sont opposées deux à deux les dimensions, taille, orientation et forme. Deux stratégies de type dimensionnel et une stratégie holistique sont alors possibles. La stratégie holistique consiste à valoriser la similarité globale ; l'élément choisi sera celui qui possède une valeur intermédiaire dans les deux dimensions : par exemple, les cible de la condition forme versus taille du Tableau 56 est associé à l'élément du milieu.

3.9.1 Méthode

- ***Sujets***

Les quatre collégiens ont participé à l'étude

- ***Matériel***

Cette étude emploie l'interface Tactos et la matrice M2 (voir Figure 42)

Les figures proposées regroupent des éléments géométriques (quadrilatère, ellipse, angles) (voir Tableau 54, Tableau 55 et Tableau 56)[103].

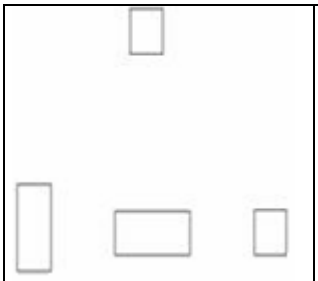
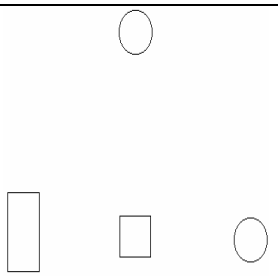
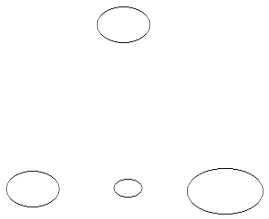
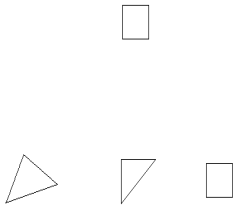
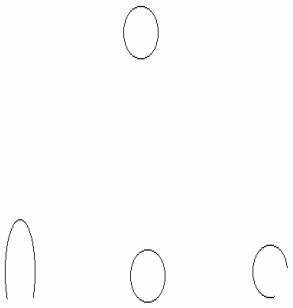
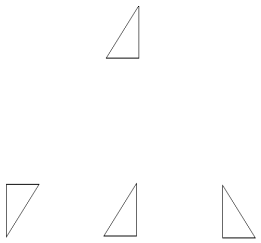
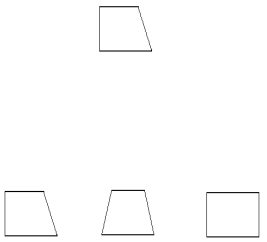
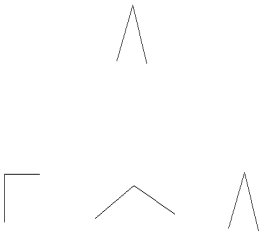
			
Condition forme proche	Condition forme éloignée	Condition taille	Condition nombre d'angles
			
Condition ouverture	Condition orientation	Condition parallélisme	Condition mesure d'angle

Tableau 54 : Exemples de figures utilisées dans la tâche de reconnaissance (taille réduite)

[103] En annexe 6, des exemples de figures sont présentés à la taille réelle

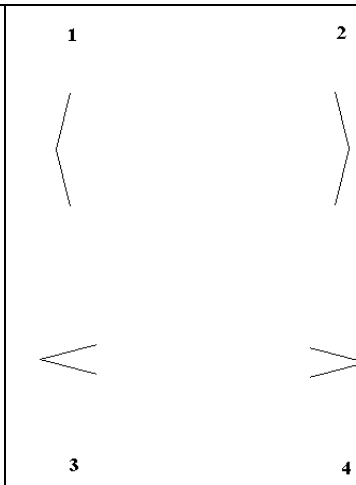
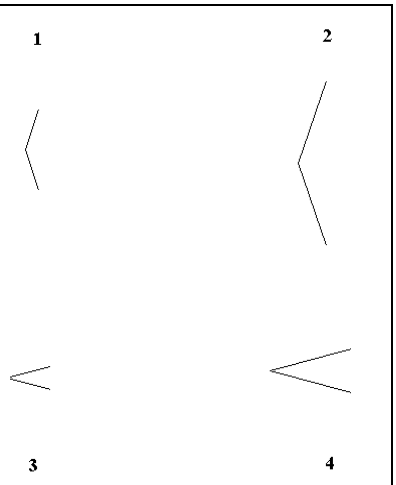
		
Dimension taille vs orientation	Dimension orientation vs forme	Dimension forme versus taille

Tableau 55 : Exemples de figures utilisées dans la tâche de tri spontané (taille réduite)

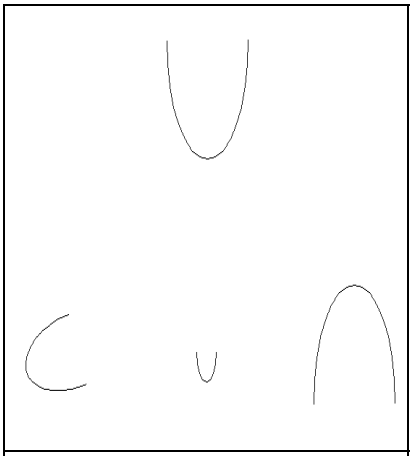
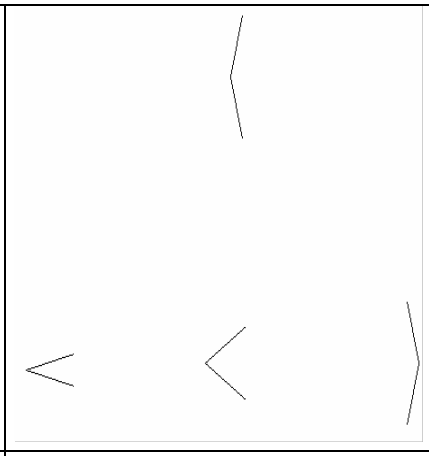
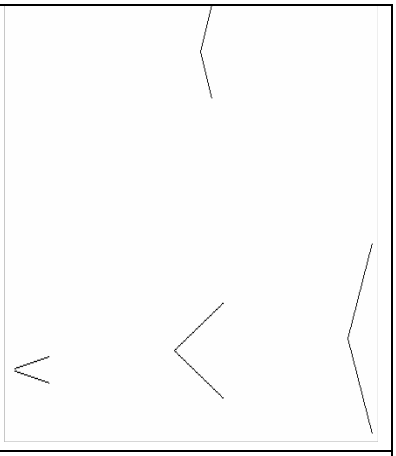
		
Dimension taille vs orientation	Dimension orientation vs forme	Dimension forme versus taille

Tableau 56 : Exemples de figures utilisées dans la tâche d'appariement (taille réduite)

- ***Procédure***

Les sujets étant suffisamment familiers des explorations sous Tactos, il n'a pas été prévu de phase d'apprentissage. La passation de l'expérience s'effectue au rythme de chaque sujet lors de séances hebdomadaires. Le temps par essai est libre. La consigne est énoncée au début de chaque tâche. Le sujet est successivement positionné sur chacune des figures. A l'issue de l'essai, le sujet doit justifier sa réponse. Le sujet a la possibilité de ré-explorer la figure s'il en émet la demande.

Consigne de la tâche de reconnaissance : « Après avoir exploré la cible, retrouve la parmi les trois figures »

Consigne de la tâche de tri spontané : « Après avoir exploré les quatre figures, fait deux groupes avec celles qui vont le mieux ensemble ».

Consigne de la tâche d'appariement : « Après avoir exploré la cible, désigne parmi les trois figures celle qui va le mieux avec elle ».

3.9.2 Résultats

- ***Collégien 1***

L'ensemble des essais a été effectué en huit séances. Son taux de reconnaissance est de 100%. Dans les tâches de catégorisation, il a exclusivement utilisé la stratégie dimensionnelle. La dimension privilégiée est l'orientation (privilégiée dans 50% des cas à la forme et dans 77% des cas à la taille). Dans la condition où le sujet a le choix entre la forme et la taille, il opte principalement pour la forme. Dans la tâche de tri (catégorisation 1), ce sujet identifie rapidement les dimensions qui permettent d'effectuer les regroupements et donne spontanément les différentes réponses possibles. De même, lors de la tâche d'appariement (catégorisation 2), il relève régulièrement les différences existant entre la cible et les autres figures.

- ***Collégienne 2***

Elle accomplit l'ensemble du protocole en huit séances. Au cours des quatre premières séances, le sujet réalise peu d'essais. Le nombre d'essais effectués augmente de façon constante à partir de la cinquième séance. En reconnaissance, elle commet six erreurs ; son taux d'échec 37% est le plus élevé parmi les sujets. Concernant la catégorisation, on dénombre deux réponses holistiques dans les tâches d'appariement et une seule dans les tâches de tri. Au final, dans 82% des cas, la collégienne 2 utilise la stratégie dimensionnelle. La dimension privilégiée est la forme. Les dimensions taille et orientation ont un poids équivalent dans les réponses. A partir de la cinquième séance, elle désigne les différents groupes dimensionnels possibles. A la séance 7, elle évoque les différentes stratégies de regroupements (dimensionnelle ou holistique). Elle éprouve alors une difficulté à faire son choix.

- ***Collégienne 3***

L'ensemble des essais a également été réalisé en huit séances. Le nombre d'essais effectués par séance est relativement stable. En reconnaissance, trois erreurs sont comptabilisées. Son taux d'échec est de 19%. En catégorisation, la stratégie dimensionnelle concerne 88% des essais. Dans la tâche de tri spontané, la stratégie dimensionnelle prime (huit essais). L'une des réponses ne correspond à aucune des stratégies attendues. Dans la tâche d'appariement, on observe sept stratégies dimensionnelles et une stratégie holistique apparue lors de la dernière séance. La réponse du sujet est déterminée en premier lieu par la dimension forme. Les dimensions taille et orientation ont des poids équivalents. A partir de la quatrième séance, la collégienne 3 identifie les différentes stratégies possibles dans la tâche d'appariement. Par la suite, elle évoque systématiquement les possibilités offertes.

- ***Collégienne 4***

La totalité des essais a été accomplie en sept séances. On note une évolution quant au nombre d'essais effectués par séance. Lors des cinq premières séances, le sujet réalise entre trois et cinq essais. Pendant les séances 6 et 7, le sujet effectue respectivement sept et huit essais. En reconnaissance, elle ne commet qu'une seule erreur. Dans les deux tâches de catégorisation, la stratégie dimensionnelle est utilisée dans 88% des cas. Dans les tâches d'appariement, le sujet a exclusivement recours à la stratégie dimensionnelle. Dans les tâches de tri spontané, on relève une réponse holistique et une réponse qui ne correspond à aucune des stratégies attendues. L'échec en reconnaissance ainsi que ces deux réponses particulières sont observés à la troisième séance. La dimension privilégiée est l'orientation (dans 100% des cas face à la forme et dans 67% des cas face à la taille). Dans la situation où la taille est opposée à la forme, le sujet opte pour cette dernière. A l'exception d'une tâche de tri, à la séance 5, le sujet ne verbalise que son choix final et ne fait pas mention des différentes possibilités de regroupement.

- ***Discussion***

Les sujets ont été en mesure d'effectuer les tâches demandées. Dans la tâche de reconnaissance, le taux d'échec est faible (14%). Les deux tâches de catégorisation révèlent que la catégorisation, chez les quatre collégiens, s'élabore sur une base dimensionnelle plutôt que holistique. Précisons que des études (Berger & Hatwell, 1996) dans le domaine de la catégorisation ou de la classification haptique ont permis de montrer une tendance

développementale se traduisant par une évolution du global (holistique) vers le local (analytique). Il faut cependant noter que ce domaine d'étude reste controversé à propos de l'âge auquel s'opère ce changement de mode de même que sur le mode privilégié par les adultes ou encore le type de tâches utilisées (Schwarzer, Kufer & Wilkening, 1999). La tendance analytique étant généralement observée, même chez les adultes, les différences entre enfants et adultes concernent le type d'attribut donnant lieu à la focalisation. Chez les enfants des attributs de substances semblent privilégiés tandis que des attributs de structures le sont par les adultes. Là encore, on retrouve des similarités intermodales.

3.9.3 Conclusion et perspectives pour la conception

Nous pouvons déduire des résultats de cette étude que la perception des propriétés de la figure semble acquise pour l'ensemble des sujets même si leur niveau d'habileté perceptive demeure variable : dans la réalisation de la tâche de reconnaissance, les sujets se classent de la même façon que lors des deux études précédentes. Bien que fortement entraînés à la stratégie du suivi continu intégral, les sujets ont su s'en affranchir en prélevant localement des indices pertinents pour l'élaboration de leur choix. Nous avons pu observé différentes stratégies anticipatoires (définies dans la conclusion de la partie 3.5).

* De brefs déplacements permettent aux sujets de discriminer l'aspect rectiligne ou curviligne d'une cible (le sujet demandait alors à explorer la figure suivante) et ce malgré la faible résolution de la plage tactile.

* Les sujets vont rechercher une propriété géométrique particulière comme, par exemple, la valeur d'un angle pour déterminer si le quadrilatère est un rectangle ou un trapèze.

* Enfin, on relève occasionnellement des stratégies « non figurales », lorsque le sujet, trace des traits horizontaux ou verticaux pour situer l'ouverture d'une figure (U, ou U inversé, incliné).

Par ailleurs, les sujets qui ont effectué leur apprentissage initial avec le suivi continu ont aisément élargi leur répertoire exploratoire en faisant usage de micro et macro-balayages.

L'activité de lecture d'une figure dans le cadre d'un cours de mathématiques nous paraît à la portée de l'ensemble des sujets. Néanmoins, nous ne sommes pas en mesure de nous prononcer quant à leur capacité à appréhender un écran qui présente plusieurs objets puisque dans cette étude les sujets étaient positionnés sur chacune des figures. Cependant, certains sujets ont manifesté la possibilité d'effectuer le déplacement d'une figure à l'autre de façon autonome.

Examinons, à présent, comment l'habileté exploratoire acquise se traduit dans la lecture de figures géométriques lors d'un cours de mathématiques.

