



Conception et évaluation de techniques d'interaction non-visuelle basées sur un dispositif personnel : application à l'exploration de cartes numériques par des personnes avec déficience visuelle

Sandra Bardot

► To cite this version:

Sandra Bardot. Conception et évaluation de techniques d'interaction non-visuelle basées sur un dispositif personnel : application à l'exploration de cartes numériques par des personnes avec déficience visuelle. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2019. Français. NNT : 2019TOU30061 . tel-02896422

HAL Id: tel-02896422

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02896422>

Submitted on 10 Jul 2020

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.



THÈSE

En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par l'Université Toulouse 3 - Paul Sabatier

Présentée et soutenue par
Sandra BARDOT

Le 11 juin 2019

**Conception et évaluation de techniques d'Interaction non-visuelle
basées sur un dispositif personnel : Application à l'exploration de
cartes numériques par des personnes avec déficience visuelle**

Ecole doctorale : **EDMITT - Ecole Doctorale Mathématiques, Informatique et
Télécommunications de Toulouse**

Spécialité : **Informatique et Télécommunications**

Unité de recherche :
IRIT : Institut de Recherche en Informatique de Toulouse

Thèse dirigée par
Christophe JOUFFRAIS et Marcos SERRANO

Jury

Mme Edwige PISSALOUX, Rapporteure
M. Benoit MARTIN, Rapporteur
M. Emmanuel DUBOIS, Examineur
M. Mathieu SIMONNET, Examineur
M. Christophe JOUFFRAIS, Directeur de thèse
M. Marcos SERRANO, Co-directeur de thèse

I now walk... into the wild

Chris - Into the wild

REMERCIEMENTS

Pour commencer, je souhaite remercier mes deux rapporteurs Edwige Pissaloux et Benoît Martin pour leur lecture approfondie du manuscrit, ainsi que Emmanuel Dubois et Mathieu Simonnet d'avoir d'accepté de faire partie de mon jury. J'ai vraiment apprécié vos intérêts pour mon travail et les discussions et les questions échangées pendant ma soutenance.

Je tiens à remercier mes deux encadrants, Christophe et Marcos, pour leur confiance dès le début de mes stages de Master ainsi que lors de ces années de thèse. L'accompagnement, la bonne humeur, la patience que vous avez mis en œuvre m'ont énormément aidée. Je remercie également Bernard, Marc et Antonio qui ont suivi de près mes travaux de thèse, qui ont répondu à mes multiples questions et qui m'ont apportés de précieux conseils.

Je voudrais remercier tous les membres de l'équipe ELIPSE. Leur convivialité m'a permis de travailler dans un environnement idéal. Les moments passés avec les anciens et actuels doctorants, post-doctorants et stagiaires ont été très agréables. L'aide apportée ainsi que les échanges que nous avons eu, surtout dans les moments difficiles, ont toujours permis de me remotiver. Plus particulièrement, les personnes avec qui j'ai eu la chance de partager mon bureau m'ont permis de m'enrichir professionnellement mais surtout humainement.

Je voudrais remercier tous les participants à mes études et les personnes de l'IJA pour votre gentillesse. Le temps que vous avez pris, les retours que vous m'avez donné pour mon travail ont été très précieux.

Je remercie également tous mes amis qui m'ont permis de m'évader de mon travail que ce soit au travers de bières partagées, de soirées ou de voyages. Ma présence ces derniers mois n'a pas toujours été assidue mais vous l'avez toujours toléré avec beaucoup d'indulgence. Je tiens à remercier plus particulièrement, mes deux colocataires qui ont dû et doivent encore me supporter au

quotidien. Le soutien que vous m'avez apporté est immense et les nombreuses soirées à discuter m'a permis de me remettre en question sur de nombreux aspects.

Enfin, je veux remercier ma famille, notamment mes parents, ma sœur, mon beau-frère et mes grands-parents « pour avoir été là, tout simplement ». Merci pour les relectures de mon manuscrit ainsi que pour l'organisation et la confection de mon pot de thèse.

RESUME

Pour les personnes déficientes visuelles, les documents en relief sont importants pour l'accès à la connaissance. Afin de répondre aux spécificités de la perception haptique, il est nécessaire de simplifier la quantité d'information disponible au sein d'un document en relief. Ce processus s'appelle l'adaptation du contenu et repose sur l'intervention d'un spécialiste qui sait concevoir un contenu adapté à l'exploration tactile et à la compétence des utilisateurs. Comme la modification est impossible, celui-ci doit être refait à chaque changement. Ainsi, la possibilité d'utiliser et d'explorer un contenu numérique plutôt que physique représente une alternative intéressante. Un grand nombre de données numériques en accès libre est disponible, et l'adaptation des données peut être réalisée grâce à des algorithmes prévus à cet effet. Cependant, les documents numériques sont par essence visuels, et par conséquent inaccessibles aux personnes déficientes visuelles en l'état. L'état de l'art concernant l'exploration haptique de données numériques fait apparaître un ensemble de solutions reposant sur un artefact (comme une souris à retour de force). Cette approche présente de nombreuses limitations, notamment le fait de parcourir le document avec un seul point de contact. Une approche plus fonctionnelle consiste à laisser l'utilisateur explorer un graphique numérique avec ses mains : chaque doigt peut alors être considéré comme un curseur. Les retours sonore et vibratoire sont déclenchés en fonction de la position du doigt sur le document numérique. Cependant, il est nécessaire de connaître les éléments importants d'un graphique (c'est-à-dire les éléments qui déclencheront des retours), ainsi que le rôle de chacun des doigts au cours de l'exploration.

La problématique de cette thèse porte sur l'exploration des données spatiales numériques en reposant sur des interactions haptiques. L'objectif est double : 1) comprendre comment les personnes déficientes visuelles explorent les graphiques en relief ; et 2) proposer des techniques d'interaction haptique, basées sur des dispositifs personnels et transportables, qui permettent aux utilisateurs déficients visuels d'explorer des graphiques numériques dans différents contextes (à la

maison ou à l'école par exemple). Pour répondre au premier point, nous avons réalisé deux études portant sur les stratégies d'exploration des documents en relief, en fonction du niveau d'expertise des utilisateurs. Pour répondre au deuxième point, nous avons proposé de nouvelles techniques d'interaction reposant sur l'utilisation d'une montre connectée qui permet des retours localisés. Nous avons mené deux études expérimentales concernant la conception et l'évaluation de techniques d'interaction haptiques basées sur la montre. La première étude portait sur la comparaison de l'exploration de graphiques en relief à celle de graphiques numériques virtuels. Les résultats montrent que deux de nos techniques d'interaction permettent une exploration de graphiques numériques plus rapide que l'exploration de graphiques en relief. Notre deuxième étude visait à développer et évaluer des techniques d'interaction permettant l'utilisation des deux mains lors de l'exploration de contenus numériques. Les résultats montrent que les stratégies bimanuelles reposant sur un retour bilatéral localisé améliorent les performances d'exploration de graphiques numériques. Combinées à un dispositif de localisation et de suivi des mains, les techniques d'interaction développées sur une montre connectée pourraient permettre aux utilisateurs d'interagir avec des contenus numériques dans de nombreuses situations de la vie quotidienne.

TABLE DES MATIERES

Remerciements.....	3
Résumé.....	5
Table des matières	7
Table des figures.....	9
Liste des tableaux	14
Chapitre 1 - Introduction	16
1 Terminologie.....	17
2 Contexte sociétal.....	18
3 Objectifs.....	21
4 Questions de recherche.....	22
5 Projet AccessiMap	23
6 Structure du manuscrit	24
Chapitre 2 - État de l’art.....	28
1 Introduction	29
2 Propriétés et exploration des graphiques en relief	30
3 Interaction en entrée : graphiques numériques.....	49
4 Interactions en sortie	66
5 Conclusion du chapitre	70

Chapitre 3 - Stratégies d'exploration.....	74
1 Introduction.....	75
2 Conception des différents graphiques en relief	78
3 Méthode d'analyse des mouvements d'exploration tactile.....	83
4Étude 1 : Impact du statut visuel (voyants vs non-voyants) sur les performances de l'exploration tactile.....	89
5 Étude 2 : Impact de l'expertise sur l'exploration tactile.....	99
6 Conclusion	124
Chapitre 4 - Exploration interactive de cartes numériques.....	126
1 Introduction.....	127
2 Exploration numérique non-visuelle de données géospatiales.....	129
3 Études des techniques d'interaction pour explorer des cartes numériques.....	137
4 Conclusion du chapitre	176
Chapitre 5 - Conclusion et perspectives	178
1 Discussion générale.....	179
2 Perspectives	183
Bibliographie	189

TABLE DES FIGURES

Figure 1. À gauche : une personne lisant un planisphère en relief ; à droite : l'impression d'une carte en relief.....	19
Figure 2. Affichage interactif de données spatiales, tiré de http://map.datafrance.info/population , le 15/01/2019.	20
Figure 3. À gauche : utilisateur envoyant un SMS utilisant une application de texte Braille ; à droite : photo d'un utilisateur déficient visuel équipé d'un smartphone, d'une plage braille et d'une montre connectée.	21
Figure 4. Exemple d'utilisation d'une table interactive par un déficient visuel.	24
Figure 5. À gauche : carte de l'Europe ; à droite : carte de l'Europe adaptée de [35].....	32
Figure 6. Exemple d'aires, de lignes et de symboles facilement reconnaissables tactilement. Illustration tirée de [35].	33
Figure 7. Four permettant de créer des documents thermogonflants.....	34
Figure 8. À gauche : Une thermoformeuse ; à droite : le document résultant.	35
Figure 9. Livre tactile pour enfant, tiré de https://ldillusion.files.wordpress.com/2014/03/wp_20130611_011.jpg , le 08/02/2019.....	36
Figure 10. Plan d'un quartier réalisé sur un tableau aimanté lors d'un cours de locomotion à l'IJA.....	37
Figure 11. Image d'un marteau avec un champ de vision réduit (correspondant au carré) de [95].....	38
Figure 12. À gauche : formes identiques ; à droite : formes différentes, tirée de [84].	41
Figure 13. Les trois explorations possibles : (i) à une main (ii) avec deux mains en séquentiel et (iii) avec les deux mains en parallèle de [181].	43
Figure 14. Deux exemples de la stratégie <i>parcours linéaire</i> avec une ou deux mains, tirés de [51].....	47