3.10 Evaluation de l'usage de Tactos lors d'un cours particulier de mathématiques

Cette étude, dans laquelle Tactos devient un élément d'une situation d'apprentissage et où les collégiens doivent naviguer dans une interface plus complexe, constitue l'aboutissement du travail réalisé jusque là. La validation a lieu lors d'un cours individuel de géométrie. Ce dernier porte sur la propriété du triangle inscrit dans le cercle et dont la formulation est la suivante : *« Si un triangle est inscrit dans un cercle et que l'un de ses côtés est un diamètre de ce cercle, alors ce triangle est rectangle. »*

L'objectif de ce travail consiste à mettre en évidence le rôle joué par Tactos dans l'interaction professeur/élève et de comprendre comment la médiation guide l'apprentissage de notions mathématiques. Notre analyse porte en particulier sur :

* les étapes où le professeur mobilise Tactos,
* les éléments de la figure vers lesquels est dirigée l'attention de l'élève.

De là, les questions suivantes se posent : l'élève réussit-il à percevoir les principaux aspects de la figure ? A partir de son expérience perceptive, l'élève est-il en mesure de constater une invariance géométrique? Quelles sont alors ses difficultés et de quel ordre sont-elles ?

Ainsi, il nous faut distinguer les difficultés perceptives induites par l'exploration d'une figure complexe des problèmes liés à l'élaboration d'un raisonnement mathématique. Ce point étant d'autant plus important que l'usage de Tactos se trouve ici intégré dans un environnement d'apprentissage dont il ne constitue qu'un élément parmi d'autres.

3.10.1 Méthode

- ***Participants***

R, professeur de mathématiques au centre Normandie Lorraine.

Les collégiens 1, 3 et 4 ont participé à cette évaluation. La collégienne 2 était absente car elle passait le brevet des collèges. Nous présentons dans cette section l'analyse de la séquence réalisée avec le collégien 1.

- ***Matériel***

A l'interface Tactos sont adjoints le lecteur d'écran Jaws (voir partie 2.1.1.1) et Géoplan (voir annexe 3) qui co-fonctionnent sous Windows 98 dans la présente observation. L'exercice nécessite également l'emploi du traitement de texte Word. L'ordinateur supporte le fonctionnement simultané des quatre logiciels.

Avec Géoplan, la construction de figure s'effectue par des commandes clavier : l'élève navigue à l'intérieur des menus et complète des boîtes de dialogue. Cette activité est réalisable par un élève aveugle équipé d'une synthèse vocale. A ce niveau, Tactos permet de

* Accéder à la figure produite telle qu'elle apparaît à l'écran
* Suivre la construction de la figure (percevoir les effets graphiques des commandes clavier)
* Constater des l'invariances en dépit des transformations graphiques de l'objet.

Deux caméras numériques sont fixées sur trépied, l'une filme l'écran et l'autre l'interaction entre le professeur et l'élève.

L'énoncé de l'exercice est imprimé en braille et en noir sur une feuille.

- ***Apprentissage***

Pendant trois séances hebdomadaires, les quatre collégiens ont été formés par le professeur de mathématiques du CNL et par les expérimentateurs à l'utilisation du logiciel Géoplan. Deux séances d'entraînement ont été spécifiquement consacrées à la réalisation d'exercices sur le cercle et le triangle rectangle. Lors de l'évaluation de Tactos en situation, les collégiens connaissent les commandes clavier nécessaires à la construction de figures élémentaires comme le triangle et le cercle.

- ***Objectif pédagogique de la séance***

Il consiste à amener l'élève à conjecturer une propriété à partir de trois configurations géométriques successives.

- ***Tâche***

L'élève effectue un exercice complet qui doit le conduire à formuler la propriété. L'élève prend connaissance de l'énoncé et construit au fur et à mesure les différents éléments de la figure. Cette dernière est ensuite importée dans un fichier word. Le collégien rédige alors la propriété.

- ***Consigne***

L'énoncé est présenté comme suit en sept étapes

1. Construire deux points libres dans le plan A et B (créer-point-point libre)
2. Construire le cercle c1 de diamètre [AB] (créer-cercle-défini par son diamètre)
3. Construire un point libre sur le cercle c1 (créer- point -point libre – sur un cercle)
4. Tracer les côtés du triangle ABC (créer polygone défini par ses sommets)
5. Compléter : le triangle ACB est… en …et [AB] est son…
6. Refaire les étapes 3, 4 et 5 en remplaçant le point C par les points D et E.
7. Conjecture : écrire une propriété illustrant les observations dans cette activité.

Le professeur complète la consigne en invitant l'élève à aller explorer ou modifier des éléments de la figure.

3.10.2 Description de l'interaction professeur/élève

- ***Etape 1 et 2 : construction du cercle de diamètre [AB]***

Une fois la figure construite, le professeur invite l'élève à parcourir le cercle, à localiser le point B et à le déplacer.

Activité de l'élève : Il suit parfaitement le cercle mais trouve que la figure est longue à parcourir du fait de ses dimensions.

Tâche : modification de la figure. Le professeur lui propose de réduire ses dimensions et de la centrer. Le professeur modifie la figure et la positionne au milieu de l'écran. Il demande ensuite à l'élève de déplacer le cercle.

Activité de l'élève : il réalise un tour complet du cercle. Le professeur s'assure de la bonne perception de l'élève : « *tu as bien l'impression que tu fais le mouvement d'un cercle* » ? Face à l'aisance manifestée par l'élève, le professeur s'exclame : « *tu pourrais tracer des cercles à main levée* ».

Tâche : localisation des points A et B. Le professeur vérifie ensuite que l'élève est en mesure de percevoir la présence des points A et B.

Activité de l'élève : il détecte la présence du point A.

Tâche : le professeur lui rappelle qu'il doit situer le point B.

Activité de l'élève : il traverse le cercle diamétralement, et arrive un peu au dessus du point B, il descend légèrement afin de le trouver. Le professeur décrit la technique ainsi employée par l'élève.

- ***Etape 3, 4 et 5 : création du point C, construction et description du triangle ABC***

Tâche : le point libre C créé, l'élève doit vérifier que ce point est bien distinct des points A et B. La position d'un point lors de sa création étant aléatoire, deux points peuvent donc occuper deux positions contiguës.

Activité de l'élève : Il parcourt le cercle. Lorsqu'il rencontre le point B, le professeur lui précise qu'il s'agit du point B. L'élève est encouragé à poursuivre son parcours du cercle jusqu'à croiser le point C. Le point C se situe juste en dessous du point B. Or, l'élève se dirige vers le haut de la figure et repasse par le point A (nommé par le professeur). Il explore donc la quasi totalité du périmètre du cercle avant de croiser le point C. Le professeur fait remarquer que l'élève parcourt le cercle avec *« un millimètre d'incertitude »*.

Tâche : Le professeur demande à l'élève de déplacer le point C. Il lui explique qu'il doit cliquer dessus pour le sélectionner puis le déplacer.

Activité de l'élève : il réalise l'action en suivant les indications du professeur *« retrouve le point. Tu l'as, reste, clique. Tu lâches trop vite. Déplace. Impeccable ! »*.

Le professeur revient sur les deux types de déplacement enseignés :

1. Le clic droit maintenu sélectionne et déplace l'ensemble de la figure
2. Le clic gauche maintenu sélectionne et déplace le point

Tâche : construction du polygone ABC. Le professeur vérifie que l'élève connaît les deux façons possibles de construire un triangle sous Géoplan : en créant directement un polygone défini par trois sommets ou construisant successivement les trois côtés.

Activité de l'élève : l'élève privilégie la première méthode.

Tâche : localisation de l'angle droit, demande émanant de l'un des expérimentateurs.

Activité de l'élève : il réussit à localiser l'angle droit. L'attention de l'élève est attirée sur la distinction entre arc et corde. Il répond qu'il perçoit bien ces deux éléments en faisant des allers-retours entre la corde et l'arc.

Tâche : *« Peux-tu parcourir les segments CB et CA »*.

Activité de l'élève : la tâche est réalisée sans la moindre difficulté.

Tâche : *« compléter : le triangle ABC est…*

Activité de l'élève : Il répond que le triangle ABC est rectangle en C et que son hypoténuse est AB.

- ***Etape 6 : vérification de la propriété par le création de deux nouveaux points et le traçage de deux autres triangles***

Tâche : création et localisation du point D

Activité de l'élève : après avoir créé le point D, l'élève suit le cercle et croise d'abord le point B. Le professeur et l'expérimentateur le guide pendant quelques secondes. L'élève croit localiser le point D quand il atteint le point A. Le professeur lui précise qu'il s'agit du point A et ajoute que si le point est relié, ce ne peut pas être le point D. De nouveaux guidages sont nécessaires : *« tu es sur [AC]»*, *«le cercle est là »*. L'élève finit pas trouver le point D. *« Voilà clique bien. Il est bien en place ? Vérifie ».*

Tâche : Tracer les côtés de ABD et modifier la position du point D (qui est très proche du point A, à tel point que le segment AD et la corde AD se confondent).

Activité de l'élève : L'élève crée un nouveau polygone. Le point D est localisé beaucoup plus facilement que la première fois puis déplacé.

Tâche : le professeur invite l'élève à vérifier que la corde est bien espacée de l'arc de cercle.

Activité de l'élève : à nouveau l'élève évalue l'écartement entre la corde et l'arc en allant de l'une à l'autre.

Tâche : création et localisation du point E : *« il va falloir que tu parcours le cercle »*.

Activité de l'élève : le point E créé, l'élève débute son exploration en parcourant [BD] et [AC]. Le professeur l'informe qu'il se trouve au niveau du croisement entre ces deux segments. A partir du point A, il se dirige vers la droite en suivant le cercle « pas évident », précise-t-il. L'élève localise le point E.

Tâche : comme lors des étapes précédentes l'élève doit s'assurer que le point E est bien éloigné des point A et B.

Activité de l'élève : l'élève parcourt le cercle toujours dans la même direction. Il effectue un micro-balayage jusqu'à rencontrer le point B. Il confirme alors que le point E est bien éloigné de A et de B.

Tâche : l'élève est invité à se diriger vers [AB].

Activité de l'élève : le segment est parfaitement localisé.

- ***Etape 7 : conjecture***

Tâche : Le professeur va conduire l'élève à formuler la propriété constatée empiriquement lors de la vérification de trois figures : *« qu'a-t-on observé ?»*. Au préalable, l'élève doit ouvrir un document Word dans lequel il devra incorporer la figure.

Activité de l'élève : il hésite beaucoup et montre une certaine nervosité avant de donner sa réponse. Il tape d'abord le texte suivant : *« Si un point est sur un cercle et qu'un diamètre est tracé, cela forme toujours un triangle rectangle ».* Avec les suggestions du professeur, le texte suivant est formulé :

« Si un point C est sur un cercle et qu'un diamètre [AB] est tracé alors ABC est un triangle rectangle ».

Enfin, le professeur finit par donner la définition telle qu'on peut la trouver dans un manuel de mathématiques :

« Si un triangle est inscrit dans un cercle et qu'un côté est un diamètre alors le triangle est rectangle ».

3.10.3 Conclusion et perspectives pour la conception

En matière de stratégie, le suivi continu est apparu comme une condition nécessaire mais non exclusive, le sujet ayant momentanément fait usage de micro-balayage dans des régions précédemment explorées ou lors d'allers-retours entre deux éléments de la figure. Grâce à sa maîtrise du suivi, l'élève a pu parcourir les figures avec une grande précision. En outre, sa discrimination fine du pattern braille l'aidait à détecter la présence des intersections et des points. Néanmoins, la résolution de la matrice tactile ne lui permettait pas de reconnaître le nom de ces points. Le professeur fournissait alors une assistance en lui précisant systématiquement de quel point il s'agissait. Deux solutions techniques sont envisageables pour que l'élève puisse lire les lettres :

1. Un logiciel de reconnaissance de caractères
2. L'agrandissement de la taille des lettres, ou plus exactement, la définition d'un rapport optimal entre taille de lettres et taille de la matrice[104].

La lecture des lettres viendrait faciliter la mémoire topologique de la scène. Les actions réalisées par le collégien témoignent d'une mémoire topologique satisfaisante : par exemple le fait de tracer le diamètre du cercle, ou encore de retrouver un point déjà exploré. Cependant, celle-ci n'est pas assez précise pour dissiper les confusions locales. Ainsi, la reconnaissance respective de deux segments qui se croisent ou la distinction corde/arc lorsque ces deux éléments sont très proches présentent quelques difficultés. L'interactivité des figures (la possibilité de les déplacer et de modifier leur taille) s'est alors avérée être une ressource non négligeable dans l'activité perceptive et dans l'activité mathématiques. Cette fonctionnalité sert à la fois à agir sur la présentation pour mettre en exergue certaines propriétés et à illustrer l'invariance d'une figure. Ces dernières rendues plus accessibles aux sens (vision, toucher) favorisent l'activité empirique qui, à son tour, conduit l'élève à conjecturer la règle.

[104] Des tests réalisés avec la collégienne 4 laissent penser qu'une police de type Times ou Verdana 16 serait suffisante.

Cette situation, de part sa richesse, nous donne à voir plusieurs types de médiation (Rabardel, 1995) :

1. La médiation pragmatique : le logiciel permet à l'élève de conjecturer une règle ou, plus généralement, d'effectuer un exercice de géométrie.

2. La médiation épistémique est constitutive de Tactos, puisque c'est grâce à celle-ci que le sujet prend « *connaissance des caractéristiques de l'objet* » (ibid.).

3. La possibilité de déplacer ou de réduire les objets illustre parfaitement la médiation heuristique puisque l'instrument « *permet au sujet de gérer sa propre activité* » (ibid.).

Enfin il nous faut souligner que l'ensemble du dispositif constitue à la fois un outil pour l'élève et pour le professeur. En visualisant les déplacements du collégien, le professeur peut i) évaluer le cheminent cognitif de l'élève, ii) constater des incompréhensions et iii) partager un espace de travail accessible aux deux partenaires.

3.11 Application pour la lecture de droites dans un repère orthonormé

Une fonction d'assistance à la lecture de graphes linéaires a été développée par Sribunruangrit (2004). Celle-ci utilise le principe du codage des couleurs pour aider l'élève aveugle à déterminer les coordonnées d'un point et la pente d'une droite. Les éléments de la figure sont matérialisés par des couleurs et à chacune d'entre elles est associé un retour sensoriel tactile et/ou sonore. Le sujet a la possibilité de positionner des points de repère et des axes de référence. Sribunruangrit (ibid.) a réalisé une expérience avec des sujets aveugles et des sujets voyants aveuglés afin de tester l'application.