Figure 15. Utilisateur explorant une carte en relief sur un écran tactile, tiré de [18].....	51
Figure 16. Carte imprimée en 3D avec différents niveaux de relief, tiré de [76].	52
Figure 17. À gauche : un graphe avec des <i>phicons</i> de [102] ; à droite : des <i>phicons</i> reliés entre eux de [31].....	54
Figure 18. Mouvement des balles représentées par des robots de [52].	55
Figure 19. Ecran BrailleDis 9000 avec la carte des États-Unis et ses états de [186].	56
Figure 20. À gauche : navigation dans un tableur ; à droite : navigation dans une grille, tirée de [189].....	58
Figure 21. À gauche : Geomagic Touch X ; au milieu : Novint Falcon ; à droite : VTPlayer.....	59
Figure 22. À gauche : plan d'un appartement ; à droite : l'exploration de la version accessible [46].....	61
Figure 23. À gauche : <i>Toucher et parler</i> ; à droite : <i>Projection depuis les bords</i>	63
Figure 24. Utilisatrice explorant une carte numérique, tirée de [1].	64
Figure 25. Utilisation de TimbreMap, tiré de [153].	67
Figure 26. Dessins 2D tirés de nos études.....	79
Figure 27. Dessins avec perspectives tirés de nos études.	80
Figure 28. Graphes mathématiques tirés de nos études.....	81
Figure 29. Cartes géographiques tirées de nos études.....	82
Figure 30. Plans tirés de nos études.....	83
Figure 31. Dispositif expérimental.	84
Figure 32. Nombre de fixations tactiles détectées en fonction de la taille de la fenêtre et du seuil.....	88
Figure 33. Protocole de l'expérimentation.....	91
Figure 34. Images tirés de la première étude.....	94
Figure 35. Distance moyenne d'exploration pour la main droite ; D : Dessin ; D-P : Dessin avec perspective ; G : Graphe ; C : Carte ; P : Plan.	96

Figure 36. Temps moyen d'exploration des deux mains de manière simultanées. D : Dessin ; D-P : Dessin avec perspective ; G : Graphe ; C : Carte ; P : Plan.	97
Figure 37. Procédure de l'expérimentation.....	101
Figure 38. Images tirées de la deuxième étude.....	105
Figure 39. Pourcentage moyen d'identification correcte des graphiques en fonction du type d'exploration.....	107
Figure 40. Pourcentage moyen d'identifications correctes des graphiques en fonction de l'expertise utilisateur et du contexte d'exploration.	108
Figure 41. Pourcentage moyen des réponses correctes en fonction de l'expertise.	109
Figure 42. Fixations tactiles des index gauche et droit.....	110
Figure 43. Fixations tactiles des index gauche et droit en fonction de l'expertise utilisateur.....	111
Figure 44. Pourcentage du temps d'exploration avec 0, 1 ou 2 mains mobile(s).....	112
Figure 45. Pourcentage d'implication des mains selon l'expertise.	113
Figure 46. Fixations tactiles des index gauche et droit.....	114
Figure 47. Fixations tactiles des index gauche et droit en fonction de l'expertise utilisateur.....	115
Figure 48. Pourcentage du temps d'exploration avec 0, 1 ou 2 mains mobile(s).....	116
Figure 49. Pourcentage d'implication des mains selon l'expertise.	117
Figure 50. Fixations tactiles des index gauche et droit.....	119
Figure 51. Fixations tactiles des index gauche et droit en fonction de l'expertise utilisateur.....	120
Figure 52. Pourcentage du temps d'exploration avec 0, 1 ou 2 mains mobile(s).....	121
Figure 53. Pourcentage d'implication des mains selon l'expertise.	122
Figure 54. Exemple de carte utilisée en école spécialisée.	130
Figure 55. Exploration Directe : L'utilisateur parcourt la carte avec son doigt.....	133
Figure 56. Pour sélectionner une donnée (filtre sémantique ou bon mot), il faut effectuer un balayage vertical.	134
Figure 57. L'utilisateur accède à la grille en hauteur.	135

Figure 58 : Notre espace de conception combine deux dimensions de retour : la localisation spatiale (unilatérale, bilatérale) et la similarité (identique, différente).	136
Figure 59. À gauche : configuration expérimentale avec les caméras ; à droite : marqueurs sur le doigt.....	138
Figure 60. En haut à gauche : Carte physique en relief, avec un chiffre et une lettre braille ; en haut à droite : carte numérique en exploration Direct ; en bas à gauche : carte numérique en exploration Filtre (filtre activé sur maïs) ; en bas à droite : carte numérique en exploration Grille (filtre activé sur maïs).....	140
Figure 61. Temps moyen pour répondre à la question pour chaque technique et différents nombres de régions.....	144
Figure 62. Pourcentage de réponses correctes pour chaque technique et différents nombres de régions.....	145
Figure 63. Exemples de différents participants du parcours utilisateurs avec les trois techniques virtuelles.....	146
Figure 64. Préférence utilisateur subjective suivant l'efficacité, la satisfaction et une préférence globale.	147
Figure 65. Carte des États-Unis avec une grille 3x3.	148
Figure 66. À gauche : Les utilisateurs peuvent effectuer des balayages gauche/droite pour sélectionner des données ; à droite : des balayages haut/bas pour sélectionner des valeurs.....	149
Figure 67. À gauche : Deux exemples d'explorations enregistrées pour la Question 1 (trouver max/min) avec Filtre ; à droite : avec Grille.....	153
Figure 68. À gauche : les montres et les TopCodes ; à droite : dispositif expérimental.	157
Figure 69. Temps moyen en s pour effectuer la tâche.....	162
Figure 70. À gauche : Stratégie <i>parcours linéaire</i> ; à droite : stratégie <i>forme libre</i>	163
Figure 71. Temps moyen en secondes pour effectuer la tâche 1.....	168
Figure 72. Temps moyen en secondes pour effectuer la tâche 2.....	169

Figure 73. Exemple de stratégies utilisées (la carte numérique sous-jacente est numérique. Elle est affichée à des fins d'illustration uniquement). À gauche : stratégie <i>parcours linéaire symétrique</i> (P4 avec B-DF, tâche 1, mouvements simultanés des mains). À droite : <i>forme libre</i> (P2 avec U-SF, tâche 2, mouvements séquentiels de la main). Les lignes bordeaux et bleue correspondent respectivement aux mouvements des mains gauche et droite.....	170
Figure 74. Trois techniques d'interactions basées sur une montre connectée : à gauche, la technique Directe; au milieu la technique Filtre; à droite la technique Grille + Filtre.....	181
Figure 75. À gauche : retour unilatéral ; à droite : retour bilatéral.	182
Figure 76. À gauche : Système proposé par [1] ; à droite : Xperia Touch.....	184
Figure 77. À gauche : le gant vibratoire de [96] ; à droite : FingerReader de [144].	187

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Profil des participants déficients visuels	92
Tableau 2. Profil des participants de l'étude	102
Tableau 3. Profil de l'expertise en exploration tactile des participants	103
Tableau 4. Profil des participants de l'étude 4	167

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Structure du chapitre

- 1 Terminologie
- 2 Contexte sociétal
- 3 Objectifs
- 4 Questions de recherche
- 5 Projet AccessiMap
- 6 Structure du manuscrit

1 TERMINOLOGIE

Afin de poser un cadre de lecture concret, il convient de définir certains termes utilisés tout au long de ce manuscrit.

1.1 LA DEFICIENCE VISUELLE

Selon l'Organisation mondiale de la Santé, en 2010, 285 millions de personnes souffrent de déficiences visuelles et parmi elles 39 millions de personnes sont aveugles [180]. L'acuité visuelle détermine la qualité de la vue et s'exprime en dixième. Pour connaître l'acuité visuelle, la distance à discerner deux points selon l'éloignement de l'observateur est mesurée. Les degrés de déficiences diffèrent et sont définis par la classification internationale des maladies :

- Catégorie 1 : La déficience visuelle moyenne. L'acuité visuelle est comprise entre $1/10^{\text{ème}}$ et $3/10^{\text{ème}}$. Les personnes peuvent accomplir des tâches presque normalement avec une aide simple.
- Catégorie 2 : La déficience visuelle sévère. L'acuité visuelle est comprise entre $1/20^{\text{ème}}$ et $1/10^{\text{ème}}$. Les personnes peuvent compter les doigts de la main à 3 mètres.
- Catégorie 3 : La déficience visuelle profonde. L'acuité visuelle est comprise entre $1/50^{\text{ème}}$ et $1/20^{\text{ème}}$. Les personnes peuvent compter les doigts de la main à 1 mètre.
- Catégorie 4 : La cécité presque totale. L'acuité visuelle est inférieure à $1/50^{\text{ème}}$, mais la perception lumineuse est préservée. Les personnes ne peuvent pas compter les doigts de la main à 1 mètre.
- Catégorie 5 : La cécité absolue. Les personnes n'ont pas de perception lumineuse.

Tout au long du manuscrit le terme « déficience visuelle » englobe les personnes ayant une déficience visuelle sévère jusqu'à celles ayant une cécité totale.

1.2 LE GRAPHIQUE NUMERIQUE

Il existe différents types de représentations graphiques comme les dessins, les graphes mathématiques, les cartes géographiques, etc. Dans la section 2.1, nous détaillerons les caractéristiques des principaux types de représentation. Dans cette thèse, le terme « graphique » englobe tous les types de représentation utilisés pour transmettre de l'information (ici tactile ou visuelle). Egalement, le terme de graphique numérique regroupe tous les types de représentation sur un écran ou une surface.

1.3 EXPLORATION A UNE OU DEUX MAINS

L'exploration à une main consiste à donner un retour par rapport à l'index pour explorer le graphique. De manière similaire, l'exploration à deux mains implique un retour pour les deux index. Les retours sont donnés en fonction de la position des index sur le graphique numérique. Les utilisateurs peuvent toutefois poser les autres doigts sur la surface mais aucun événement ne sera déclenché par le système.

2 CONTEXTE SOCIETAL

Cette thèse a été réalisée dans le contexte de l'accessibilité des graphiques numériques pour les personnes déficientes visuelles et s'appuie sur trois constats. Premièrement, toutes les personnes, y compris, déficients visuels ont besoin d'un accès régulier aux connaissances au cours de leur parcours scolaire mais aussi dans leur vie quotidienne. Pour ce faire, les personnes déficientes visuelles utilisent des graphiques en relief. Ces graphiques en relief existent sous plusieurs formes (détaillées dans la section 0) mais le format le plus usuel [136] est l'utilisation du papier Swell. Ce papier spécifique comporte des microcapsules réagissant à la chaleur. Lorsque le papier Swell passe dans un four spécifique (voir Figure 1), les parties imprimées du document se gonflent et

apparaissent en relief. Ainsi, les personnes déficientes visuelles explorent avec leurs mains le document et comprennent le contenu en suivant le relief.