L'expérience comporte deux sessions, réalisées à une semaine d'intervalle. Lors de la première session, le graphe présente une droite dans un repère orthonormé. Lors de la deuxième session, le graphe se compose de deux droites qui se coupent dans un repère orthonormé.

3.11.1 Méthode

- ***Sujets***

Neuf sujets voyants, âgés de 20 à 45 ans, recrutés à l'UTC, et les six sujets aveugles ont participé à cette étude[105].

- ***Matériel***

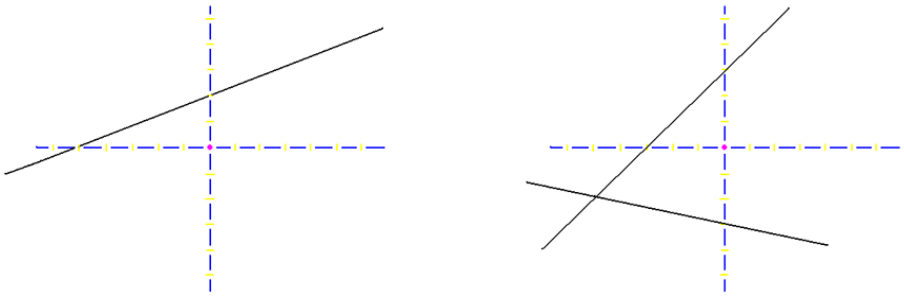
Les sessions ont d'abord été menées avec le groupe de voyants aux yeux bandés au moyen de des boîtiers braille (voir Figure 51). Comme, le positionnement des axes de référence contraignait le sujet à ôter sa main de la plage braille pour actionner la commande clavier, une nouvelle version du dispositif a été élaborée. Les cellules braille ont ainsi été intégrées à l'effecteur (voir Figure 51). Grâce « au stylet tactile », le sujet a la possibilité d'agir et de ressentir la stimulation avec sa main dominante. La main non dominante est rendue disponible pour d'autres tâches (prise de repères, commande clavier). Les sujet aveugles ont bu bénéficier de la version « stylet tactile » au cours de cette expérience.

[105] Ayant participé à la conduite des expériences auprès des sujets aveugles, nous nous permettons de rapporter ici le travail de Sribunruangrit (2004).

(a) (b)

Figure 51 : a) Boîtier de cellules braille (Version III), b) dispositif développé pour combiner les cellules braille et le stylet (stylet tactile) (D'après Sribunruangrit, 2004)

Les figures proposées en session 1 consistent en une droite dans un repère orthonormé. Les figures de la session 2 comportent deux droites qui se coupent dans le même repère orthonormé. Chaque élément du graphique fait l'objet d'un codage (voir Figure 52). La droite est représentée par un trait noir qui donne lieu à une stimulation tactile. Les axes sont dessinés en bleu et les graduations en jaune, ces éléments émettent des sons différents mais n'entraînent pas de stimulation tactile afin d'éviter toute confusion entre les axes et la droite. L'origine du repère, de couleur mauve, se caractérise par un son spécifique allié à un retour tactile.



(a) (b)

Figure 52 : a) Une seule droite (première session), b) intersection de deux lignes droites (deuxième session). (D'après Sribunruangrit (2004).

Le sujet a la possibilité de déposer des points de repère en pressant le bouton du stylet ou la touche espace. Le système « d'axe de référence », qui établit une projection orthogonale d'un point vers les axes x et y, est crée lorsque le sujet actionne la touche F (choisie parce qu'elle

présente un relief). Les points de référence et l'axe de référence, respectivement de couleur rouge et verte, émettent des sons différents et déclenchent une stimulation tactile (Figure 53).

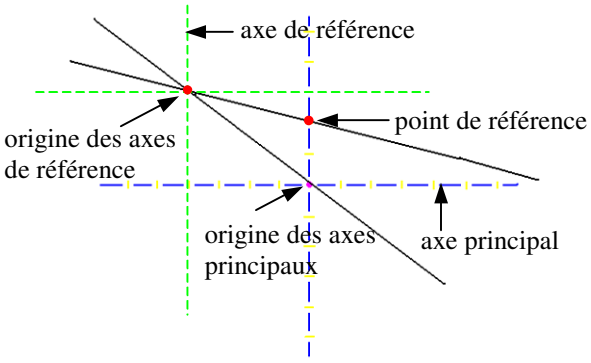


Figure 53 : Composants des axes principaux et les axes de référence (d'après Sribunruangrit, ibid.)

La matrice utilisée est un carré de 16 champs dont la surface du champ unitaire est de deux pixels (Figure 42).

- ***Tâche***

Lors de la première session, le sujet doit préciser si la pente est positive ou négative et trouver les coordonnées de l'intersection avec les axes.

Dans la deuxième session, la tâche consiste à trouver les coordonnées du point d'intersection entre les deux droites, lesquels correspondent à des nombres entiers.

- ***Procédure***

Chaque session se déroule en deux étapes avec une phase de familiarisation puis une phase de test.

Phase de familiarisation

Elle a été adaptée en fonction du statut visuel des sujets : des figures similaires à celles de la phase test ont été imprimées sur papier thermogonflé et présentées aux sujets aveugles à titre de modèle.

On explique au sujet comment interpréter les différents signes qui composent la figure. Ainsi le point d'intersection avec l'un des axes va se traduire par la présence d'une stimulation tactile qui correspond à la droite et d'une stimulation sonore qui provient de l'axe et qui peut signaler la présence d'une graduation. Ensuite, l'usage des points et des axes de référence est

suggéré. Par exemple, le sujet peut déposer une balise sonore sur la figure afin de mettre en exergue l'intersection entre la droite et l'axe et ainsi mieux compter les graduations qui séparent l'intersection de l'origine. Dans la tâche 2, la fonction repère aide à lire les coordonnées du point d'intersection. Le sujet se positionne ce point et active la fonction « axes de référence ». Pour connaître les coordonnées du point, le sujet suis les axes horizontaux et verticaux jusqu'à croiser le repère. Il compte ensuite les graduations qui le séparent de l'origine du repère.

Le sujet explore les graphes sans limite de temps. Une fois qu'il a été en mesure de donner deux bonnes réponses à la suite, alors la phase test peut commencer.

Phase test

Durant la phase test, quatre formes sont proposées au sujet. L'expérimentateur relève les réponses données par le sujet :

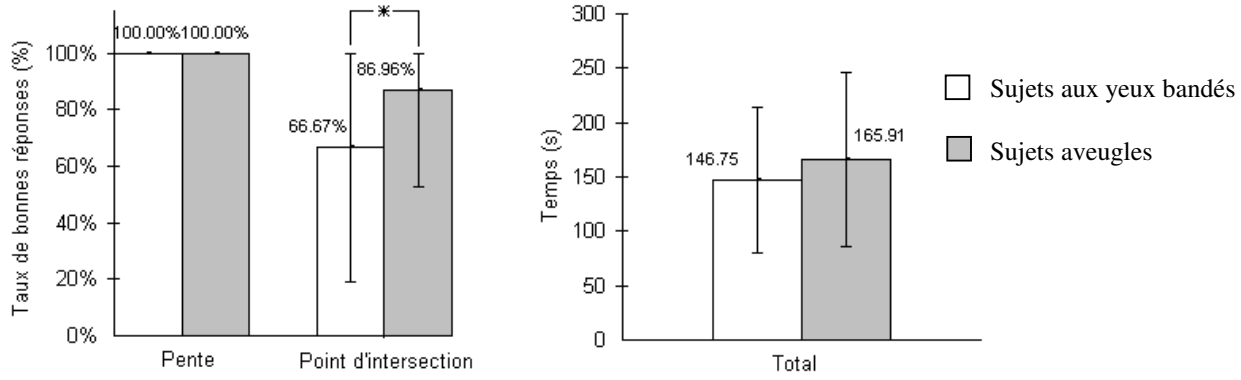
- Les coordonnées de l'intersection avec l'axe et l'orientation de la pente, en session 1
- Les coordonnées du point d'intersection, en session 2

La tâche est chronométrée.

3.11.2 Résultats

- ***Résultats de la session 1***

L'orientation de la pente est reconnue par l'ensemble des sujets (voir Figure 54). Le t-test, appliqué avec un intervalle de confiance de 95% révèle que le taux de bonnes réponses est significativement meilleur chez les sujets aveugles. La marge d'erreur est de ±1 graduation. Les sujets commettent plus d'erreurs dans la localisation de l'intersection lorsque la pente de la droite est raide, ou proche de l'horizontale. Le parcours trop rapide de la droite a également favorisé des erreurs. Les réponses sont parfois données sous forme de chiffres décimaux alors que toutes les coordonnées correspondent à des nombres entiers. Enfin, il n'existe pas de différence significative dans le temps de réalisation de la tâche.

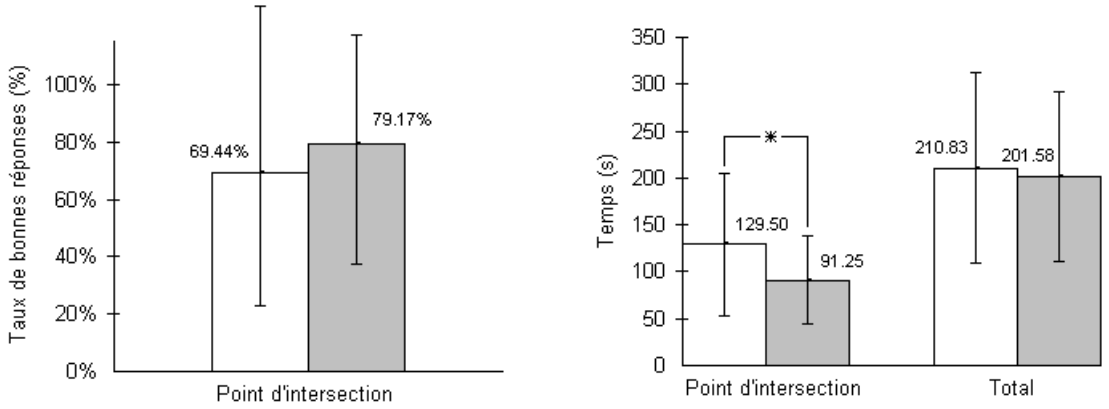


(a) (b)

Figure 54 : a) Taux de bonnes réponses, b) temps mis pour trouver le point d'intersection et temps total. (D'après Sribunruangrit 2004)

- ***Résultats de la session 2***

Aucune différence significative, entre les deux groupes n'est observée quant au taux de bonnes réponses (voir Figure 55). Les aveugles, mieux entraînés à détecter la présence de croisements, sont plus prompts à percevoir le point d'intersection. En revanche, il n'existe pas de différence dans le temps total d'exploration, car les aveugles mettent plus de temps à déterminer les coordonnées du point d'intersection. Il nous faut rappeler que les collégiens qui ont participé à l'étude sont en classe de cinquième et donc non initiés à la lecture de coordonnées d'un point dans un repère. Néanmoins, ils ont été en mesure de comprendre la tâche et se servir de l'interface proposée pour la réaliser.



(a) (b)

Remarque : ☐ Sujets aux yeux bandés ▒ Sujets aveugles

Figure 55 : a) Taux de bonnes réponses de point d'intersection de deux droites, b) temps pour trouver le point d'intersection et temps total (d'après Sribunruangrit, 2004)

3.11.3 Conclusion et perspectives pour la conception

Dans les figures mathématiques, un codage est employé afin de signifier une différence de statut entre les éléments qui le compose. Ce procédé facilite à la fois la discrimination visuelle et les distinctions conceptuelles. Par exemple, les graduations n'auront pas la même taille selon qu'elles correspondent à des nombres entiers ou à des décimales, ou encore, un angle droit sera mis en évidence par un petit carré. Lors de la réalisation d'images en relief, des compromis restent à trouver entre la simplification de l'objet (pour alléger la charge perceptive) et la présence de signes distinctifs adaptés à la perception tactile. Il en va de même pour les images explorées via Tactos. Dans cette étude, il a été proposé aux sujets un ensemble de signes pour faciliter la prise de connaissance de l'objet (repère secondaire) et l'organisation de leur propre activité perceptive (création de balises). Le codage a été aménagé par une différenciation du signal à la fois intra-modal (sons différents) et inter-modal (toucher/audition) et de la redondance sensorielle (toucher et audition). Les sujets ont correctement utilisé les assistances. Néanmoins, les différents codes employés peuvent provoquer une saturation auditive : l'un des sujets aveugles s'est plaint de la nuisance sonore engendrée par les différents signaux. Or, le logiciel a vocation à être utilisé dans une salle de classe. Du fait de sa discrétion, la modalité tactile nous semble, dans la mesure du possible, à privilégier. En outre, le codage supplémentaire viendrait alourdir une charge mnésique déjà importante chez les jeunes aveugles qui doivent garder en mémoire : leurs percepts, l'ensemble des raccourcis clavier et le code braille des formules mathématiques. La restitution des caractères alphanumériques, que ce soit sur un mode tactile ou sonore, permettrait d'alléger le codage mis au point dans cette expérience.

Enfin, l'usage du stylet tactile mérite également de nouvelles investigations. Il est difficile d'appréhender l'apport du stylet tactile puisque les deux groupes de sujets ont utilisé des effecteurs différents et que des interactions ont pu se produire entre le statut visuel et le type d'effecteur utilisé.