Figure 1. À gauche : une personne lisant un planisphère en relief ; à droite : l'impression d'une carte en relief.

Pour répondre aux spécificités de la perception haptique, les documents sont conçus grâce à l'intervention d'un spécialiste appelé transcripneur. Le transcripneur adapte le contenu afin de limiter la quantité et la complexité des figures. Il conçoit également les documents en prenant en compte la compétence des utilisateurs : le degré de déficience visuelle (afin de déterminer la présence ou non de couleurs dans le document) ainsi que l'expertise en exploration haptique (afin de déterminer la complexité du document). Cependant les documents (notamment scolaires) peuvent rapidement devenir obsolètes [185]. La modification d'un document est alors coûteuse : le document doit être réalisé et réimprimé dans sa totalité.

Deuxièmement, l'évolution croissante des données numériques en accès libre sur internet. Ainsi, les utilisateurs ont facilement à leur disposition les informations qu'ils recherchent (par exemple, les différents itinéraires pour se déplacer d'un lieu à un autre). De nombreux services ont ainsi émergé afin d'enrichir ces données. C'est, par exemple, le cas de services comme OpenStreetMap, qui proposent aujourd'hui des contenus très riches et variés grâce à la contribution des internautes. Toute personne peut contribuer au développement de ces données cartographiques (par exemple l'ajout de bandes d'éveils de vigilance podotactile). Afin de pouvoir profiter pleinement de ces données numériques, des nouvelles techniques de visualisation ont été conçues et développées

[89,92,135,183]. Grâce à des algorithmes spécifiques (comme le filtrage de donnée), les données peuvent être modifiées ou affichées sur demande de l'utilisateur (voir Figure 2).

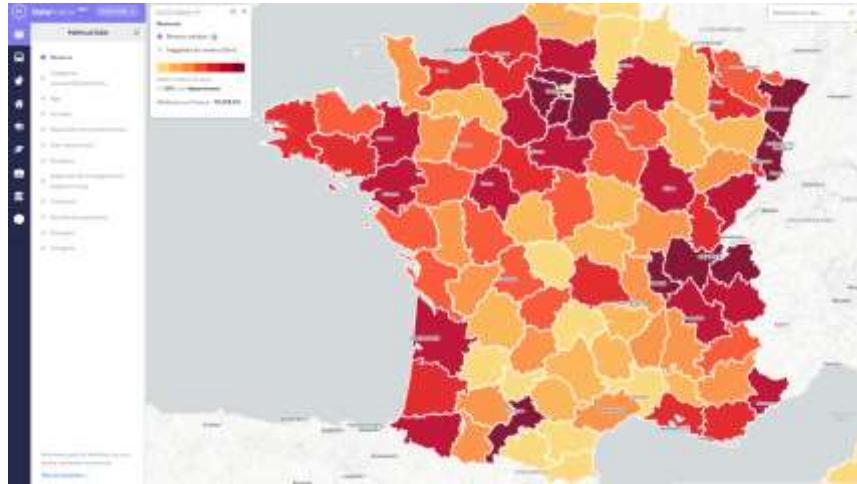


Figure 2. Affichage interactif de données spatiales, tiré de <http://map.datafrance.info/population>, le 15/01/2019.

De plus, au sein d'une même carte, il est possible de mettre en relation des données différentes (comme afficher la carte de France avec les données météorologiques et les cultures agricoles). Cependant, ces représentations graphiques en l'état par essence visuelles, sont inaccessibles aux personnes déficientes visuelles.

Dernièrement, le fait que les personnes déficientes visuelles s'intéressent de plus en plus aux nouvelles technologies. Elles acquièrent notamment des téléphones portables, des montres connectées, etc. (voir Figure 3). En 2018, un peu moins de 7,8 % des personnes déficientes visuelles répondant au sondage de [192] déclaraient ne pas posséder de téléphones portables. En utilisant des applications adaptées à leurs besoins, ces dispositifs mobiles et personnels leur permettent une plus grande autonomie dans leur vie quotidienne.



Figure 3. À gauche : utilisateur envoyant un SMS utilisant une application de texte Braille ; à droite : **photo d'un utilisateur déficient visuel équipé d'un smartphone, d'une plage braille et d'une montre connectée.**

3 OBJECTIFS

En se basant sur ces trois constats, nous avons dirigé nos travaux vers l'accessibilité des contenus numériques pour les personnes déficientes visuelles. La richesse des contenus disponibles ainsi que leur facilité d'accès sont bénéfiques pour une plus grande autonomie des personnes déficientes visuelles. La possibilité d'explorer un graphique numérique (c'est-à-dire un graphique sur un écran tactile) représente une alternative intéressante pour pallier les limitations des graphiques en relief (telle que la réimpression du graphique à chaque modification). Il est intéressant de se baser sur les dispositifs mobiles et personnels (tels que les tablettes, smartphones ou montres connectées) que les personnes déficientes visuelles possèdent déjà afin de ne pas les surcharger avec de nouveaux dispositifs. Néanmoins, avant de proposer de nouvelles techniques d'interaction pour explorer des graphiques numériques, il est nécessaire de connaître les éléments importants qui constituent un graphique (c'est-à-dire les éléments qui déclencheront des retours), ainsi que d'anticiper la façon dont l'utilisateur va employer ses mains/doigts pour l'explorer. Pour établir des hypothèses de départ, il est donc crucial de comprendre la façon dont les personnes déficientes visuelles explorent des graphiques en relief.

Ainsi, les travaux de cette thèse s'articulent autour d'un double objectif scientifique :

- Comprendre comment les personnes déficientes visuelles explorent les graphiques en relief ;
- Concevoir et évaluer des techniques d'interaction non-visuelles, basées sur des dispositifs mobiles et personnels, qui permettent aux utilisateurs déficients visuels d'explorer des graphiques numériques dans toute situation (à la maison, dans un centre commercial ou à l'école par exemple).

4 QUESTIONS DE RECHERCHE

Lors de cette thèse, nous avons étudié 1) comment les utilisateurs explorent des graphiques en relief ; et 2) l'usage d'un dispositif personnel en sortie pour restituer des contenus numériques. En l'absence de relief, l'information doit être rendue via d'autres canaux sensoriels (auditifs ou vibrotactiles). Afin de concevoir des techniques d'interaction adaptées à ces contraintes, nous avons voulu répondre aux questions suivantes :

Question 1 : Comment les personnes déficientes visuelles explorent-elles des graphiques en relief ?

- Quels sont les rôles des mains lors de l'exploration ?
- Quel est l'impact de l'expertise de l'utilisateur lors de l'exploration ?
- Est-ce que les personnes déficientes visuelles mettent en place des stratégies lors de l'exploration ?

Tout d'abord, nous avons proposé une étude avec différents types de graphiques sur du papier en relief. Cette étude visait à comprendre le mouvement des mains et des doigts lors de l'exploration de graphiques en relief. L'analyse des résultats permet de connaître les différences selon le niveau d'expertise des utilisateurs ainsi que le rôle des mains.

Question 2 : En se basant sur des dispositifs mobiles personnels, comment concevoir des techniques d'interaction pour explorer des graphiques numériques ?

- Quel dispositif personnel utiliser et quels sont ses avantages et ses inconvénients ?
- Comment compenser l'absence de relief ?
- Quels sont les retours à mettre en place pour l'exploration de graphiques numériques ?
- L'exploration de graphiques numériques avec un dispositif mobile et personnel est-elle performante ?

Pour répondre à ces questions, nous avons proposé un ensemble de techniques d'interaction reposant sur une exploration à une ou deux mains. L'exploration à une main consiste à parcourir le graphique avec un doigt, déclenchant les retours appropriés. L'exploration deux mains (exploration bimanuelle) correspond à l'usage d'un doigt de chaque main, qui déclenche les retours appropriés. Ces travaux ont été réalisés dans un cadre applicatif particulier : en effet, nous nous sommes basés sur un type de graphique, les cartes numériques. Les cartes sont particulièrement utilisées dans les écoles spécialisées notamment dans les cours de locomotion [31,91]. Nous avons conçu nos cartes avec plusieurs jeux de données (données de population et de chômage).

5 PROJET ACCESSIMAP

Ma thèse s'est inscrite dans le cadre du projet AccessiMap ANR-14-CE17-0018 (2014-2018). L'objectif du projet était de développer un prototype de table collaborative interactive (voir Figure 4) qui permette aux personnes déficientes visuelles d'explorer des représentations spatiales enrichies d'informations sonores. Ce projet a porté sur la conception de techniques d'interactions non-visuelles permettant d'explorer un graphique numérique que ce soit en autonomie ou dans un cadre collaboratif (accompagné d'enseignants spécialisés par exemple)



Figure 4. Exemple d'utilisation d'une table interactive par un déficient visuel.

Le consortium du projet comprenait deux équipes de recherche : l'équipe IRIT - ELIPSE (Toulouse) pour le développement et l'évaluation de nouvelles techniques d'interactions et l'équipe de Telecom ParisTech - Codesign Lab (Paris) pour la partie conception. Autour de ces deux équipes étaient associés une société d'ingénierie en logiciels libres, spécialisée dans le traitement de données géographiques complexes (Makina Corpus, Toulouse), et un centre d'éducation spécialisée (Institut des Jeunes Aveugles, IJA, Toulouse).

6 STRUCTURE DU MANUSCRIT

La structure de ce manuscrit retranscrit la démarche scientifique adoptée. Le chapitre 2 propose un état de l'art alors que les chapitres 3 et 4 renferment nos contributions.

Dans le chapitre 2, nous passons en revue la littérature scientifique du domaine suivant trois parties. La première partie concerne la perception des graphiques tactiles (en relief) par les personnes déficientes visuelles. Nous décrivons les différents graphiques en relief utilisés et leurs propriétés. Puis, nous détaillons les stratégies d'exploration utilisées par les personnes déficientes visuelles lors de l'identification de dessins. La deuxième partie du chapitre 2 décrit les différentes méthodes interactives pour explorer des graphiques numériques. Au travers de certains exemples, nous étudions les techniques d'interaction ainsi que les dispositifs utilisés pour rendre accessible

un graphique numérique. Enfin la troisième partie s’articule autour des dispositifs personnels portables développés pour les personnes déficientes visuelles dans différents contextes d’application.

Dans le chapitre 3, nous décrivons les études que nous avons réalisées sur les stratégies d’exploration de graphiques en relief sans vision. Une première étude compare les stratégies d’exploration de sujets voyants avec les yeux bandés (représentant un utilisateur novice) avec celles des personnes déficientes visuelles (représentant un utilisateur expert). Une deuxième étude compare les stratégies utilisées en fonction des types de graphiques (plan, cartes, ...). Dans cette étude, nous avons aussi observé l’impact de l’expertise de l’utilisateur et plus en détail le rôle de chacune des deux mains.