4 Conclusion générale

Dans le cadre de cette étude longitudinale, nous avons pu appréhender et analyser les progrès accomplis par les sujets dans la lecture d'objets graphiques numériques au moyen d'un prototype d'interaction haptique (Tactos) instaurant un mode de couplage inédit dit de suppléance perceptive. Ainsi, nous avons observé un accroissement du niveau de performance des collégiens entre les deux études relatives à la lecture de formes (voir 3.7 et 3.8) ; cet accroissement étant d'autant plus remarquable que la complexité de la tâche a augmenté. Les résultats de l'étude sur la catégorisation ont mis en évidence que la capacité des sujets à discriminer et classer des formes est acquise tandis que le temps de réalisation de la tâche a diminué au fil des séances. Enfin, lors de l'évaluation en situation, les sujets ont pu faire usage du dispositif Tactos pour percevoir directement les propriétés géométriques d'une figure. L'analyse de l'activité présentée dans la section 3.10 a également montré comment un collégien perçoit et manipule un graphique composite : la figure finale comporte trois triangles rectangles inscrits dans un cercle, et le collégien est à même de distinguer et d'agir sur ces différents éléments. Tactos, espace de travail partagé entre l'élève et le professeur, est venu renforcer l'interactivité du cours. Cette séance s'est révélée très encourageante et motivante pour la poursuite du projet[106]. En outre, et toujours dans le but d'accéder aux figures mathématiques, des fonctionnalités d'assistance à la lecture de courbes dans des repères ont été développées et testées au sein du Groupe Suppléance Perceptive (Sribunruangrit, 2004). Certaines de ces fonctionnalités, comme celles du marquage sonore permettant une différenciation du statut des objets (repères, sommets, diagonales), sont d'ailleurs transférables dans l'environnement TD Géométrie. Bien que le domaine d'application visé soit celui des mathématiques, la lecture de schéma en physique et chimie (par exemple un circuit électrique) ou des graphiques simples en histoire et géographie (courbes des températures, tableaux) sont également envisageables.

Si nous avons pu mesurer localement l'influence d'une assistance à l'activité (voir 3.5.6 et 3.11), ce travail fait essentiellement ressortir l'importance d'identifier et de suggérer l'emploi d'une stratégie efficiente. En effet, l'expertise tactile des sujets adultes aveugles aussi bien

[106]D'ailleurs, en collaboration avec la Société Odile Jacob Multimédia, nous avons entamé le développement d'une version accessible de l'environnement d'apprentissage TD Géométrie. Cette plate-forme a bénéficié d'une normalisation W3C réalisée par Sébastien Rodot et Laëtitia Orsini dans le cadre général du projet.

dans la lecture du braille que dans l'appréhension d'objet bi et tri-dimensionnels ne leur a pas permis de développer, sans tutorat, un savoir faire efficace avec Tactos. Par ailleurs, les différences de résultats entre adultes et adolescents plaident largement en faveur de la mise en œuvre d'un accrochage systématique à la forme. La temporalité de l'étude a permis de mettre en évidence autant qu'elle a rendu possible la consolidation du suivi continu. Lors des premières séances, les changements de directions et les embranchements multiples ont donné lieu à des omissions de même que des explorations discontinues ont induit des erreurs d'assemblage (deux demi-cercles ont pu être perçus comme un cercle ou une vague avec Tactos). Les sujets ont fréquemment perdu la forme et ne l'ont pas toujours explorée intégralement. Ces problèmes se sont considérablement atténués avec l'apprentissage. Ainsi, l'évolution des indicateurs de l'activité d'exploration révèlent un renforcement du suivi continu tandis que les traces enregistrées reflètent une plus grande fluidité. Une fois stabilisé, le suivi continu n'exclut nullement le recours à du balayage plus ou moins ample ou à des explorations partielles à des fins de vérification. La convergence des sujets vers le suivi continu et complet de la forme n'empêche pas non plus les singularités. Par exemple, le suivi continu de la collégienne 4 présente plus de ruptures que celui du collégien 1 ; ce dernier peut parcourir la forme sans la quitter pendant 40 secondes (voir partie 3.7). Cette maîtrise du collégien 1 s'est d'ailleurs illustrée lors de l'exploration de figures géométriques dans le cadre du cours individuel de mathématiques.

En outre, et bien que notre travail ait été principalement concerné par l'acquisition de stratégies de lecture pour la perception d'objets géométriques 2D simples, nous avons été amenés à envisager l'activité de lecture d'objet mathématiques non pas comme une simple discrimination de pattern mais comme une véritable perception disciplinée, qui exprime à elle seul le degré de compréhension de l'élève. Ce dernier apprend à diriger son attention vers certains éléments de la figure et effectuer les inférences qui le conduisent à la solution du problème mathématique. Dans les études réalisées il est par ailleurs possible de pointer des traces de l'activité de conceptualisation dans l'action :

* Lorsque le sujet émet des verbalisations très précises comme : « le triangle est rectangle et isocèle ».

* Dans l'étude sur la catégorisation, les sujets font usage de stratégies anticipatoires : pour effectuer un regroupement ou un appariement, ils détectent directement la propriété pertinente (par exemple la mesure d'angle, ou le parallélisme des côtés). Parfois cette action ne nécessite pas plus de deux à trois secondes.

* Le cours individuel de mathématiques est un cadre beaucoup plus propice à la mise en évidence de la conceptualisation dans l'action. L'élève construisait les figures par étape et Tactos servait à la fois à « contrôler » la figure et à en abstraire les particularités mathématiques.

En outre, la stratégie de suivi ayant montré son efficacité, nous comptons inclure, dans notre version finale du dispositif, un ensemble d'exercices de façon à favoriser son acquisition et sa stabilisation. Le niveau de difficulté progressera du suivi des trois lignes canoniques (horizontales, verticales et obliques) vers la reconnaissance de figures géométriques voire, éventuellement, l'identification de frises sophistiquées sur un mode ludique[107]. Nous assumons l'idée que la technique exploratoire constitue une solution, une spécification de la situation d'interaction. Une réflexion sur les schèmes qu'appelle ce couplage inédit par rapport aux situations connues et maîtrisées nous a semblé nécessaire. Pour pouvoir formuler des recommandations précises en matière de stratégie, il nous a fallu articuler trois types de considérations.

1. Des réflexions théoriques sur le rôle de l'action et ses conséquences sur la perception compte tenu du mode de couplage.

2. L'observation empirique : comment procèdent les sujets qui obtiennent les meilleurs performances et, a contrario, pourquoi certains sujets rencontrent des difficultés. La restitution de la trajectoire grâce à Tactplayer (voir annexe 5) et la possibilité de visualiser ce que le sujet ressent permet d'accéder à une dynamique propre.

3. L'analogie : considérer une situation proche et trouver des points de confrontation qui permettent d'attribuer du sens à la situation inédite. On retrouve ce principe méthodologique à l'occasion d'études sur un couplage innovant qui vient se substituer à une technique traditionnelle bien maîtrisée (Béguin & Rabardel, 2000 ; Ramloll & Brewster, 2002).

Les schèmes sont identifiés grâce à ce détour épistémologique. Le concept de schème, repris à la tradition piagétienne, désigne une structure invariante et renvoie à la fois à une réalité plastique et gigogne puisque le schème est à la fois assimilateur et accommodateur. L'analyse consiste à trouver des régularités de l'activité en situation voire des régularités trans-situationnelles, sachant qu'une activité médiatisée encapsule des schèmes existants. Mais cette connaissance n'indique pas le grain d'analyse pertinent autrement dit où se positionner dans l'épaisseur de l'activité. Au départ, nous avions retenu une trame grossière qui a tôt fait de révéler ses limites pour nous orienter par la suite vers une analyse plus fine de l'activité perceptivo-motrice. Nous n'avons pas employé le concept de schème mais de stratégie ou

[107] Aujourd'hui les collégiens réussissent parfaitement à suivre des formes labyrinthiques

encore de technique exploratoire qui sont plus opérationnels et qui ne sont pas exclusivement rattachés à l'héritage piagétien. Nos travaux viennent donc conforter l'idée, déjà suggérée dans la littérature, selon laquelle le fait de disposer de procédures exploratoires facilite l'usage des dispositifs haptiques. Cependant, grâce à nos outils d'analyse de l'activité exploratoire (grilles d'observation et logiciel de capture et de restitution de traces), tant sur support traditionnel que sur support numérique, nous avons cherché à caractériser plus finement ces activités, là où les études relatives aux prototypes de recherche font état de descriptions générales[108]. De même, et comme le soulignaient les études évoquées dans la partie 2.2, le passage par une situation de référence peut inspirer le processus de conception. La comparaison avec la situation classique de lecture de formes géométriques nous invite à nuancer notre optimisme quant à l'efficience du couplage humain/machine dans la réalisation de cette activité.

Néanmoins, et comme l'indiquent les résultats préliminaires d'une étude conduite actuellement[109], et qui propose aux collégiens une tâche identique dans les deux situations, la lecture de figures sur papier thermogonflé présente toujours de meilleures performances et nécessite moins de temps que Tactos. Ce dernier n'offre pas actuellement la souplesse qui consiste à pouvoir moduler la taille du champ et à agir simultanément au moins en deux endroits différents. Par delà la faible résolution de la plage braille qui ne permet pas la même acuité que la perception directe de la ligne en relief sous la pulpe du doigt, il semblerait qu'une mémoire topologique de la scène explorée soit encore difficile à construire. La fonction proprioceptive et la perception égocentrée sont peut-être perturbées par la dissociation entre site d'action et site de sensation. Par ailleurs, la perception de détails figuraux exige des champs récepteurs de petite taille ce qui a pour inconvénient de placer le sujet dans une situation de perception tubulaire. Enfin, l'empan naturel de la main qui permet un accrochage rapide avec la forme pourrait être lui aussi prothétisé. Trois solutions facilitant à la fois la prise de repères et l'accrochage sur le contour sont à l'étude :

1. Le stylet tactile

[108] Au sein du GSP, le travail de modélisation mathématique des trajectoires actuellement entrepris vise à approfondir et rendre plus robuste l'analyse de l'activité perceptive. Les premiers descripteurs mathématiques retenus permettent d'ores et déjà d'identifier automatiquement les différentes stratégies répertoriées et de distinguer ainsi un micro-balayage d'un nano-balayage (Amamou, 2004).

[109] Par Elodie Blomme et Katia Rovira du laboratoire Psy.Co de Rouen

2. Le système œil-main
3. Le zoom

- ***Fusion du lieu d'action et du lieu de la sensation : le stylet tactile***

Une première version du stylet tactile combine le stylet et le boîtier braille. L'effecteur est en appui sur un socle dont la base rectangulaire peut servir au traçage de lignes (Figure 56). Les commentaires des sujets aveugles et leurs résultats préliminaires (Sribunruangrit, 2004) ne permettent pas de nous prononcer en faveur de cet effecteur. Sa stabilité favorise le suivi de lignes droites et les sujets ont une bonne perception des mouvements de leur main. Néanmoins, les rotations du poignet, orthogonales au plan d'exploration, sont entravées ce qui gêne les sujets lors de l'exploration de formes curvilignes. Aujourd'hui, nous étudions la possibilité d'incorporer les cellules brailles directement dans un stylet dont la taille autorise une prise en main aisée chez le jeune aveugle. Cependant, avant d'opter pour cet effecteur au détriment du précédent, des expériences sont à mener aussi bien avec des sujets aveugles qu'avec des sujets voyants. Les résultats de Ramstein (1996) sur la comparaison entre différents modes d'exploration (voir partie 2.2.3) nous incitent, en effet, à poursuivre nos investigations avant d'arrêter tout choix de conception.

Figure 56 : Première version du stylet tactile

- ***Le système œil-main***

« Le système œil-main » (Pfaender, 2003) propose une autre solution à même de pallier le déficit de repères. Cette fonctionnalité exploite deux types de champs récepteurs. « La main » utilise le même principe de restitution haptique que celui utilisé lors de nos différentes études. « L'œil » est associée à deux autres cellules braille (ce qui implique un boîtier comportant 4

cellules). Ce champ récepteur (de 16 champs élémentaires également) recouvre la totalité de l'écran et donne le positionnement du curseur dans cet espace en activant l'un des 16 picots. La Figure 57 illustre le mode de fonctionnement du système œil-main.

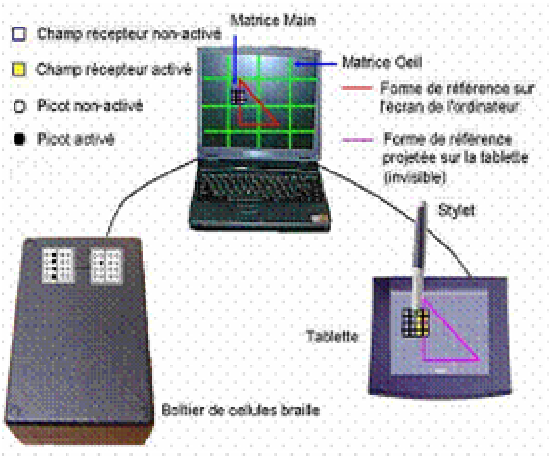


Figure 57 : Présentation du système œil-main, illustration (d'après Sribunruangrit, 2004)

Des jeux de Memory et de bataille navale développés par Sribunruangrit (2004) mobilisent *« le système œil-main »* et s'avèrent une façon judicieuse d'en familiariser l'usage auprès des jeunes utilisateurs aveugles.

- ***Le zoom***

L'étude conduite par Ziat, Gapenne, Stewart et Lenay (2004) auprès de sujets voyants aveuglés a permis d'explorer la question du rapport optimal entre la taille de l'objet exploré et la taille du champ récepteur. La possibilité de modifier de façon dynamique la taille du champ récepteur pour gérer le passage de l'appréhension globale à la discrimination locale procurerait une flexibilité dans l'usage qui rapprocherait Tactos de la situation traditionnelle.

Notre approche minimaliste a donc permis de mettre en évidence un niveau de performance auquel peuvent prétendre des sujets aveugles, suffisamment entraînés, qui utilisent un dispositif restreint et de faible coût. Grâce à la temporalité de l'étude, nous avons pu constater une évolution positive des résultats en lien avec la stabilisation des stratégies exploratoires. Par ailleurs, les travaux réalisés au sein du Groupe Suppléance Perceptive poursuivent le déploiement d'une démarche de conception gradualiste. Le gradualisme permet de constater l'évolution des possibilités d'action et de perception eût égard à l'enrichissement progressif

du dispositif. Il est alors possible, par exemple, de caractériser le lien entre l'augmentation des capteurs et des stimulateurs et les performances dans la reconnaissance.

Etant donné que Tactos est conçu pour être utilisé à terme dans un environnement d'apprentissage collectif, nous souhaitons élargir notre champ d'analyse afin de prendre en considération les interactions sociales. Nous pourrons alors continuer à recourir à une clinique de l'activité telle qu'elle est pratiquée par Clot (1999) ou encore envisager des approches à caractère sociologique ou ethnométhdologique. Il est question que de nouveaux collégiens aveugles s'intègrent dans la dynamique du projet Tactos. Aussi, grâce à la stabilisation des ressources techniques et cognitives employées, il nous apparaît possible de diminuer les temps d'apprentissage et d'offrir des interactions plus variées aux futurs utilisateurs. L'interface Tactos dans son ensemble englobera :

* Le logiciel Tactos : son utilisabilité a été l'objet de tests préalables grâce au concours expert des adultes aveugles. Le logiciel est compatible avec un lecteur d'écran et pilotable au clavier. Les raccourcis ont été définis pour être aisément mémorisables.

* Le mode d'emploi (en cours de rédaction) comporte à la fois l'aide en ligne et la présentation des différents éléments de l'interface.

* Les schèmes d'exploration et de lecture suggérés grâce à des exercices d'entraînement éventuellement dispensés sur un mode interactif et/ou ludique.

* Des effecteurs : nous avons envisagé le stylet tactile, mais les cellules braille dédiées à Tactos peuvent être incorporées à d'autres dispositifs comme les bloc-notes électroniques, ou le téléphone portable.

* Les fonctionnalités pour assister l'activité de lecture en l'occurrence le marquage sonore, le zoom et le système œil-main.

Si l'usage de Tactos a été essentiellement étudié dans l'espace délimité de sa fenêtre et avec Géoplan, ce dispositif permet (contrairement au dispositif comme le PHANtoM qui fonctionne dans un monde clos) d'aller explorer l'interface graphique. Les utilisateurs aveugles peuvent être invités à découvrir l'espace bi-dimensionnel dans lequel les voyants ont l'habitude d'interagir. Tactos possède un double avantage par rapport aux autres types de technolgies étudiés en (2.2) :

1. Il s'insère dans un contexte technologique familier (cellules braille, interface graphique équipée d'un lecteur d'écran)
2. Il donne accès aux images et aux objets graphiques de l'interface.

Néanmoins, une étude reste à conduire pour estimer la pertinence et l'efficacité du passage d'une interaction séquentielle à une interaction spatialisée.

Enfin, il nous faut également souligner que l'implication des partenaires aveugles a été un des éléments clés de l'appropriation du dispositif, même si nous n'avons pas appréhendé directement la dimension affective. Les chercheurs du laboratoire GSP et ceux du Groupes Psy.Co de Rouen ont fait en sorte d'instaurer un climat de confiance par la mise en place du partenariat et d'un suivi régulier. Les sujets ont très vite compris l'enjeu du projet et ils étaient eux même force de proposition. Ils savaient que nous n'étions pas là pour les juger mais pour nous intéresser à la singularité de leur expérience perceptive et entrevoir avec eux des solutions pour un outil destiné à une communauté. Leur motivation et leur enthousiasme sont en partie liées à leur pleine participation dans cette aventure scientifique. Si le succès de cette technologie de suppléance s'explique aussi par le contexte général dans lequel s'est déroulé le projet, faire de Tactos une plate-forme de jeu et de dialogue contribuerait à favoriser son adoption par des utilisateurs aveugles. Dans nos futures recherches nous comptons considérer dans quelle mesure l'interface rend possible la constitution d'émotions. L'échec relatif des dispositifs dits de substitution sensorielle nous enseigne combien la dimension émotionnelle est prégnante (Bach y Rita, 1997). En effet, lors de la manipulation du TVSS, les sujets réussissaient à discriminer des formes mais aucune valeur n'était associée aux percepts. Les aveugles de naissance étaient déçus de ne pas ressentir d'émotion même lorsqu'ils découvraient les portraits de personnes proches. Si on reprend l'hypothèse formulée par Lenay et al. (2000) selon laquelle l'attribution de la valeur est liée à une histoire commune et à une mémoire collective alors Tactos se doit de devenir une interface d'échange entre utilisateurs aveugles et voyants.

Ainsi et pour conclure, l'ensemble de cette étude nous semble révéler l'intérêt, pour un travail de conception, de manipuler simultanément les trois leviers que sont : la technologie de suppléance, l'assistance à l'activité et l'enseignement de stratégies. Compte tenu de l'experience positive qui s'est tissée, au cours du projet, entre les chercheurs et les partenaires aveugles, ce travail nous invite également à faire de Tactos un espace de significations partagées, en développant sa complémentarité avec d'autres technologies (internet, téléphone) et en multipliant les situations d'usages.

5 Bibliographie

Aaronson, D., Gabias, P. (1987). « Computer use by the visually impaired », *Behavior Research and Methods, Instruments & Computers, 19*(2), 275-282.

Alexander, C. (1979). *The Timeless Way of Building*, Oxford University Press

Ali Ammar, A. (2003). Conception et validation d'une interface numérique de perception dédiée aux personnes non-voyantes, in C. Bastien (Ed.), *Actes des Journées EPIQUE03*, Paris, France, 317-324.

Ali Ammar, A., Gapenne, O., Blomme, E., Rovira, K. (2005). « Analyse de l'exploration tactile sur support traditionnel chez la personne aveugle et conception de l'interface de lecture Tactos », *in* O. Gapenne, M. C. Manes Gallo, C. Brassac & L. Mondada, *Alternatives en sciences cognitives, enjeux et débats, Revue d'Intelligence Artificielle*, *19*, Hermes-Lavoisier, 339-354.

Amalberti, R., Valot, C. (1990). « Champ de validité pour une population de pilotes de l'expertise de l'un d'entre eux », *Le travail Humain, 61,* 3, 209-234.

Amamou, Y. (2004). *Analyse descriptive de trajectoires perceptives enregistrées au moyen d'une interface de suppléance tactile: L'apport de la transformée de Fourier,*, Mémoire de DEA, UTC Groupe Suppléance Perceptive.

Archambault, D., Burger, D. (2002). « The Vickie projec », *in* K. Miesenberger, J. Klaus, W. Zagler (Eds.), *in Proceedings of the ICCHP 2002* (8th International Conference on Computers Helping People with Special Needs, Linz, Austria), Springer LNCS 2398.

Armostrong, L., Marks, L.E. (1996). «Haptic perception of linear extent», *Perception 61*, 1211-1226.

Astroft, S. (1984). « Research on multimedia access to microcomputer for visually impaired youth ». *Education of the Visually Handicapped, 25*, 109-118.

Auvray M. (2004). *Immersion et perception spatiale, l'exemple des dispositifs de substitution sensorielle*, Thèse de Doctorat de L'EHESS en Psychologie Cognitive.

Bach-y-Rita, P. (1967). « Sensory Plasticity : Applications to avision substitution system », *Acta Neurol. Scand, 43,* 417-426.

Bach-y-Rita, P. (1972). *Brain mechanism in sensory substitution,* New York, Academic Press.

Bach-y-Rita, P. (1981a). « Brain plasticity as a basis of the development of rehabilitation procedures for hemiplegia », *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*, *13*, 73-83.

Bach-y-Rita, P. (1981b), « Central nervous system lesions: sprouting and unmasking in rehabilitation », *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 1981, *62*, 413-417

Bach-y-Rita, P. (1997). « Substitution sensorielle et qualia », *in* J. Proust (Ed.), *Perception et intermodalité. Approches actuelles de la question de Molyneux,* Paris, PUF, 81-100.

Bach-y-Rita, P. Kaczmarek, K. A., Tyler, M. E., (2003a). "A tongue-based tactile display for portrayal of environment characteristics" in L.J. Hettlinger et M.W. Haas, *Virtual and Adaptive Environments*, New Jersey: Erlbaum, 169-186.

Bach y Rita, P., Tyler M. E., Kaczmarek, K. A. (2003b). « Seeing with the brain », *International Journal of Human Computer Interaction, 15,* 285-295. Laurence Erlbaum Associates Inc.

Bach-y-Rita, P., Kaczmarek, K.A., Tyler, M.E., Garcia-Lara, J. (1998). « Form perception with a 49-points electrotactile stimulus array on the tongue », *Journal of Rehabilitation Research and. Development*, 35, 427-430.

Bannon, L.J, Bodker, S. (1991). « Beyond the interface : encountering artefacts in use", in J.M. Caroll (Ed.), *Designing interaction Psychology of Human Computer Interface*, Cambridge University Press.

Bastien, C. (1987). *Schèmes et stratégies dans l'activité cognitive de l'enfant*, Paris, PUF.

Bastien, J.M. C. (2001). *Approches, méthodes et techniques d'évaluation des systèmes interactifs*, Cours du DEA d'Ergonomie 2000-2001.

Battista, M.T. (1999). «The importance of spatial structuring in geometric reasoning», *Teaching Children Mathematics, 6*, 170-177.

Baulac, Y., Laborde, J.-M. (1989). « Sur l'interface d'un Cahier de brouillon informatique pour la géométrie », *Rapport de recherche n°7871*, Grenoble, LSD2IMAG, 91-101.

Béguin, P., Rabardel, P. (2000). « Concevoir pour les activités instrumentées », *RIA, PEC'2000*, 35-54.

Berger, C., Hatwell, Y. (1996). « Developmental trends in haptics and visual free classifications : Influence of stimulus structure and exploration and decisional processes », *Journal of Experimental Child Psychology, 63,* 447-465.

Berlà, E.P. (1972). « Behavioural strategies and problems in scanning and interpreting tactual displays», *The new Outlook, 66*, 277-286.

Berlà, E.P. (1973). « Strategies in scanning a tactual pseudomap », *Education of the Visually Impaired», 5*, 8-19.

Berlà, E.P. (1981). « Tactile scanning and memory for a spatial display by blind students », *Journal of Special Education, 15*, 341-350.

Berlà, E.P. (1982). « Haptic perception of tangible graphic displays », *in* W. Schiff and E. Foulke (Eds.), *Tactual perception : A source book*, New York, Cambridge University Press.

Berlà, E.P., Butterfield, L.H. (1977). « Tactual distinctive features analysis : Training blind students in shape recognition and in locating shapes on a map », *Journal of Special Education, 11*, 335-346.

Berlà, E.P., Murr, M.J. (1974). « Searching tactual space », *Education of the Visually Handicapped, 6*, 49-58.

Bertelson, P. (1995). « Language by touch : The case of braille reading», *in* B. Gelder et J. Morais

Berteslon, P. Mousty, P. (1989). « Simultaneous reading of Braille with two hands : a reply to Millar». *Cortex, 25*, 495-498.

Berteslson, P., Mousty, P., D'Alimonte, G. (1985). « A study of Braille reading : 2 patterns of hand activity in one-hanaded and two-handed reading», *The Quaterly Journal of Experimental Psychology*, 37A, 325-256.

Beumer, J. J., Wiethoff M., Attema J. (2004). « Designing New Technology Based Services to Support Visually Impaired Computer Workers (VICWs) », *in Proceedings of the ICCHP 2004* (9th International Conference on Computers Helping People with Special Needs, Paris).

Bishop, A. (1989). « Review of research on visualization in mathematics education", Focus on *Learning Problems in Mathematics, 11*, 7-16.

Bodker, S. (1989). « A human activity approach to user interfaces », *Human Computer Interaction*, 4, 171-195.

Bower, T.G.R. (1977). *A primer of infant development*, San Fransisco, W.H. Freeman and Co.

Brambing, M. (1985). « Mobility and orientation processes of the blind », *in* D.H. Warren et E. R. Strelow (Eds.), *Electronic spatial sensing for the blind,* Dordrecht, The Netherlands, Nijhoff, 493-508.

Bruillard, E. (1997). *Les machines à enseigner*, Paris, Hermès.

Bühler et Stephanidis (2004). « European Co-operation Activities Promoting Design for All in Information Society Technologies», *in Proceedings of the ICCHP 2004* (9th International Conference on Computers Helping People with Special Needs, Paris).

Burdea, G. C. (1999). « Haptic feedback for virtual reality», *in 7ème Journées du Groupe de Travil Réalité Virtuelle*, juin 1999.

Burger, D. (1993). « Les handicapés visuels face à l'informatique », *in* J. C. Spérandio (Ed.), *L'ergonomie dans la conception des projets informatiques* (1 ed., pp. 247-263). Octarès.

Burger, D., Pican, N. (1995). « Rendre accessible les interfaces graphiques aux déficients visuals», *in* A.-B. Safran & A. Assimacopoulos (Eds.), *Le déficit visuel., De la neurophysiologie à la pratique de la réadaptation,* Paris, Masson, 155-167.

Burger, D. (2000). « L'apport des nouvelles technologies au problème de l'accès au document par les personnes handicapées visuelles », *In* Y. Hatwell, A. Streri & E. Gentaz (Eds.), *Toucher pour connaître,* Paris, PUF, 307-320.

Butter, E. G., Bjorklund, D. F. (1976). « Are two hand better than one? Assessing information acquired from one and two handed haptic exploration of random forms », *Perceptual and motor skills, 43*, 115-121.

Card, S., Moran, T., Newell A. (1983). The psychology of Human-Computer-Interaction, Hillsdale, NJ Erlbaum.

Caroll, J.M. (1991). « The Kittle House Manifesto », *in* J..M. Caroll Ed., *Designing interaction, Psychology at the Human-Computer Interface,* Cambridge University Press, New York.

Carpenter, P.A., Eisenberg, P. (1978). « Mental rotation and the frame of refernce in blind and sighted individuals », *Perception & Psychophysics, 23*, 117-124.

Casey, E. S. (1987). *Remembering. A phenomenological study*, Bloomington and Indianapolis, IN/ Indiana University Press.

Chazal, P. (1999). *Les aveugles au travail,* Paris, Le Cherche Midi.

Charlin, J. (1999). « Enseignant en mathématiques à l'université », i*n* P. Chazal (Ed.), *Les aveugles au travail,* Paris, Le Cherche Midi, 185-186.

Chartier, R., Lautrey, J. (1992). « Peut-on apprendre à connaître son propre développement cognitif ? », *L'orientation Scolaire et Professionnelle,* 1, 251-270.