Dans le chapitre 4, nous présentons nos travaux sur la conception, le développement et l’évaluation de nouvelles techniques d’interaction pour explorer des graphiques numériques (en l’occurrence, des cartes). Dans un premier temps, nous décrivons les techniques d’interaction que nous avons conçues pour une exploration à une seule main. Deux études en découlent :

- Dans la première étude, nous avons comparé la performance des trois techniques d’interaction proposées pour explorer des cartes numériques à l’exploration traditionnelle sur carte en relief.
- Dans la deuxième étude, nous avons conservé les deux meilleures techniques d’interaction afin de les utiliser sur une carte numérique complexe, c’est-à-dire comprenant plusieurs jeux de données, afin de les comparer.

Basé sur ces résultats, nous décrivons le cadre de conception et les techniques d’interaction développées pour une exploration à deux mains. Nous avons réalisé deux études pour évaluer les performances de nos techniques d’interactions :

- Lors de la première étude, nous avons comparé plusieurs techniques d'interaction bimanuelles (avec deux points de contact).
- La deuxième étude nous a permis d'approfondir un sous-ensemble des techniques bimanuelles précédentes et nous avons identifié les stratégies des utilisateurs pour explorer une carte numérique.

Le chapitre 5 présente un résumé des contributions en les situant par rapport aux questions de recherche initiales. Puis nous présentons les perspectives de ces travaux à moyen terme et long terme :

- Comment étendre nos techniques d'interaction à d'autres types de graphiques (moyen terme) ;
- Comment améliorer le système de suivi de main pour explorer des graphiques numériques (moyen terme) ;
- Comment étendre l'interaction à plusieurs doigts de la main (long terme) ;
- Comment ajouter de l'interactivité à des objets tangibles et/ou physiques (long terme) ;
- Comment améliorer la mobilité, c'est-à-dire l'utilisation de nos techniques d'interactions dans toute situation (à la maison, dans un centre commercial ou à l'école par exemple) (long terme).

CHAPITRE 2

ÉTAT DE L'ART

Structure du chapitre

- 1 Introduction
- 2 Propriétés et exploration des graphiques en relief
- 3 Interaction en entrée : graphiques numériques
- 4 Interactions en sortie
- 5 Conclusion du chapitre

1 INTRODUCTION

Comme souligné dans l'introduction du manuscrit, pour les personnes déficientes visuelles, les documents en relief sont importants pour l'accès à la connaissance [90]. Afin de répondre aux spécificités de la perception haptique, il est nécessaire que les documents en relief respectent certaines règles afin d'être lisibles par un utilisateur déficient visuel. Dans la première partie du chapitre, nous nous pencherons sur le processus d'adaptation d'un graphique visuel en graphique en relief. Puis, nous regarderons les différents moyens de produire ces graphiques pour les rendre accessibles aux personnes déficientes visuelles. Enfin, nous ferons une revue des stratégies d'exploration tactiles que les utilisateurs mettent en place pour effectuer une tâche donnée (par exemple l'identification d'un dessin en relief). Nous nous pencherons uniquement sur les stratégies d'exploration de personnes adultes.

Dans cette thèse, nous nous intéresserons également aux graphiques numériques. Cependant, ils sont par essence destinés à être présentés visuellement, et par conséquent inaccessibles aux personnes déficientes visuelles en l'état. Nous détaillerons les différents dispositifs utilisés pour les rendre accessibles et les explorer au moyen d'outils numériques. Nous comparerons ces différents dispositifs afin de dégager les avantages et les limites de chacun.

Enfin, quel que soit le dispositif utilisé pour explorer des graphiques numériques, le retour donné à l'utilisateur est primordial. Pour transmettre des informations non visuelles, les retours s'appuient sur les modalités tactile ou auditive. Nous ferons une revue des interactions en sortie suivant différentes possibilités (tactiles, auditives ou combinées).

2 PROPRIETES ET EXPLORATION DES GRAPHIQUES EN RELIEF

Dans cette première partie, nous nous intéresserons aux différents types de graphiques et à leurs propriétés. Nous présenterons aussi les différentes techniques de production des graphiques pour leur donner du relief et ainsi les rendre accessibles aux personnes déficientes visuelles. Ensuite, nous expliquerons les propriétés du toucher afin de comprendre comment les informations sont perçues tactilement. Dans la dernière section, nous détaillerons comment les personnes déficientes visuelles explorent tactilement et nous regarderons les stratégies employées lors de l'exploration.

2.1 CLASSIFICATION DE GRAPHIQUES EXISTANTS

Il existe différents types de graphiques suivant le contenu à représenter : cela peut aller d'un dessin à des représentations plus complexes comme par exemple des cartes géographiques. Une revue de la littérature nous montre différentes catégorisations de ces graphiques [11,93,94,114,129]. Tout d'abord, une première catégorisation a été proposée par Bertin [11] avec quatre catégories : les schémas, les cartes, les réseaux et les symboles. Ensuite, Lohse [94] a demandé à des participants de classer différentes images. Cinq catégories émergeaient des résultats de cette étude : les graphes (et les tables), les cartes, les schémas, les réseaux et les icônes. Dans une étude suivante [93], la classification est passée à onze. Plus récemment, Paneels [114] s'est appuyé sur la classification initiale de Bertin [11] et l'a enrichi pour proposer sept catégories différentes : graphiques, cartes, signes, réseaux, schémas, images et tableaux.

- Les graphiques sont un type de représentation visuelle spécifique pour des informations numériques. Les graphiques peuvent être par exemple des graphes, des histogrammes ou des camemberts. Les graphiques sont utilisés pour facilement représenter des données relatives les unes par rapport aux autres. Les données numériques multidimensionnelles sont représentées dans un système de coordonnées cartésien ou polaire. Ainsi, les données

maximum et minimum sont aisément repérables. Les graphiques sont généralement utilisés dans un contexte mathématique ou financier.

- Les cartes donnent une représentation spatiale d'un lieu. En s'appuyant sur des symboles ou des caractères, les cartes représentent la position géographique d'emplacement et de disposition d'un lieu. Les cartes peuvent être soit en 2D, soit en 3D. Certaines cartes sont dites cartes statistiques et montrent des données quantitatives : des codes couleurs vont symboliser une rangée de valeurs.
- Les signes sont une représentation, par exemple d'une photographie d'un objet ou un signe assigné à une instruction.
- Les réseaux illustrent les relations spatiales entre des éléments. Ils décrivent des informations relationnelles telles que les arbres, chemins, nœuds. Les relations entre les différents éléments sont représentées par des lignes ou des flèches.
- Les schémas représentent un processus ou un concept (par exemple la construction d'un meuble ou l'étiquetage des différents types de feuilles dans un contexte botanique).
- Les images donnent une vision pragmatique d'un objet ou d'un endroit. Les représentations de celui-ci sont à l'échelle dans l'image ; il n'y a pas de modification de la représentation. Pour la photo d'un lieu, les distances et les propriétés des éléments qui constituent la photo sont préservées.
- Les tableaux sont présentés sous forme tabulaire et les données sont structurées. Les informations sont généralement présentées avec du texte et des nombres, et ce de manière explicite : il n'y a pas de légende dans un tableau.

Nous avons vu différentes façons de classifier les différents graphiques : suivant les études, un graphique peut ne pas appartenir à la même catégorie. Il n'existe pas de consensus scientifique sur la classification de graphiques. Par ailleurs, tous les graphiques présentés sont visuels et une adaptation est nécessaire pour proposer un contenu accessible aux personnes déficientes visuelles.

2.2 REGLES D'ADAPTATION DES GRAPHIQUES POUR LES PERSONNES DEFICIENTES VISUELLES

Dans cette section, nous allons voir comment passer d'un graphique visuel à un graphique adapté pour les personnes déficientes visuelles. Tout d'abord, le graphique doit être simplifié [33–35] (voir Figure 5). Il doit être composé de formes reconnaissables comme des lignes en relief ou des symboles [35]. Pour un graphique visuel, la palette de choix possibles pour le représenter (couleurs, formes, nombre de lignes, etc.) est immense. En revanche, pour un graphique accessible, elle est largement réduite. Il faut donc éviter tout détail superflu : par exemple dans un dessin, la perspective est facile à comprendre visuellement, mais elle est au contraire très difficile à percevoir et comprendre tactilement [33,35]. Dans la mesure du possible, la perspective doit être évitée afin de rendre le graphique aussi simple que possible.

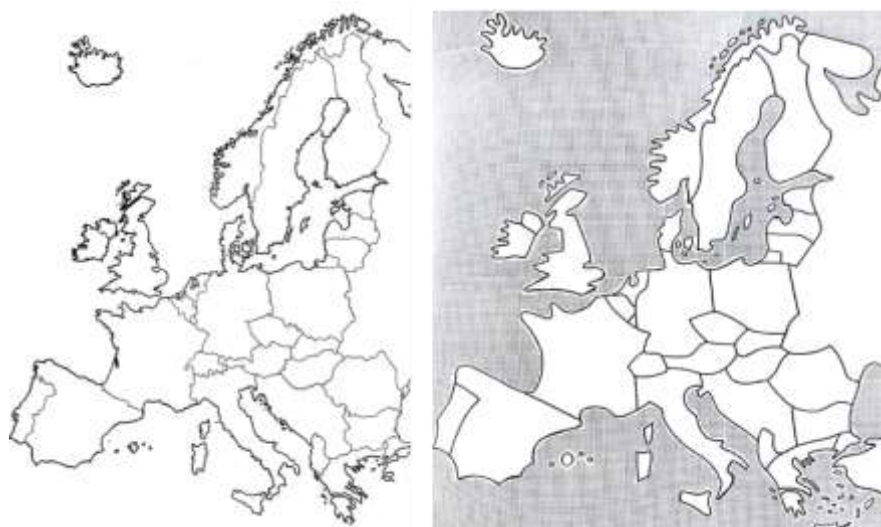


Figure 5. À gauche : **carte de l'Europe** ; à droite : carte de l'Europe adaptée de [35].

Il existe 3 types de composants différents pour l'adaptation d'un graphique : les aires, les lignes et les symboles (voir Figure 6).

- Les aires doivent pouvoir se percevoir tactilement. Elles doivent être délimitées par une ligne continue afin de pouvoir en déterminer la forme. L'intérieur de l'aire peut varier :

des lignes horizontales, verticales ou diagonales, pleines ou continues, etc. Par exemple, la mer est représentée par une texture en pointillé.