Clements, D., Nemirovski, R., Sarama (1995). *Trips,* California : Dale Seymour Publications.

Clot, Y. (1995). *Le travail sans l'homme ? Pour une psychologie des milieux du travail et de vie*, La Découverte, coll Textes à l'appui.

Clot, Y. (1999). *La fonction psychologique du travai ,* Le travail Humain, PUF.

Clot, Y., Faita, D., Fernandez, G. Scheller, L. (2001). « Les entretiens en auto-confrontation croisée : une méthode en clinique de l'activité », *Education permanente, 146.*

Confrey, J. (1991). Function Probe (Version 2.3.9). Santa Barbara, Ca: Intellimation.

Cornoldi, C., Calore, D. , Pra Baldi, A. (1979). « Imagery ratings and recall in congenitally blind subjects», *Perceptual and Motor Skills, 48*, 484-499.

Cornoldi, C., De Beni, R., Roncari, S., Romano, S. (1989). « The effects of imagery instructions on totally congenitally blind recall», *European Journal of Cognitive Psychology, 1*, 321-331.

Cornoldi, C., Vecchi, T. (2000). « Cécité précoce et images mentales spatiales », *in* Y. Hatwell, A. Streri et E. Gentaz (Eds.), *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle,* Paris, PUF, 175-186.

Costanzo, R., Gardener, E.P. (1981). « Multiple-joint neurons in somatosensory cortex of awake monkeys", *Brain Research, 214*, 321-333.

Crawford, A.R., Scotte, W.E. (2000). « Making sense of slope», *The Mathematics teacher, 93,* 114-118.

Crombie, D., Lenoir, R., McKenzie, N. (2004). « Accessibility from Scratch: How an Open Focus Contributes to Inclusive Design», *in Proceedings of the ICCHP 2004* (9th International Conference on Computers Helping People with Special Needs, Paris).

Crombie, D., Lenoir, R., McKenzie, N., Barker, A. (2004). « Math2braille: Opening Access to Mathematics », *in Proceedings of the ICCHP 2004* (9th International Conference on Computers Helping People with Special Needs, Paris).

Davidson, P. W. (1972). « Haptic judgements in curvature in blind and sighted humans», *Journal of experimental psychology, 93,* 43-55.

Day, R.H., Wong, T.S. (1971). « Radial and tangential movements directions as the determinants of the haptic illusion in an L figure», *Journal of Experimental Psychology, 83*, 172-173.

De Beni, R., Cornoldi, C. (1985). « The effects of imaginal mnemonics on congenitally totally blind and normal subjects», *in* D. Marks & D. Russel (Eds.), *Imagery, 1*, , Dunedin, new Zeland, Human Performances associates, 54-59.

De Beni, R., Cornoldi C. (1988). « Imagery limitations in totally congenitally blind subjects », *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition, 14*, 650-655.

De Roquefeuil, (1999). « Statisticienne », i*n* P. Chazal (Ed.), *Les aveugles au travail*, Paris, Le Cherche Midi, 274-275.

Descargues, B. (2000). L'accessibilité des nouvelles technologies de l'information et de la communication aux personnes aveugles et malvoyantes, Rapport à Madame la Ministre de l'Emploi de la Solidarité et à Madame la Secrétaire d'Etat à la Santé et aux Handicapés, juillet 2000.

De Volder, A., Bol, A., Blin, J., Robert, A., Arno, P., Grandin, C., Michel, C., Veraart, C. (1997). « Brain energy metabolism in early blind subjects : Neural activity in the visual cortex», *Brain Research, 750*, 235-244.

Descartes, R. (1637/2000). *Le discours de la méthode,* Flammarion.

Dewey, J. (1976). *L'école et l'enfant*, Delachaux et Niestlé, Neuchâtel.

Dong, Keates, Clarkson et Cassim (2003). « Implementing inclusive design: the discrepancy between theory and practice», *in Universal access - theoretical perspectives, practice and experience*, *2615*, 106-117

Dourish, P. (2001). *Where the action is, the foundations of embodied interaction.* The MIT Press, Cambridge, Massachussets.

Dreyfus, T. (1991). « On the status of visual reasoning in mathematics and mathematics education», *in Proceedings of the 15th Annual Meeting of the International Group for the Psychology of Mathematics Education.*

Ducret, J.-J. (2001). « Jean Piaget et les sciences cognitives », *in* J. Montangero (Ed.), *Piaget et les Sciences Cognitives*, *Intellectica, 33,* 209-229

Edwards, R., Ungar, S., Blades, M. (1998). « Route description by visually impaired and sighted children from memory and from maps», *Journal of Visual Impairment and Blindness, 92*, 512-521.

Espinosa, M.A., Ochaitas, E. (1998). « Using tactile maps to improve the practical spatial knowledge of adults who are blind », *Journal of Visual Impairement and Blindness, 92*, 339-345.

Espinosa, M.A., Ungar, S., Ochaitas, E., Blades, M., Spencer, C. (1998). « Comparing methods for introducing blind and visually impaired people to unfamiliar urban environments», *Journal of Environmental Psychology, 18*, 277-287.

Faineteau, H., Gentaz, E., Viviani, P. (soumis). « The kinaesthesic of perception of Eucliden distance : studies on the detour effect ».

Faverge, J.M. (1970). « L'homme agent d'infiabilité et de fiabilité du processus industriel », *Ergonomics, 13,* 301-327.

Ferreiras, H., Freitas, D. (2004). « Enhancing the Accessibility of Mathematics for Blind People: The AudioMath Project», *in ss of the ICCHP 2004* (9th International Conference on Computers Helping People with Special Needs, Paris).

Feuerstein, R., Rand, Y., Hoffman, M., Miller, R. (1980). The instrumental Enrichment, Baltimore, MD, University Park Press.

Feurzeig, W., Papert, S. (1968). « Programming language as a conceptual frameork for teaching mathematics», *in* F. Bresson, M. de Montmollin (Eds.), *La recherche en enseignement programmé, tendances actuelles*, Dunod, 233-248.

Fitts, P. M. (1954). « The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement», *Journal of Experimental Psychology*, vol. 47, pp. 381-391.

Friedlander, N., Schlueter, K., Mantei, M. (1998). « Bullseyes! When Fitts'law doesn't fit», *in Proceedings of ACM CHI'98 Conference on Human Factors in Computing Systems*, 257-264.

Foulke, E. (1964). «Transfer of a complex perceptual skill», *Perceptual and Motor Skills, 18*, 733-740.

Foulke, E. (1991). « Braille », *in* M.A. Heller et W. Schiff (Eds.), *Psychology of touch*, Hillsdale, NJ, erlbaum, 219-233.

Fraiberg, S. (1977). *Insights from the blind*, New York, Basic Books.

Gapenne, O., Lenay, C. & Boullier, D. (2001). « Assistance, Suppléance et Substitution : trois modalités distinctes du couplage Humain/Technique », i*n Proceedings of the Conference JIM'2001*, Metz, France, 142-145.

Gapenne, O., Lenay, C., Stewart, J., Bériot, H., & Meidine, D. (2001). «Prosthetic device and 2D form perception : the role of increasing degrees of parallelism », *in Proceedings of the Conference on Assistive Technology for Vision and Hearing Impairement (CVHI'2001)*, Castelvecchio Pascoli, Italie, 113-118.

Gapenne, O., Lenay, C. & Boullier, D. (2002). "Defining categories of the human/technology coupling : theoretical and methodological issues", *in Adjunct Proceedings of the 7th ERCIM Workshop on User Interface for All*, Chantilly, France, .197-198

Gapenne, O., Rovira, K., Ali Ammar, A. & Lenay, C. (2003)., « TACTOS: A special computer interface for the reading and writing of 2D forms in blind people», *in* C. Stephanidis (Ed.), *Universal Access in HCI, Inclusive Design in the Information Society* (10th International Conference on HCI, Crête), London, Lawrence Erlbaum Associates, 1270-1274.

Gardener, J. A., Bulatov, V. (2004). « Directly Accessible Mainstream Graphical Information», *in Proceedings of the ICCHP 2004* (9th International Conference on Computers Helping People with Special Needs, Paris).

Gaunet, F. (2002). « Overview of research on the notion of space in blind people », Communication orale. *Third Workshop on the genesis of perception and the notion of space in machines and humans.*. Paris.

Gentaz, E. (2000). « Caractéristiques générales de l'organisation anatomo-fonctionnelle de la perception cutanée et haptique », *in* Y. Hatwell, A. Streri & E. Gentaz (Eds.), *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle,* Paris, PUF, 19-34.

Gentaz, E., Badan, M. (2000). « Organisation anatomo-fonctionnelle de la perception tactile : apports de la neuropsychologie et de l'imagerie cérébrale », *in* Y. Hatwell, A. Streri & E. Gentaz (Eds.), *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle,* Paris, PUF, 35-50.

Gibson, J. J. (1966). *The sense considered as perceptual systems,* Boston, Houghton Mifflin Company.

Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach of visual perception*, Boston, Houghton Mifflin Company.

Giroux, E. (1999). « Chercheur en mathématiques », i*n* P. Chazal (Ed.), *Les aveugles au travail,* Paris, Le Cherche Midi, 269-270.

Goldberg, A. (1979). « Eductational Uses of a Dynabook », *Computer & Education, 3*, 247-266.

Goodwin, C. (1994). « Professional vision », *Ameriacn Anthropologist, 96*, 606-633.

Goodwin, C. (1997). «The blackness of black : color categories as situated practisce», *in* L. B. Resnik, R. Slajo, C. Pontecorvo & B. Burge (Eds.), *Discourse, Tools ans Reasoning: Essays on Situated Cognition (Vol. 160).*

Goody, J. (1979). *La raison graphique, la domestication de la pensée sauvage,* Paris, Editions de Minuit.

Gouzman, R., Kozulin, A. (2000). « Enhancing cognitive skills in blind leraners», diponible à : http://www.icevi.org/publications/educator/winter_00/article2.htm

Greaney, J., Tobin, M.J., Hill, E.W. (1998). *Neale analysis of reading ability : University of Birminghman Braille Version,* London, Royal National Institute for the Blind.

Gregory, R.L., Wallace, J.G. (1963). « Recovery from early blindness-a case study » Monogr. Supple. 2. Cambridge, Effers.

Griffith, D. (1990). « Computer access for persons who are blind or visually impaired : human factors issues », *Human factors, 32*, 467-475.

Guide de l'acheteur public de produits graphiques en relief à l'usage des personnes déficientes visuelles. Les éditions des journaux officiels. Edition 2000.

Hadamard, J. (1945). *Essai sur la psychologie de l'invention dans le domaine mathématiques*, Gauthier-Villars, Bordas.

Hans, M. (1974). « Imagery and modality in paired associate learning in the blind », *Bulletin of the Psychonomic Society, 4*, 22-24.

Hatwell, Y. (1986). *Toucher l'espace*, Lille, Puf.

Hatwell, Y. (2000). « Les procédures manuelles d'exploration chez l'enfant et l'adulte », *in* Y. Hatwell, A. Streri & E. Gentaz (Eds.), *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle*, Paris, PUF: Presses Universitaires de France, 71-84.

Hatwell, Y. (2002). « Le développement perceptivo-moteur de l'enfant aveugle », Communication orale, Congrès APSLF. Rouen, France.

Hatwell, Y. (2003). *Psychologie cognitive de la cécité précoce,* Paris : DUNOD.

Healey, L., Hoyles, C. (1999). « Visual and symbolic reasoning in mathematics: making connections with computers? »,*Mathematical Thinking and learning, 1*, 59-84.

Hebenstreit, J. (1971). « Les méthodes et les perspectives de l'enseignement assisté par ordinateur », *Informatique et pédagogie, R.G.E., 89*, 805-810.

Heller, M. A. (1989). "Picture and pattern perception in the sighted and the blind: the advantage of the late blind », *Perception, 18,* 379-389.

Heller, M. A. (1992). "The effect of orientation on tactual braille recognition : optimal touching positions", *Perception & Psychophysics, 51* (6), 549-556.

Heller, M. A., Brackett, D. D., Sroggs, E., Steffen, H., Heatherly, K. & Salik, S. (2002). « Tangible pictures: Viewpoint effects and linear perspective in visually impaired people », *Perception, 31*, 747-769.

Heller, M. A., Calcaterra, J. A., Burson, L., Tyler L. A. (1996a). « Tactual pictures identification by blind and sighted people : Effects of providing categorical information », *Perception and Psychophysics, 58*, 310-323.

Heller, M. A., Calcaterra, J. A., Tyler, L. A., Burson, L. (1996b). « Production and interpretation of perspectives drawings by blind and sighted people", *Perception, 25*, 321-334.

Heller, M.A., Kennedy, J.M. (1990). « Perspective taking, pictures and the blind », *Perception and psychophysics, 48*, 459-466.

Heller, M. A., Kennedy, J.M. & Joyner, T. D. (1995). « Production and interpretation of pictures of houses by blind people », *Perception, 24*, 1049-1058.

Hollins M., Kelley E.K. (1988). « Spatial updating in blind and sighted people », *Perception and Psychophysics, 43*, 380-388.

Holmes, E., Jansson, G. (1997). A touch tablet enhanced with synthetic speech as a display for visually impaired people's reading of virtual maps. In Proceedings of CSUN (California State University, Northridge) 12th Conference on Technology and Persons with Disabilities, Los Angelos, March 18-22.

Hocquenghem, S. Les logiciels Géoplan et géospace et leurs versions ActiveX. Available at : http://www.epi.asso.fr/revue/102/ba2p137.htm

Ikeda, M., Uchikawa, K. (1978). Integrating time for visual pattern perception and a comparison with the tactile mode. Vision Research , 18, 1565-1571.

James, G.A. (1982). « Mobility maps», *in* W. Schiff et E. foulke (Eds.), *Tactual Perception*, Cambridge, Cambridge Press University, 334-363.

Jansson, G. (2000). Tactile maps-overview of research and development. Draft of a written version of a talk at a conference on tactile maps organised by Talking Book and Braille Library in Stockholm, Sweden, Februray 3-4.

Jansson, G. (1983). Tactile Guidance of movement. *International Journal of Neuroscience, 19,* 37-46.

Jansson, G., Monaci, L. (2004). « Haptic identification of objects with different number of fingers », *in* S. Ballesteros & M. A. Heller (Eds.), *Touch, Blindness and Neuroscience*, Madrid, UNED Press, 209-219.

Johansson, R.S., Vallbo A.B. (1979). « Tactile human sensory coding in the glabrous skin of the human hand», *Trends in Neuroscience, 6*, 27-83.

Johson, K.O., Lamb, G.D. (1981). « Neural mechanisms of spatial tactile discrimination : Neural patterns evoked by Braille-like dot patterns in the monkeys», *Journal of Physiology, London,* 310, 117-144.

Jonides, J., Kahn, R., Rozin, P. (1975). « Imagery instructions improve memory in blind subjects», *Bulletin of the Psychonomic Society,* 5, 424-426.

Kaczmarek, K. A., Bach-y-Rita, P. (1995). « Tactile Displays », in W. Barfield & T. A. Furness (Eds), *Virtual environments and advanced interface design* (pp. 349-341), New York, Oxford University Press, 349-341.

Kamel, H. M., Landay, J. A. (2000). « A study of blind drawing practice: creating graphical information without the visual channel», *in* proceedings ASSETS' 00. Arlington, Virginia.

Kaptelinin, V. (1996). «Computer mediated activity : functional organs in social end developmental contexts" », *in* B.A. Nardi (Ed.), *Context and consciousness, activity theory and Human Computer Interaction*, Cambridge, MIT Press.

Karsenty, L. (2000). « La transparence dans l'interaction homme-machine », cours de DEA d'Ergonomie 2000-2001.

Karshmer, A.I. (2004). « Mathematics for Blind People», *in Proceedings of the ICCHP 2004* (9th International Conference on Computers Helping People with Special Needs, Paris).

Kay, A. (1993). « *The early history of Smalltalk*», *in* Proceedings *History of Programming Languages HOPL II"*, ACM SIGPLAN Conf., New York, ACM.

Kay, A., Goldberg, A. (1977). « Personal Dynamic Media», *Computer, mars 77*, 31-41.

Klatzky, R.L. (1999). « Path completion after haptic exploration without vision : implications for haptic representations », *Perception & Psychophysics*, 61, 220-235.

Klatzky, R.L., Colledge, R.G., Loomis, J.M., Cicinelli, J.G., Pellegrino, J.W. (1995). « Performance of blind and sighted persons on spatial tasks », *Journal of Visual Impairement and Blindness, 89*, 70-82.

Klatzky, R. L., Lederman, S. L. (1993). « Toward a computational model of constraint-driven exploration and haptic object identification», *Perception, 22*, 597-621.

Kelly, J.A. (1999). « Improving problem solving through drawings», *Teaching children mathematics, 6,* 48-51.

Kennedy, J. M., Gabias, P., Nicholls, A. (1991). « Tactile pictures», *in* M. A. Heller et W. Schiff (Eds), *The psychology of touch,* Hillsdale, NJ, Erlbaum, 301-325.

Kennedy, J. M. (1993). *Drawing and the blind*, New Haven and London, Yale University Press.

Kerr, N.H. (1983). « the role of vision in „visual imagery" experiments : Evidence from congenitally blind», *Journal of Experimental Psychology: General, 112*, 265-267.

Kirkapatrick, A. E. (1999). « Interactive Touch: Haptic Interfaces Based Upon Hand Movement Patterns », i*n proceedings of ACM CHI'99 Conference on Human Factors in Computing System ,* ACM ISBN, 59-60.

Knowlton, M., Wetzel, R. (1996). « Braille reading rates as a function of reading tasks», *Journal of Visual Impairment and Blindness, 90*, 227-236.

Kobayashi, M., Watanabe, T. (2004). «Communication System for the Blind Using Tactile Displays and Ultrasonic Pens -MIMIZU- », *in Proceedings of the ICCHP 2004* (9th International Conference on Computers Helping People with Special Needs, Paris).

Korkma, M. (1988). *NEPSY- A proposal neuropsychological test battery for young developmentally disabled children. Theory and Evaluation*, Academic Dissertation, Helsinki, Finlande.

Kosslyn, S.M. (1990). « Mental imagery», *in* D.N. Osherson, S.M. Kosslyn et J.M. Hollerbach (Eds.), *Visual cognition and action : An invitation to cognitive science, vol.,* Cambridge, The MIT Press.

Kurhila, J., Sutinen, E., Jokinen, S., Nyman, R., Väisänen, P. « Developing an Adaptive Learning Environment for the Disabled », diponible à : http://www.stakes.fi/tidecong/323devel.htm.

Kurniawan, S. H., Sutcliffe, A. « Evaluating the usability of a screen reader with blind users», *in* C. Stephanidis (Ed.), *Universal Access in HCI, Inclusive Design in the Information Society* (10th International Conference on HCI, Crête), London, Lawrence Erlbaum Associates, 1295-1299.

Kurze, M. « Guidelines for Blind People's Interaction wih Graphical information using Computer Technology »,disponile à : http://www.inf.fu-berlin.de/~kurze/publications/guidelin/guidelin.htm.

Kurze, M. (1996). « TDraw : A Computer-based Tactile Drawing Tool for Blind People», *in proceedings of the Second Annual ACM Conference on Assistive Technologies ASSETS'96*, ACM SIGCAPH, 131-138.

Laborde, J. M. (1995). « Des connaissances abstraites aux réalités artificielles, le concept de micromonde Cabri », *in* D. Guin, J.-F. et D. Py (Eds), *Environnements interactifs d'apprentsissage avec ordinateur*, Eyrolles, 29-41.

Lappin, J. S., Foulke, E. (1973). « Expanding the tactual field of view», *Perception andPsychophysics*, 14, 237-241.

Landau, B. (1986). « Early map use as an unlearned ability», *Cognition, 22*, 201-223.

Landau, B. (1988). « The construction and use of spatial knowledge in blind and sighted children», *in* J. Stiles-Davis, M. Kritchevski & U. Bellugi (Eds.), *Spatial Cognition: Brain Bases and Development,* Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, 343-371.

Landau, B., Spelke E., Gleitman H. (1984). « Spatial knowledge in a young blind child», *Cognition, 16*, 225-260.

Landau, S. (2003). Use of the talking tactile tablet in mathematics », *Journal of Visual Impairement and Blindness, 97,* 85-96.

Larkin, J. H., Simon, H. A. (1987). « Why a diagram is (sometimes) worth ten thousands words», *Cogntive Science, 11*, 65-100.

Lave, J., Wenger, E. (1991). *Situated Learning : Legitimate Peripheral Participation*, Cambridge, Cambridge University Press.

Lederman, S.J., Klatzky, R.L., Barber, P.O. (1985). « Spatial and movement based heuristics for encoding pattern information through touch», *Journal of Experimental Psychology : General, 114*, 33-49.

Lederman, S. J., Klatzky, R. L. (1987). « Hand mouvements: A window into haptic object recognition », *Cognitive Psychology, 19, 3*42-368.

Lederman, S. J., Klatzky, R. L., Chataway, C., Summers, C. D. (1990). « Visual mediation and the haptic recognition of two-diemensional pictures of common objects»,. *Perception and psychophysics, 47 (1),* 54-64.

Lederman, S. J., Klatzky, R. L. (1993). «Extracting objects properties through haptic exploration», *Acta Psychologica, 84,* 29-40.

Lenay, C. (1997). « Mouvement et perception: médiation technique et constitution de la spatialisation», *Communication à l'école d'été de l'Association pour la Recherche Cognitive sur le mouvement*, 69-80.

Lenay, C., Gapenne, O., Hanneton, S., Marque, C., Genouëlle, C. (2000). « La substitution sensorielle : limites et perspectives », *in* Y. Hatwell, A. Streri & E. Gentaz (Eds.), *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle,* Paris, PUF, 287-306.

Lenay, C., Gapenne, O., Hanneton, S., Stewart, J. (1999). « Perception et couplage sensori-moteur: expériences et discussion épistémologique », *in* A. Drogoul et J.A. Meyer (Eds.), *Intelligence Artificielle Située*, Paris, Hermès, 71-86.

Léon, P. (1999). « Informaticien », i*n* P. Chazal (Ed.), *Les aveugles au travail,* Paris, Le Cherche Midi, 258-260.

Leontiev, A. (1972). *Le développement du psychisme*, Paris, Editions sociales.

Leontiev, A. (1981). *Problems in the development of mind*, Moscou, Editions du Progrès.

Leplat, J. (1986). « L'analyse psychologique du travail », *in* J. Leplat (Ed.), *L'analyse du travail en psychologie ergonomique,* Toulouse, Editions Octarès.

Liben, L. S. (1988). „Conceptual issues in the development of spatial cognition", *in* J. Stiles-Davis, M. Kritchevski & U. Bellugi (Eds.), *Spatial Cognition: Brain Bases and Development,* Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, 167-174.

Loomis, J. M., Klatzky, R.L., Lederman, S. J. (1991). Similarity of tactual and visual picture recognition with limited field of view. *Perception, 20*, 167-177.

Lorimer, J. (1977). *The Neale analysis of reading ability adapted for the use by blind children*, Windsor, NFER-Nelson.

Luria, A.R. (1979). « The making of mind : a personal account of Soviet psychology », *in* M. Cole & S. Cole (Eds.), Cambridge, Harvard University Press.

Magee, L. E., Kennedy, J. M. (1980). Exploring pictures tactually. *Nature, 278,* 287-288.

Malik, E. (2001). *Apprentissage de la représentation multidimensionnel pour les élèves non-voyants*, Mémoire de DEA. Laboratoire d'Informatique Théorique Appliquée.

Marmor, G.S., Zaback, L.A. (1976). « Mental rotation by the blind : Does mental rotation depends on visual imagery ? *», Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 2,* 515-521.

Martin, J. H. (1983). "Somatic sensory system II : anatomical substrates for somatic sensation", *in* E.R. Kandel et J.H. Schwartz (Eds.), *Principles of neural science*, Amsterdam Elsevier-North Holland, 170-183.

Miletic, G. (1994). "Vibrotactile perception : perspective taking by children who are visually impaired", *Journal of Visual Impairement and Blindness, 88,* 550-563.

Miletic, G. (1995). "Perspective taking : knowledge of Level 1 and Level 2 rules by congenitally blind, low vision and sighted children*", Journal of Visual Impairement and Blindness, 89*, 514-523.

Miletic, G., Hughe,s P., Bach-y-Rita, P. (1986). "Vibrotactile stimulation : An Educational Program for Spatial Concept development". Journal of Visual Impairment and Blindnesse.

Millar, S. (1975b). "Spatial memory by the blind and sighted children", *British Journal of Psychology, 66,* 449-459.

Millar, S. (1975a). « Visual experience or translation rules ? Drawing the human figure by blind and sighted children", *Perception, 4*, 363-371.

Millar, S. (1985). "Movement cues and body orientation in recall of locations of the blind and sighted children", *Quaterly Journal of Experimental Psychology, 37*, 257-279.

Millar, S. (1991). "A reversed lag in the recognition and the production of drawings: theorical implications for haptic coding", *in* M. A. Heller et W. Schiff (Eds), *The psychology of touch*,. Hillsdale, NJ, Erlbaum 301-325.

Millar, S. (1997). *Reading by Touch,* London and New York: Routledge.

Minsky, M., Papert, S. (1972). *The 72' Progress Report*, Rapport interne, MIT IA Lab. Republié en 1974, Artificial Intelligence. Eugene, Oregon University Press.

Moço, V., Archambault, D. (2004). Automatic Conversions of Mathematical Braille: A Survey of Main Difficulties in Different Languages

Montangero, J. (2001). « Quelques processus de développement des connaissances : adaptation, équilibration et abstraction », *in* J. Montangero (Ed.), *Piaget et les Sciences Cognitives*, *Intellectica, 33,* 73-75.

Morrongiello, B.A., Timney, B., Humphrey, G.K., Anderson, S., Skory, C. (1995). « Spatial knowledge by blind and sighted children», *Journal of Experimental Child Psychology, 59*, 211-233.

Mousty, P., Berteslson, P. (1985). « A study of Braille reading : 1. reading speed as a function of hand usage and context», *Quaterly Journal of Experimental Psychology, 59*, 211-233.

Newell, A.F., Gregor, P. (2000). « User Sensitive Inclusive Design – in search of a new paradigm», *in Proceeding of the A.C.M. Conference on Universal Usability*, Washington, 39-44.

Newell, A., Simon, H. (1972). *Human problem solving*, Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall.

Noble, T., Nemirovsky, R., DiMattia, C., Wright, T. (2004). « Learning to see: making sense of the mathematics of change in middle school», International Journal of Computers for Mathematical Learning, 9, 109-167.

Norman, D.A., Draper, S. (1986). User centred system design : New perspectives in Human Computer Interaction, Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates.

Norman, D. (1989). *The Design of Everyday Things,* MIT Press.

Norman, D. (1991). « Cognitive artefact», *in* JM. Caroll (Ed.), *Designing Interaction Psychology of Human Computer Interface*, Cambridge University Press.

Norman, D. (1999). « Affordance, Conventions and Design », Interactions, 6, 38-42.

Ochaitas, E., Huertas, J.A. (1993). « Spatial representation by persons who are blind. A study of effects of learning and development», *Journal of Visual Impairement and Blindness, 87*, 37-41.

Ombredane, A., Faverge, J.M. (1955), *L'analyse du travail*, PUF.

O'Regan, K.J. & Noë, A. (2001). « A sensorimotor account of vision and visual consciousness», *Behavioral and Brain Sciences*, *24(5).*

Paivo, (1986). *Mental representation : A dual coding approach*, Oxford, Oxford University Press.

Paivo, A., Okavita, H.W. (1971). « Word imagery modalities and associative learning in blind and sighted subjects», *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior, 10,* 506-510.

Papert, S. (1980). *Mindstorms, Children, computers and powerful ideas*, Flammarion.

Papert, S.(1993). *The children's machine, Rethinking school in the age of computer*, New York, Basic Books.

Parkes, D. (1988). « Nomad an Audio-Tactile Tool for the acquisition, use and management of spatially distributed information by partially sighted and blind persons », *in* A.F. Tatham et A.G. Dodds, Proceedings of the Second International Symposium on Maps and Graphics for Visually Handicaped People, King's College, University of London, 24-29.