- Les lignes peuvent varier de très fines à très épaisses, et peuvent aussi être continues ou discontinues. Une ligne trop courte (inférieure à 0,5 cm) peut être assimilée à un symbole. Afin de pouvoir distinguer les éléments importants et secondaires d'un graphique, la largeur des lignes peut être utilisée : plus une ligne est large, plus l'élément du graphique est important.
- Les symboles peuvent être variables en forme et être soit pleins, soit vides. Néanmoins, le symbole doit rester de taille petite afin d'être distinguable d'un mouvement de doigt. Ces conventions d'adaptation permettent de pouvoir facilement comprendre des graphiques en relief.

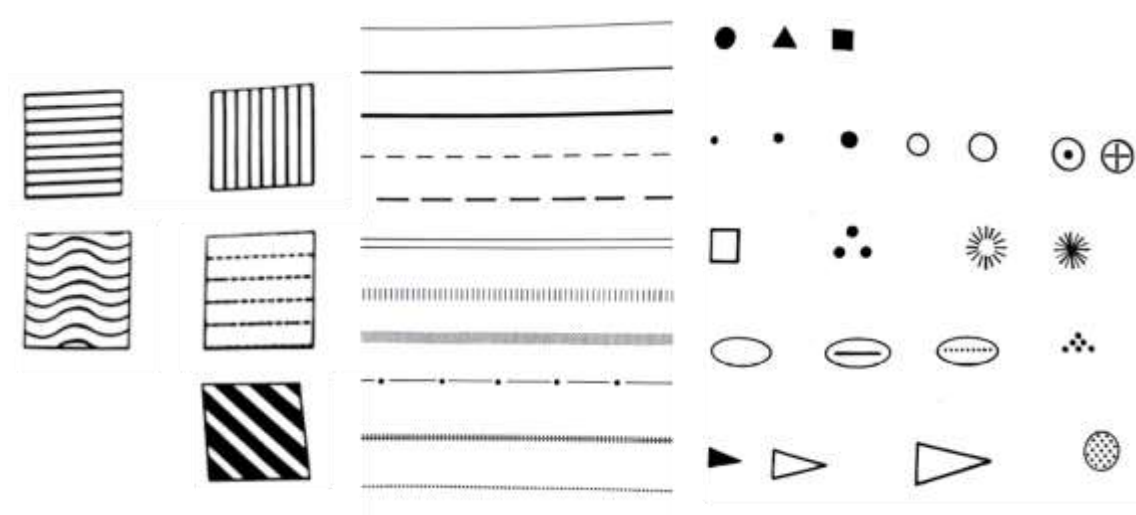


Figure 6. Exemple d'aires, de lignes et de symboles facilement reconnaissables tactilement. Illustration tirée de [35].

Lors de l'adaptation d'un graphique en relief, il faut faire des prétests des adaptations afin d'être sûr que les personnes déficientes visuelles pourront bien différencier les différents aspects du graphique [35].

Enfin, le graphique doit être accompagné d'étiquettes en Braille afin de connaître la signification de tous les éléments du graphique. Le Braille prend beaucoup de place et pour limiter un graphique

trop dense et donc difficilement compréhensible, des abréviations sont utilisées [17]. Le graphique s'accompagne d'une légende en Braille nécessaire à sa compréhension qui est sur une feuille séparée. L'utilisation de Braille peut poser des problèmes, car les personnes déficientes visuelles savent lire de moins en moins le Braille [109].

2.3 PRODUCTION DES GRAPHIQUES TACTILES EN RELIEF

Une fois le graphique adapté, il faut le produire. Il existe plusieurs manières de produire des graphiques en relief.

Le papier thermogonflant, aussi appelé papier Swell, permet de créer des documents en relief. Le document est imprimé sur du papier thermogonflant avec une imprimante classique. Ce papier est recouvert d'une couche chimique composée de microcapsules qui éclatent sous l'action combinée de la chaleur et d'une lumière intense. Ensuite, une fois le document imprimé, il est passé dans un four spécifique (voir Figure 7). Comme les couleurs absorbent différemment la lumière ou la chaleur, les couleurs sombres reflètent peu et absorbent beaucoup. Il en résulte que les éléments imprimés en sombre vont gonfler à la chaleur et sous l'effet de la lumière du four. A la sortie du four, les éléments du document gonflés peuvent être perçus tactilement.

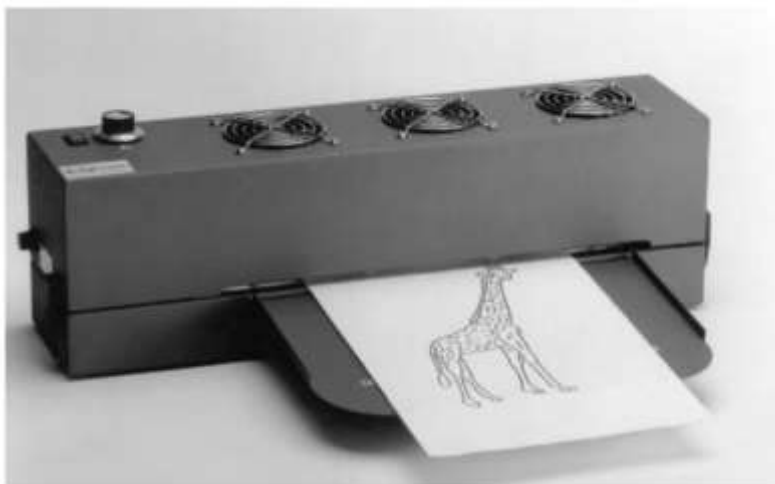


Figure 7. Four permettant de créer des documents thermogonflants.

La deuxième méthode consiste en l'utilisation de feuilles plastiques thermoformées. Une thermoformeuse est requise pour le gaufrage à chaud des feuilles plastiques (voir Figure 8). Cette machine est notamment composée d'une pompe à vide et d'un mini four. Pour reproduire un document avec la thermoformeuse, il faut poser le document à produire (appelé la matrice) sur le plateau et placer une feuille thermoformée par-dessus. La matrice est souvent réalisée de manière artisanale et peut être faite avec différents matériaux. Lors de l'activation de la thermoformeuse, la pompe va faire le vide et ainsi la feuille thermoformée va être plaquée contre la matrice. Ensuite, le four va chauffer et le plastique va ramollir. La feuille en plastique va donc prendre la forme de la matrice reproduisant son relief. Lorsque la feuille plastique va refroidir et elle va garder la forme de la matrice.



Figure 8. À gauche : Une thermoformeuse ; à droite : le document résultant.

Il existe une technique similaire à la précédente appelée l'embossage. La différence principale réside dans l'utilisation de différents matériaux (aluminium, zinc, PVC).

Une autre technique pour la fabrication de document en relief consiste à utiliser différentes textures de tissus pour représenter des éléments du graphique (voir Figure 9). Cette méthode est notamment employée pour des dessins et pour la confection de livre accessible pour enfant. Ces livres sont fragiles et ont une durée de vie assez limitée.



Figure 9. Livre tactile pour enfant, tiré de https://dillusion.files.wordpress.com/2014/03/wp_20130611_011.jpg, le 08/02/2019.

Des graphiques en relief peuvent être créés avec des imprimantes 3D. L'utilisation de telles imprimantes permet d'obtenir différents niveaux de relief. Cette technologie encore récente est assez peu employée par le grand public due aux prix de l'imprimante et aux difficultés d'entretien. Enfin, il est possible de réaliser des graphiques à la volée : ces graphiques peuvent être faits et défaits suivant le besoin des utilisateurs. Nous trouvons ces techniques dans les cours de locomotion notamment (voir Figure 10). Ces graphiques sont réalisés à partir de pions et bandes aimantés sur un tableau magnétique. Par exemple, pour appréhender un nouvel itinéraire, l'élève et l'enseignant peuvent construire très rapidement un schéma d'un quartier. L'élève peut alors parcourir le plan réalisé et apprendre son chemin. L'élève peut ainsi construire seul un graphique (voir [102]).

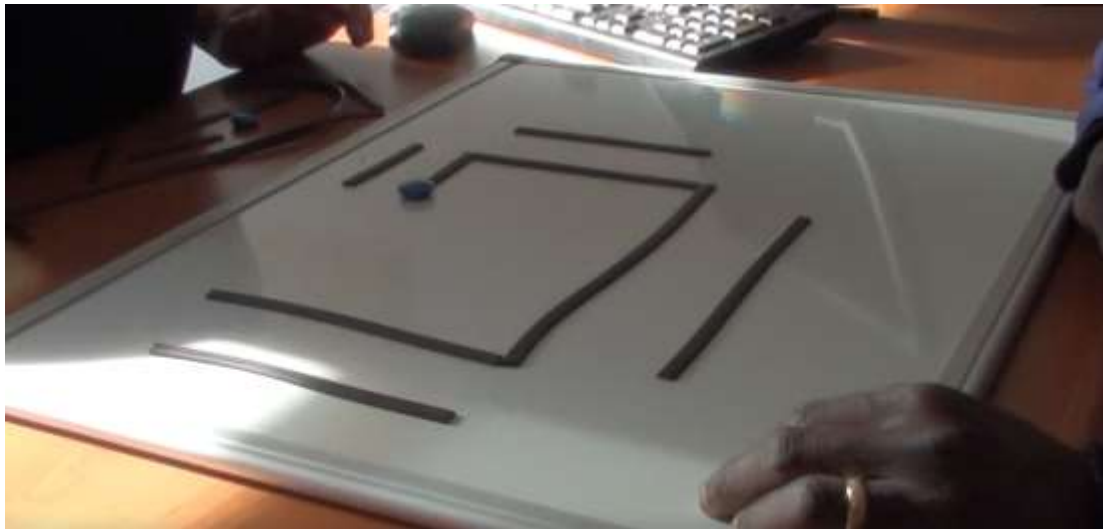


Figure 10. Plan d'un quartier réalisé sur un tableau aimanté lors d'un cours de locomotion à l'IJA.

Une autre possibilité est d'utiliser du papier Dycem. Ces planches à dessiner sont caoutchoutées ou plastifiées et permettent à l'aide d'un stylo, d'une roulette ou d'un poinçon de dessiner le graphique. L'avantage de ces planches réside dans sa rapidité d'utilisation : il est possible de dessiner à main levée. Il est utilisée en classe, notamment comme moyen de secours. En revanche, il est impossible de modifier le document conçu et l'épaisseur du trait est assez faible.

Parmi ces différentes techniques pour produire un graphique accessible, la technique utilisant le papier Swell est la plus répandue [136] grâce à sa simplicité d'utilisation.

2.4 SENS DU TOUCHER

Pour parcourir les graphiques en relief, les personnes déficientes visuelles s'appuient sur le toucher. Pour comprendre ce qui se trouve sous le doigt, plusieurs perceptions entrent en jeu. La perception haptique, qui permet d'appréhender un objet, résulte de la combinaison de la perception cutanée et de la perception kinesthésique. Les mécanorécepteurs et les thermorécepteurs qui se situent sous la peau permettent de comprendre les propriétés de l'objet touché (perception cutanée). La perception kinesthésique donne les informations renvoyées par les muscles, les tendons et les articulations et permet ainsi de comprendre la forme de l'objet [85].

La charge mentale pour comprendre un graphique est importante [41]: les personnes doivent construire une image mentale de la forme observée afin d'avoir une représentation mentale de l'ensemble du graphique [133].

Une étude menée par Loomis [95] a montré que l'exploration d'un graphique en relief avec un seul doigt équivaut à l'exploration visuelle avec un champ de vision très réduit (voir Figure 11).

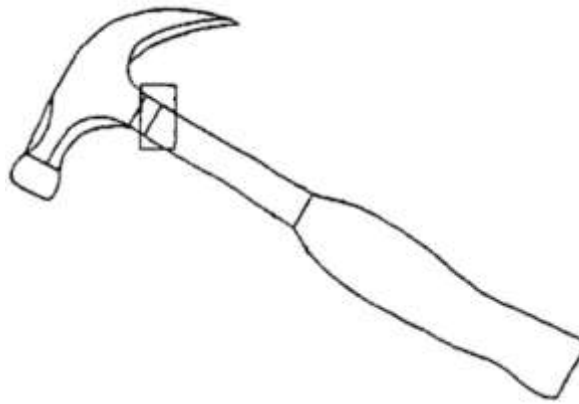


Figure 11. Image d'un marteau avec un champ de vision réduit (correspondant au carré) de [95].

2.5 EXPLORATION HAPTIQUE

Les graphiques en relief sont une reproduction des graphiques visuels (simplifiés et adaptés), mais l'accessibilité de ces graphiques via une exploration tactile interroge [159]. De plus, des recherches ont mis en avant la difficulté d'identifier des graphiques en relief pour des personnes voyantes ou aveugles [56].

2.5.1 DIFFERENCE ENTRE UTILISATEURS

Pour savoir si une expérience visuelle est requise pour la reconnaissance de dessins en relief, deux points de vue ont émergé [78] : une vision dite *optimiste* et une vision dite *pessimiste*. La vision *optimiste* est présentée comme ne nécessitant pas d'expérience visuelle pour identifier des images en relief. Contrairement à la vision *pessimiste*, qui préconise qu'une expérience visuelle aide à la

l'identification. L'exploration haptique ne serait pas adaptée et la charge cognitive élevée lors d'une exploration tactile. Des études comparant l'identification de dessins en relief des personnes voyantes et des personnes déficientes visuelles (précoces et/ou tardives) ont montré des résultats contradictoires : les personnes déficientes visuelles peuvent avoir de meilleurs résultats (voir par exemple [56]) ou de moins bons résultats (voir par exemple [87,160]) que les personnes voyantes. La difficulté de la reconnaissance des dessins en relief varie avec la complexité, la familiarité de l'information [57,58]. Des travaux de recherches ont utilisé des dessins en relief d'objets communs (généralement pris de la base de Snodgrass *et al.* [150]) et ont demandé à leurs utilisateurs de reconnaître ces images ([55,56,58,78,81,87,95,160,161]).

Heller [56] a réalisé une étude avec des personnes aveugles précoces et tardives et avec des personnes voyantes. La tâche consistait à identifier 12 dessins tactiles d'objets communs. Les résultats montraient que les aveugles tardifs ont significativement un meilleur pourcentage de reconnaissance (36 %) que les personnes voyantes (13 %) et que les personnes aveugles précoces (9 %). Lors de l'expérience suivante, avant de réaliser la tâche, les participants avaient connaissance des noms des objets à identifier. Les pourcentages de reconnaissance sont alors plus élevés que précédemment. Les aveugles tardifs ont obtenu le meilleur pourcentage d'identification avec 82 % de réponses correctes, puis les personnes voyantes (60 %) et enfin les aveugles précoces (49 %). Pour les auteurs, les aveugles tardifs ont une expérience visuelle par rapport aux aveugles précoces et une expérience tactile par rapport aux voyants.

Lederman *et al.* [87] présentaient une étude qui consiste à identifier des dessins en relief d'objets du quotidien et des dessins incluant de la perspective pour des personnes voyantes. Une autre étude, similaire à la première, fait intervenir un groupe de participants différents : des aveugles précoces. Les résultats de ces études ont montré un meilleur pourcentage de reconnaissance pour les personnes voyantes que pour les aveugles précoces. Pour les deux groupes, le pourcentage d'identification était meilleur lorsque les dessins n'incluent pas de perspective. Ainsi, pour les

auteurs, les personnes voyantes ont adopté un processus de traduction visuelle pour identifier des dessins en relief.

Thompson *et al.* proposaient [160] une étude avec des personnes voyantes, des personnes aveugles précoces et des personnes aveugles tardives. Les participants devaient identifier des dessins en reliefs, issus du corpus de Snodgrass et Vanderwart [150]. Les résultats ont montré que les personnes voyantes (50 %) ont un meilleur pourcentage de reconnaissance que les aveugles tardifs (44 %) et que les aveugles précoces (13 %).

Des études ont examiné l'exploration tactile des formes et des patterns chez des personnes aveugles et/ou voyantes [7,8,59,84]. Lebaz *et al.* [84] ont comparé l'exploration par des personnes voyantes, des aveugles précoces et des aveugles tardifs. Les participants devaient explorer des formes non figuratives et les comparer deux à deux (voir Figure 12). D'abord, les participants parcouraient la forme avec un seul doigt. Après exploration de la première forme, une pause de 5 secondes est donnée puis la deuxième forme était explorée. Enfin, les participants devaient répondre si les deux formes étaient identiques ou non. Les auteurs ont montré que la reconnaissance des formes tactiles dépend du type de mémoire (spatiale, visuospatiale ou kinesthésique) engagée par les participants pour effectuer la tâche. Les résultats ont montré que les difficultés que rencontrent certaines personnes déficientes visuelles avec des images en relief ne sont pas dues à des difficultés dans le traitement de graphiques tactiles.

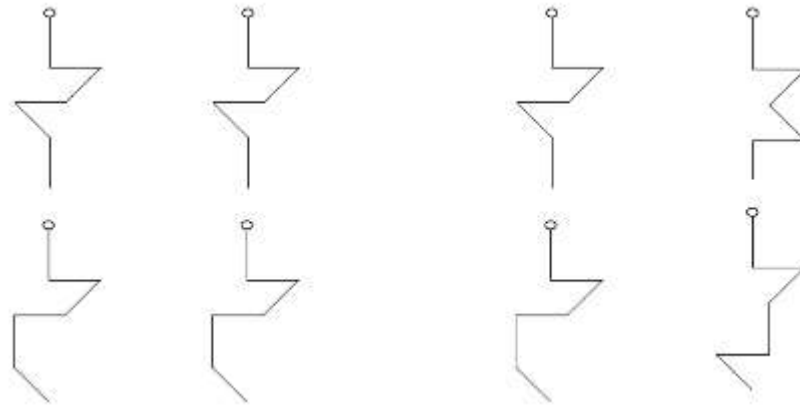


Figure 12. À gauche : formes identiques ; à droite : formes différentes, tirée de [84].

Ces études s'appuient uniquement sur une tâche d'identification d'images ou de formes en relief et donc sur le pourcentage de reconnaissance de ces images. Il faut noter que le pourcentage de reconnaissance ne renseigne pas sur la manière dont les participants explorent les dessins en relief avec leurs mains.

2.5.2 UTILISATION DES DOIGTS ET DES MAINS : STRATEGIES

Les personnes déficientes visuelles s'appuient sur l'exploration haptique afin d'appréhender un objet réel [27,86,191] ou un graphique en relief [81,84,95,105,107,155,182]. Cette étape est primordiale pour reconnaître l'élément exploré.

Les stratégies d'exploration d'objets réels ont montré qu'elles mettent en jeu 8 propriétés [86] appelées procédures d'exploration : *mouvement latéral* (pour la texture de l'objet), *pression* (pour la dureté de l'objet), *contact statique* (pour la température), *prise en main soutenue* (pour le poids de l'objet), *enveloppement* (pour la forme globale de l'objet et le volume), *suivi de contour* (pour l'exakte forme de l'objet), *test des articulations de l'objet* (pour les fonctions spécifiques comme passer la main dans l'objet), et *test partiel* (pour tester des parties spécifiques). Pour les auteurs, ces procédures d'exploration limitent le type et la qualité des informations disponibles et affectent les performances lors des tâches de reconnaissance haptique. Par conséquent, les procédures

d'exploration doivent être sélectionnées en fonction du but spécifique de la tâche demandée [80]. Les utilisateurs ne vont pas employer les mêmes procédures d'exploration si la tâche est de reconnaître l'objet le plus rapidement possible ou si la tâche est de reconnaître une propriété particulière. Dans la première tâche, les utilisateurs vont employer la procédure d'exploration appelée *enveloppement* (qui est une procédure très rapide) et dans la deuxième tâche, la procédure employée est celle de *suivi de contour* (qui est une procédure plus lente) [86]. Les auteurs concluent que la recherche d'informations spécifiques est en relation avec les mouvements de la main sur l'objet.

D'autres études se sont focalisées sur l'exploration de graphiques en relief [81,84,95,155,182]. Symmons *et al.* [155] ont décrit quelques mouvements de la main au cours de l'exploration de graphiques en relief avec des participants voyants avec les yeux bandés. Ils ont montré que, la plupart du temps, les sujets utilisent leur(s) index, seuls ou en combinaison avec d'autres doigts. Seulement 3 participants (sur 11) ont exploré avec un seul doigt (pas forcément l'index). Les participants ont généralement exploré la partie gauche du dessin avec la main gauche et la partie droite avec leur main droite. Enfin, lors de six explorations, les participants ont utilisé une main pour explorer et un doigt de l'autre main était posé sur un endroit du dessin. Bien que les sujets ne soient généralement pas conscients de ce qu'ils ont fait avec leurs mains, les mouvements étaient à la fois intentionnels et systématiques.