Parkes, D. (1998). « Tactile audio for graphiccay and mobility. A circle is either a circle or not a circle, The British Journal of Visual Impairement, 16, 98-104.

Passini, R., Proulx, G. (1988). « Wayfind without vision : An experiment with congenitally, totally blind people», *Environment and Behaviour, 20*, 227-252.

Pastré, P. (1997). « Didactique professionnelle et développement », *Psychologie Française, 42*, 89-100.

Pastré, P. (1999). « La conceptualisation dans l'action : bilan et nouvelles perspectives », *Education permanente, 139,* 13-35.

Pfaender, F. (2003). *La spatialisation d'information*, Mémoire de D.E.A., Université de Technologie de Compiègne.

Piaget, J. (1936). La naissance de l'intelligence chez l'enfant. Neuchâtel : Delachaux et Niestlé (9ème ed., 1977).

Piaget , J. (1967). *Biologie et connaissance*, Paris, Gallimard.

Piaget, J., Inhelder, B. (1947). *La représentation de l'espace chez l'enfant*, Paris, PUF.

Pick, H.L. (1988). « Perceptual aspects of spatial cognitive development», *in* J. Stiles-Davis, M. Kritchevski & U. Bellugi (Eds.), *Spatial Cognition: Brain Bases and Development,* Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, 145-156.

Pylyshyn, Z.W. (1973). « What the mind's eye tells the mind's brain : A critique of mental imagery», *Psychological Bulletin, 80*, 1-24.

Polya, G. (1965). *Comment poser et résoudre un problème*, Paris, Dunod.

Pontelli, E., Palmer, B. (2004). « Translating between Formats for Mathematics: Current Approach and an Agenda for Future Developments», *in Proceedings of the ICCHP 2004* (9th International Conference on Computers Helping People with Special Needs, Paris).

Rabardel, P. (1991). «Activity wirth a trianing robot and formation of knwoledge», *Journal of artificial intelligence in education,* Etats Unis.

Rabardel, P. (1995). *Les hommes et les technologies. Approche Cognitive des instruments contemporains*, Paris, Armand Colin.

Raman, T.V. (1994). « Aster : Audio System for Technical Readings», *Information Technology and Disabilities.*

Ramloll, R., Brewster, S. (2002). « A Generic Approach for Augmenting Tactile Diagrams with Spatial Non-Speech Sounds», *in Proceedings of the CHI'2002*. Minneapolis, Minnesota,USA.

Ramstein, C. (1996). « Combining Haptic end Braille Technologies : Design Issues and Pilot Study », *in proceedings of the Second Annual ACM Conference on Assistive Technologies ASSETS'96*, ACM SIGCAPH, 37-44.

Ramstein, C., Martial, O., Dufresne, A., Carignan, M., Chassé, P., Mabilleau, P. (1996). « Touching and Hearing GUI's : Design Issues for the PC-Access System", *in proceedings of the Second Annual ACM Conference on Assistive Technologies ASSETS'96*, ACM SIGCAPH, 2-9.

Rieser, J., Ashmead, C.R.T., Yougquist, G.A. (1990). « Visual perception and the guidance of locomotion without vision to previously seen targets », *Perception, 19*, 675-689.

Rieser, J., Lockman, J.J., Pick, H.L. (1980). « The role of visual experience in knowledge of spatial layout », *Perception and Psychphysics, 28,* 185-190.

Rival, I. (1987). « Picture Puzzling: Mathematicians are rediscovering the power of pictoral reasoning», *The sciences, 27,* 41-46.

Roll, J. P. (1994). «Sensiblités cutanées et musculaires», *in* M. Richelle, J. Requin et M. Roberts (Eds.), *Psychologie Expérimentale*, Paris, PUF, 483-542.

Roll, J.P. (2003). «Physiologie de la kinesthèse. La proprioception musculaire : sixième sens, ou sens premier », *Intellectica 2003/1-2, 36-37,* 49-66.

Rouzier, S., Hennion, B., Pérez Segovia, T., Chêne, D. « Touching Geometry for Blind Pupils», *in Proceedings of the ICCHP 2004* (9th International Conference on Computers Helping People with Special Needs, Paris).

Rubinstein, S.L. (1958). *De la pensée et des voies de son étude*, Académie des Sciences de l'URSS, Moscou.

Russier, S. (1999). « Haptic discrimination of two dimensional raised line shapes by blind and sighted adults". *Journal of Visual Impairement and Blindness,* 93, 421-426.

Schiff, W., Kaufer, L., Mosak, S. (1966). « Informative tactile stimuli in the perception of histograms», *Perceptual and Motor Skills, 23*, 1315-1335.

Schneiderman, B. (1998). *Designing the user interface : strategies for effective human-computer interaction (2nd ed.),* Reading, MA: Addison -Wesley.

Schwartz, J.L., Yerushalmy, M. (1988). *The Geometric Supposer*, Pleasantville, NY, Sunburt Communications.

Schwarzer, G., Küfer I., Wilkening F. (1999). « Learning categories by touch : On the development of holistic and analytic processing », Memory & Cognition, 27, 868-877.

Senden M. von. (1932/1960). Space and sight : the perception of space and shape in the congenitally blind before and after operation. Glencoe, Illinois, Free Press.

Shepard, R.N., Metzlze, J. (1971). « Mental rotation of three-dimensional objects», *Science, 171*, 701-703.

Spérandio, J.C. (1993). « Prospects for objects and standards in the interaction between computers and blind users», *in* D. Burger et J.C. (Eds), *Non-Visual Human-Computer Interactions, Prospects for the visually handicapped,* Les Editions INSERM et John Libbey Eurotext (actes du colloque INSERM-SETAA), 117-130.

Spérandio, J.C. (2001). « Critères ergonomiques pour une assistance adaptée », i*n proceedings of the Conference JIM'2001,*.Metz, France, 30-37.

Sribunruangrit, N., Marque, C., Lenay, C., Gapenne, O. (2003). « Improving blind people's spatial ability by bimodal-perception assistive device for accessing graphic information», *in* G.M. Craddock L.P. McCormack R.B. Reilly & H.T.P. Knops, *proceedings of Assistive Technology – Shaping the Future, AAATE'03*, Netherlands, IOS Press, 476–480.

Sribunruangrit, N. (2004). *Etude et développement de systèmes de suppléance perceptive tactile pour les personnes aveugles*, Thèse de l'Université de Technologie de Compiègne, Spécialité Génie Biomédical.

Stephanidis, C., Paramythis, A., Sfyrakis, M., Savidis, A. (2001). « A Case Study in Unified Interface Development : The AVANTI Web Browser», *in* C. Stephanidis (Ed.), *User Interfaces for All : Concepts, Methods and Tool.* Mahwah, New Jersey, Lawrence Erlbaum Associates, 525-568.

Sterr, A., Müller, M., Elbert, T., Rockstroh, B., Pantev, C., Taub, E. (1998). « Perceptual correlates of changes in cortical representation of fingers in blind multifinger braille readers», *Journal of Neuroscience, 18,* 4417-4423.

Stevens, R., Hall, R. (1998). « Disciplined perception: Learning to see in technoscience», *in* M. Lampert et M.L. Blunk (Eds.), *Talking Mathematics in School: Studies of Teaching and Learning*, Cambridge, England, Cambridge University Press.

Stevens, R. D., Edwards, A. D. N. (1996). « An Approach to the Evaluation of Assistive Technology», *in proceedings of the Second Annual ACM Conference on Assistive Technologies ASSETS'96*, ACM SIGCAPH, 64-71.

Stewart, J. (2003). *Cours d'histoire critique des sciences cognitives*, Université de Technologie de Compiègne.

Stewart, J., Gapenne, O. (2004). « Reciprocal modelling of active perception of 2-D forms in a Simple Tactile-Vision substitution system», *Minds and Machines, 14,* 309-330.

Skinner, B.F. (1954). « The science of learning and the art of teaching», *Harvard Education Review, 24*, 86-97.

Stöger, B., Miesenberger, K., Batusic, M. (2004). « Mathematical Working Environment For the Blind Motivation and Basic Ideas», *in Proceedings of the ICCHP 2004* (9th International Conference on Computers Helping People with Special Needs, Paris).

Sullivan T., Matson, R. (2000). *Barriers to Use : Usability and Content Accessibility on the Web's Most Popular Sites*, Arlington, VA, USA.

Szeminska, A., Inhelder, B. Piaget, J. (1970). *The child conception of geometry*. New York: Basic books.

Tall, D. (1992). « Enseignement de l'analyse à l'âge de l'informatique », *in* B. Cornu (Ed.), *L'ordinateur pour enseigner les maths,* Paris, PUF, 159-182.

Theofanos, M. F., Redish, J. (2003). « Guidelines for Accessible and Usable Web Sites: Observing Users Who Work With Screen Readers», *Interactions, 10*, 38-51.

Thomson, P.W. (1987). « Mathematical Microworlds and Intelligent Computer-Assisted Instruction», *in* R. Lawler et M. Yazdani (Eds.), *Artificial Intelligence and Education, 1,* Norwood, NJ, Ablex, 83-109.

Tinti, C., Galati, D., Vecchio, M.G., De Beni, R., Cornoldi, C. (1999). « Interactive auditory and visual images in the blind», *Journal of Visual Impairment and Blindness, 93*, 579-583.

Tobin, M.J. (1988). *Beginning braille. Self-instructional course (Revised Edition)*, London, Royal National Institute for the Blind.

Tobin, M.J., Burton, P., Davies, B. T., Guggenheim J. (1986). « An experimental investigation of the effects of celle size and spacing in braille: With some possible implications for the newly-blind adult learner», *The New Beacon, 829*, 133-135.

Tobin, M., Greaney, J., Hill, E. (2000). « Le Braille : problèmes de structure, d'enseignement et d'évaluation », *in* Y. Hatwell, A. Streri & E. Gentaz (Eds.), *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle,* Paris, PUF, 245-265.

Ungar, S., Blades, M., Spencer, C. (1995). « Mental rotation of a tactile layout by young visually impaired children », *Perception, 24*, 891-900.

Ungar, S., Blades, M., Spencer, C. (1996). « The ability of visually impaired children to locate themselves on a tactile map », Journal of Visual Impairement and Blindness, 90, 526-535.

Ungar, S., Blades, M., Spencer, C. (1997). « Teaching visually impaired children to make distance judgements from a tactile map », *Journal of Visual Impairment and Blindness, 91*, 163-174.

Ungar, S., Blades, M., Spencer, C., Morseley, K. (1994). « Can visually impaired children use tactile maps to estimate directions ? », *Journal of Visual Impairment and Blindness, 88*, 221-233.

Van Bastelaer, P. (2004). « Améliorer l'accessibilité des sites Web publics pour les personnes handicapées de la vue : enjeux, principes et situation en Belgique », *in Proceedings of IHM* (16ème Conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine, Namur, Belgique), ACM ICPS, 3-6.

Vergnaud, G. (1991). « La théorie des champs conceptuels », *Recherches en didactique des mathématiques*, *10*, 135-169.

Vergnaud, G. (2001). « Piaget visité par la didactique », *in* J. Montangero (Ed.), *Piaget et les Sciences Cognitives*, *Intellectica, 33*, 107-123.

Vonèche, J. (2001). « Commentaires », *in* J. Montangero (Ed.), *Piaget et les Sciences Cognitives*, *Intellectica, 33,* 259-260.

Vygotski, L.S. (1930/1985). « La méthode instrumentale en psychologie »", *in* B. Schneuwly & J.P. Bronckart (Eds.), *Vygotsky aujourd'hui*, Delachaux et Niestlé.

Vygotski, L. (1931). *Mind and society*, Cambridge M.A., MIT Press.

Vygostski, L. (1994). « Défectologie et déficience mentale », *in* K. Bariniskov et G. Petitpierre. Lausanne : Delachaux et Niestlé.

Wenger, E. (1998). *Communities of Practice : Learning, Meaning and Identity,* Cambridge, Cambridge University Press.

Weygand, D. (1999). « Ingénieur en électronique et physique », i*n* P. Chazal (Ed.), *Les aveugles au travail,* Paris, Le Cherche Midi, 221-272.

Weinstein, S. (1968). « Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex and locality», *in* Kenshalo D. R. (Ed.), *The Skin Senses,* Illinois, Thomas, 195-222.

Wilson, M. (2001). « Theory and practice from cognitive science », *in* C. Stephanidis (Ed.), *User Interface for Al l: Concepts, Methods and Tools,* Mahwah, New Jersey, Lawrence Erlbaum Associates, 137-166.

Winn, W. (1991). « Learning from mapsand diagrams », *Educational Psychology Review, 3*, 211-247.

Wisner, A. (1997). « Aspects psychologiques de l'anthropotechnologie », *Le travail humain, 60*, 229-254.

Wittgenstein, L. (1953/1997). Philosophical Investigations (G. E. M. Anscombe, Trans.). Malden, MA: Blackwell.

Wolf, D. (1988). « Drawing the boundary : the development of distinct systems for spatial representation in young children », *in* J. Stiles-Davis, M. Kritchevski & U. Bellugi (Eds.), *Spatial Cognition: Brain Bases and Development,* Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, 231-245.

Yerushalmy, M. (1991). « Students perceptions of algebraic function using multiple representation software », *in* D.L. Ferguson (Ed.), *Advanced Educational technologies for Mathematics and Sciences, NATO ASI, F, 107*, 497-524.

Yerushalmy, M., Chazan, D. (1990). *Overcoming Visual Obstacles with the Aid of the Supposer,* Pleasantville, NY, Sunburt Communications.

Zajicek, M. (2004). « A special design for special people », *in Proceedings of the ICCHP 2004* (9th International Conference on Computers Helping People with Special Needs, Paris).

Ziat., M., Gapenne, O., Lenay, C., Stewart, J. (2004). « Acuité perceptive via une interface pseudo-haptique», *in Proceedings of IHM* (16ème Conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine, Namur, Belgique), ACM ICPS, 263-266.

Zimler, J., Keenan, J.M. (1983). « Imagery in the congenitally blind : How visual are visual images? Journal of Experimentl Psychology : Learning », *Memory and Cognition, 9,* 269-282.