Wijntjes *et al.* [182] proposaient une étude dans laquelle les participants sont contraints lors de l'exploration : dans une première partie, seule une main doit être utilisée pour explorer, dans l'autre partie les deux peuvent l'être (cf Figure 13). Les participants doivent reconnaître des dessins du quotidien. Ces dessins ne comportent pas de perspectives. Les auteurs ont montré que lorsque les participants étaient autorisés à explorer avec les deux mains, ils l'ont fait dans plus de 83 % du temps d'exploration, ce qui augmentait significativement l'identification des dessins en relief. Les auteurs ont également répertorié les mouvements des mains dans trois catégories : l'utilisation à

une main (l'autre main se situe en dehors du dessin), l'utilisation des deux mains alternativement (pendant qu'une main explore, l'autre est immobile sur un endroit du dessin), et enfin l'utilisation simultanée des deux mains (les deux mains explorent en même temps).

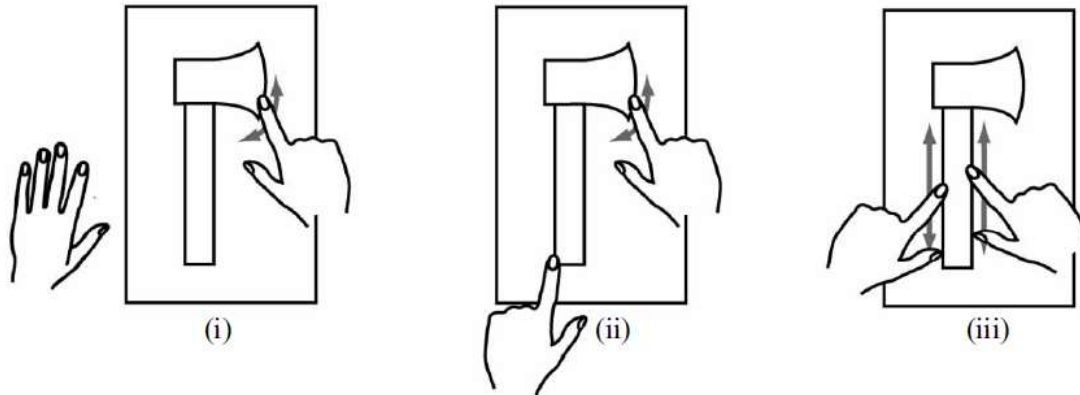


Figure 13. Les trois explorations possibles : (i) à une main (ii) avec deux mains en séquentiel et (iii) avec les deux mains en parallèle de [182].

Heller *et al.* [60] ont évalué l'effet de l'expérience visuelle sur l'illusion haptique de Müller-Lyer. L'illusion de Müller-Lyer (1989) est une illusion formée par des figures géométriques qui donnent lieu à des erreurs d'estimation (de distance, de dimension, d'interprétations, de courbure, de direction). L'expérience a été réalisée avec des personnes voyantes et des personnes aveugles. Les participants devaient explorer les formes avec un seul doigt (l'index droit). Les participants devaient ensuite donner l'estimation de la taille des lignes. Les auteurs ont reporté que les participants aveugles voulaient utiliser plusieurs doigts lors de l'étude. Ils ont déclaré que l'exploration avec un seul doigt n'était pas naturelle. Ils ont fait le parallèle en déclarant que c'était similaire à voir le monde avec un œil pour les personnes voyantes. En revanche, les participants voyants semblent préférer tracer avec l'index lorsqu'ils explorent des formes en relief [155].

L'utilisation de plusieurs mains ou doigts durant une exploration haptique a été identifiée plus efficace comparée à l'exploration avec un seul doigt dans plusieurs études [81,107]. Les personnes déficientes visuelles apprennent à utiliser plusieurs doigts ou mains lors d'une exploration

haptique [111,172,177,178]. L'exploration commence en haut à gauche pour se terminer en bas à droite afin d'avoir un aperçu global du graphique. Les personnes déficientes visuelles doivent identifier les différents éléments qui composent le graphique (comme les différents symboles utilisés) et lire le Braille associé.

2.5.3 STRATEGIES D'EXPLORATIONS

Nous définissons le terme de stratégie d'exploration par l'ensemble des actions faites par une personne pour accomplir une tâche spécifique [62]. Nous allons d'abord présenter les travaux réalisés sur la locomotion. Ces études se consacrent spécifiquement au parcours et la découverte d'un lieu et de ses objets. Ensuite, des études ont regardé s'il existe des similitudes entre les processus utilisés lors de la locomotion sans vision et l'exploration haptique [79,88]. Ces études ont mis en avant des comportements comparables entre les mouvements effectués par la main et le déplacement entier du corps. Les processus lors de la locomotion et de l'exploration haptique sont semblables.

Tout d'abord, des travaux ont permis d'identifier plusieurs stratégies d'exploration au cours de tâches de locomotion sans vision [38,61,62,156]. La tâche demandée aux participants de ces études était de parcourir un lieu physiquement. Dans la pièce étaient disposés différents objets. Les participants devaient parcourir la pièce et découvrir ces objets et comprendre leur position les uns par rapport aux autres. Hill *et al.* ont découvert deux stratégies utilisées par les participants lors de l'exploration d'une pièce [61] :

- La stratégie *périmètre* : elle vise à appréhender la forme et la taille de la pièce sans se préoccuper du contenu.
- La stratégie *grille* : elle vise à quadriller la pièce (en balayant de manière horizontale ou verticale) en la parcourant d'un bout à l'autre.

Des études [38,39,62,156] référencent les six stratégies principalement utilisées pour mettre en relation des objets lors de la locomotion : *point-de-référence*, *origine-à-objet*, *périmètre-à-objet*, *objet-à-objet*, *allers-retours* et *cyclique*.

- La stratégie *point-de-référence* consiste à prendre un objet comme base et explorer les autres en effectuant des retours permanents à cet objet de base (par exemple : A – B – A – C – A – D – A).
- La stratégie *origine-à-objet* ressemble à celle précédente. Le point de base de l'utilisateur est en revanche le point de départ de l'exploration.
- La stratégie *périmètre-à-objet* compare les objets par rapport aux limites de la pièce.
- La stratégie *objet-à-objet* met en relation tous les objets entre eux.
- La stratégie *allers-retours* consiste à des va-et-vient entre deux objets spécifiques.
- La stratégie *cyclique* effectue un tour des objets, les uns après les autres (par exemple A – B – C – D – A).

Plus récemment, des études se sont penchées sur les explorations haptiques réalisées sur des systèmes interactifs, c'est-à-dire l'exploration de graphiques numériques (ces graphiques ne comportent aucun relief) [51,148].

Simonet *et al.* [148] ont demandé à des personnes aveugles d'explorer une carte maritime. Cette carte était composée de six objets. Les utilisateurs parcouraient cette carte à l'aide d'une souris avec retour de force (Phantom Omni). Lorsque le curseur se trouvait sur un objet, le nom de celui-ci était lu. Les participants devaient trouver ses objets et ensuite les mettre en relation. Les résultats ont montré cinq stratégies utilisées : *périmètre*, *grille*, *allers-retours*, *cyclique* et *point-de-référence*.

- La stratégie *périmètre* correspond aux déplacements du curseur le long des limites de l'espace de travail.

- La stratégie *grille* consiste en des déplacements du curseur en lignes droites horizontales parallèles d'un bout à l'autre de la surface suivis de déplacements en lignes droites verticales parallèles (ou inversement).
- La stratégie *allers-retours* consiste en des mouvements entre deux points d'intérêt (A – B–A).
- La stratégie *cyclique* consiste à passer par différents points d'intérêts avant de revenir au point d'intérêt de départ (A – B – C – A).
- La stratégie *point-de-référence* correspond à un ensemble d'*allers-retours* à partir d'un point de référence. Il correspond à des motifs en forme d'étoile (A – B – A – C – A – D – A).

L'étude a montré que la stratégie *point-de-référence* a été la plus utilisée (25 % des cas). Pour les auteurs, cette stratégie était la plus efficace pour comprendre la position des objets les uns par rapport aux autres.

Guerreiro *et al.* [51] ont analysé les stratégies d'exploration bimanuelle (un doigt de chaque main) des participants. L'étude a été réalisée sur une grande surface tactile. Le graphique numérique à explorer était composé de différents points placés de manière aléatoire. Les participants exploraient le graphique avec leurs mains (ils doivent parcourir la surface avec leurs index) et recevaient un retour audio lorsqu'ils se trouvent sur un point spécifique. Le graphique était composé de points d'intérêt disposés au hasard. Les participants avaient quatre tâches spécifiques à réaliser : localiser, relocaliser, compter et comparer des points d'intérêt du graphique. Les résultats ont montré six stratégies utilisées par les participants pour effectuer les tâches demandées : *parcours linéaire*, *concentré*, *point-à-point*, *forme libre*, *forme libre symétrique* et *mouvement des doigts*.

- La stratégie *parcours linéaire* consiste à partir dans un coin de la surface et faire glisser le doigt horizontalement jusqu'au bord et repartir dans la direction opposée un peu plus

bas. L'utilisateur répète cette action jusqu'à atteindre la fin de la surface d'exploration (voir Figure 14).

- La stratégie *concentrée* consiste en une recherche intensive non structurée d'une petite partie de la surface dans laquelle l'utilisateur cherche un point d'intérêt.
- La stratégie *point-à-point* correspond au déplacement du doigt vers un point spécifique de la surface. L'utilisateur a une connaissance préalable de la position des points d'intérêt et se déplace directement vers un de ces points.
- La stratégie *forme libre* correspond à une absence de stratégie, où les mouvements des participants semblaient être imprévisibles et sans motif discernable.
- La stratégie *forme libre symétrique* correspond à la stratégie précédente, mais avec un mouvement des deux mains symétriques.
- La stratégie *mouvement des doigts* consiste à une variation de la stratégie *forme libre*, mais avec un mouvement des mains l'une après l'autre. Les mains n'explorent pas de manière simultanée, mais de manière séquentielle.

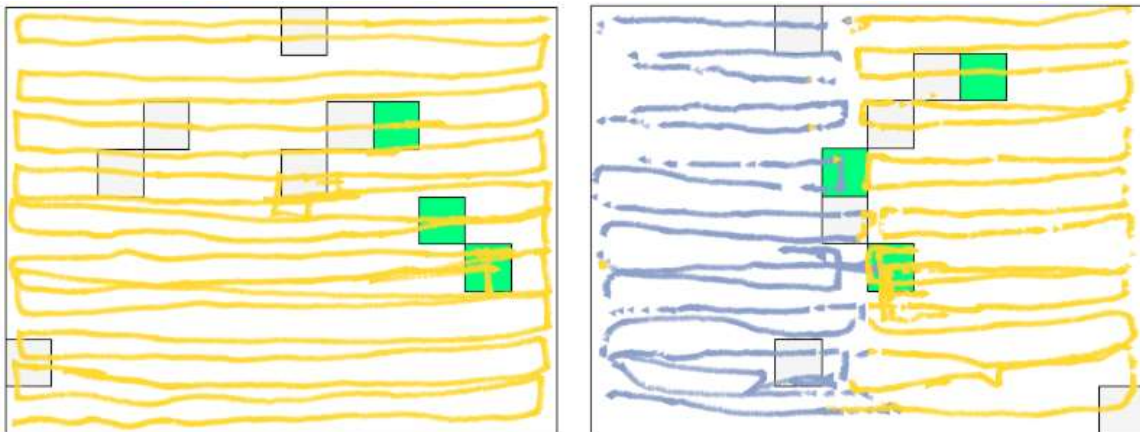


Figure 14. Deux exemples de la stratégie *parcours linéaire* avec une ou deux mains, tirés de [51].

Lorsque les participants explorent des graphiques, deux mécanismes entrent en jeu : une phase de découverte puis une phase de mémorisation [148]. Chacune de ces phases font intervenir des stratégies d'exploration différentes. Les participants explorent d'abord entièrement le graphique

avec l'utilisation de la stratégie *périmètre* ou *grille*. Ces stratégies permettent d'avoir un aperçu global du graphique. Ensuite, les participants vont chercher et mettre en relation des éléments spécifiques du graphique. C'est la phase dite de mémorisation. Elle permet de comprendre en détail le graphique et de connaître la position des éléments qui le composent. L'utilisation de stratégies comme *allers-retours*, *cyclique* et *point-de-référence* est alors observée. Ces stratégies sont spécifiques pour mettre en relation des éléments entre eux.

2.6 CONCLUSION SUR LES GRAPHIQUES EN RELIEF

Dans cette partie, nous avons vu les différents graphiques qui existent pour transmettre de l'information visuelle. Suivant le besoin et la quantité d'information, certaines représentations vont être privilégiées (par exemple, un dessin sera plus direct à comprendre qu'un texte donnant sa description). Nous avons vu les étapes nécessaires pour transposer les éléments visuels d'un graphique en éléments accessibles aux personnes déficientes visuelles (simplification du graphique et retranscription du graphique avec l'utilisation d'aires, de lignes et de symboles discriminants). Une fois le graphique retranscrit, nous avons vu les différents moyens de production. Suivant les techniques employées, le graphique une fois produit ne peut pas être modifié dans le temps (à l'exception des techniques ah doc avec l'utilisation d'aimants, mais ces graphiques fournissent très peu d'information). Tous ces graphiques sont associés à une légende en Braille qui se situe sur une feuille séparée. Le processus d'adaptation et de fabrication des graphiques en relief est très lourd. Les graphiques en relief sont très peu utilisés après l'école dû à leur faible offre disponible sur le marché [172].

Enfin, nous avons analysé comment les personnes déficientes visuelles explorent ces graphiques en relief. De nombreux travaux ont observé les stratégies d'exploration ainsi que l'utilisation des mains pendant une exploration. Il en résulte que les personnes déficientes visuelles préfèrent explorer avec plusieurs doigts et sont plus efficaces lors d'une exploration haptique qu'avec

l'utilisation d'un seul doigt. Les stratégies d'explorations des utilisateurs dépendent de la tâche demandée (phase de découverte ou phase de mémorisation).

Afin de proposer un contenu adaptable pour éviter l'obsolescence des graphiques en relief (les graphiques peuvent être rapidement périmés [17,185]), les travaux de recherches ont évalué l'accessibilité des graphiques numériques. L'utilisation de graphiques numériques présente l'avantage de proposer du contenu modifiable très rapidement. De plus, ces graphiques numériques permettent de remplacer les légendes en Braille, lourdes et encombrant sur du papier, par un retour auditif ou tactile par exemple.

3 INTERACTION EN ENTREE : GRAPHIQUES NUMERIQUES

Comme indiqué dans le chapitre 1 les graphiques en relief présentent plusieurs limitations (la mise à jour des données d'un graphique engendre la réimpression du document). Une solution consiste alors à utiliser des graphiques numériques (le graphique et/ou les données peuvent être changés à la volée). Mais des interactions non visuelles adaptées sont nécessaires pour explorer ces graphiques numériques. Dans cette section, nous décrivons les différentes méthodes pour rendre les graphiques numériques accessibles aux personnes déficientes visuelles.

Ducasse *et al.* [30] ont distingué deux grandes catégories de graphiques numériques : les graphiques interactifs hybrides, qui combinent un affichage physique et numérique (par exemple un graphique en relief posé sur un écran tactile [18]) et les graphiques interactifs purement numériques, qui n'incluent aucun élément physique (tous les retours sont interactifs dans les modalités auditives et/ou tactiles).

3.1 GRAPHIQUES INTERACTIFS HYBRIDES

Nous présenterons les différents types de graphiques interactifs hybrides. Selon Ducasse, ils existent trois sous-catégories : les graphiques physiques interactifs, les graphiques tangibles et les graphiques dynamiques.

3.1.1 GRAPHIQUES PHYSIQUES INTERACTIFS

Les graphiques physiques interactifs sont composés d'un graphique physique (par exemple, un graphique en relief ou imprimé en 3D) avec un système interactif (par exemple une tablette). L'utilisateur va explorer le graphique avec ses mains et le système va lui donner les retours correspondants.

3.1.1.1 GRAPHIQUES EN RELIEF

Une première solution est l'utilisation des graphiques en relief sur un écran tactile. Cette méthode permet d'avoir le graphique en relief sans la légende Braille associée (voir section 2.2) : c'est le système interactif qui va donner les informations du graphique via une synthèse vocale. Ainsi, pour un même graphique, les informations peuvent varier. Par exemple, le graphique en relief peut représenter la carte de l'Europe et le système peut donner les informations relatives au pays de manières différentes (soit le nom du pays, soit la capitale du pays). Cette solution s'appuie sur un outil familier (le graphique physique) pour les personnes déficientes visuelles [167].

Basés sur cette idée, de nombreux prototypes ont été conçus [3,16,18,20,37,116,143,175,176,179]. Suivant les prototypes, le retour diffère : un son [179] ou une voix de synthèse [16,20] peuvent être utilisés. Les utilisateurs doivent double-cliquer sur les zones identifiées du graphique physique afin de recevoir des informations audio telles que le nom et la description des points d'intérêt (bâtiments, parcs, rues, etc.) comme sur la Figure 15. Un tel dispositif améliore l'accessibilité du graphique, car il augmente l'expérience utilisateur [18]. En outre, il fournit à l'utilisateur de

nombreuses couches d'informations en plus du nom et de la description des points d'intérêt (comme les horaires des transports en commun). Brule *et al.* [20] ont proposé une extension de ces prototypes en incluant un menu pour le choix des informations à donner, et des objets conducteurs (c'est-à-dire que les objets seront détectés par l'écran tactile lorsque l'utilisateur les touche).



Figure 15. Utilisateur explorant une carte en relief sur un écran tactile, tiré de [18].

Weir *et al.* [179] ont proposé un prototype pour accéder aux données météorologiques de la carte des États-Unis via des sons. Suivant la hauteur du son, les utilisateurs peuvent accéder rapidement aux données. Ce prototype utilise iSonic [193] qui est une application qui se base sur la hauteur du son (utilisation de différentes tonalités) pour donner des informations sur les populations dans des régions géographiques. Les auteurs ont comparé les graphiques physiques interactifs à une technique de graphiques interactifs numériques (basé sur un clavier). Les résultats ont montré que les participants déficients visuels préfèrent les graphiques physiques interactifs.

3.1.1.2 GRAPHIQUES IMPRIMES EN 3D

Récemment, des prototypes ont été conçus avec des graphiques imprimés à l'aide d'imprimantes 3D [42,47,48,63,76,144,151]. Ainsi, ces graphiques peuvent avoir autant de niveaux de relief que souhaité : par exemple, une carte des États-Unis avec différents points d'intérêts (voir Figure 16).



Figure 16. Carte imprimée en 3D avec différents niveaux de relief, tiré de [76].

Dans un premier prototype, Gotzelmann *et al.* [48] ont proposé d'automatiser la production de cartes 3D afin que les personnes déficientes visuelles puissent les réaliser seules. Ensuite, elles peuvent parcourir la carte d'une main. L'autre main sert à tenir un smartphone au-dessus de la carte afin de suivre la position des doigts sur la carte. C'est le smartphone qui donne les retours audio. Ensuite, Gotzelmann [47] a conçu une amélioration du prototype précédent. Cette fois-ci, la carte est directement posée sur un smartphone ou une tablette afin d'obtenir un retour audio.

L'intérêt pour l'impression 3D est grand, notamment dans le domaine de l'apprentissage scolaire. Les imprimantes 3D sont de plus en plus performantes [21,43], et donnent la possibilité d'obtenir directement un objet conducteur, et ainsi d'être détecté par un écran tactile. En effet, lorsque l'utilisateur touche un objet conducteur posé sur un écran tactile, cet objet va déclencher un appui pour l'écran tactile [117].

Cependant, tous les dispositifs présentés ici reposent sur un graphique physique (par exemple une carte imprimée avec du papier Swell ou imprimé en 3D). Il faut donc disposer physiquement du

graphique pour l'explorer ce qui peut s'avérer encombrant. Le problème de l'adaptabilité du graphique n'est pas résolu. Il faut imprimer de nouveau le graphique à chaque changement.

3.1.2 GRAPHIQUES TANGIBLES

Les graphiques tangibles sont composés d'objets physiques et d'un système interactif [165]. Les objets physiques permettent à l'utilisateur d'interagir avec le système. Des travaux de recherche se sont basés sur des graphiques tangibles [31,71,97,103,140,166]. McGookin *et al.* [103] ont conçu un dispositif permettant aux utilisateurs déficients visuels d'accéder aux graphes mathématiques avec des objets physiques (appelé *phicons*). Ainsi, les objets physiques représentent des points du graphe (voir Figure 17, gauche). En touchant les *phicons* dans des cellules prédéfinies d'une grille matérielle, l'utilisateur peut explorer des graphes mathématiques comme des courbes ou des histogrammes. Toutefois, le système n'a pas été conçu pour explorer une représentation spatiale plus complexe comportant plusieurs points d'intérêt ne correspondant pas aux cellules prédéfinies. De plus, les auteurs ont observé que les objets étaient régulièrement renversés au cours de l'exploration. Ils donnent ainsi des recommandations à appliquer pour l'utilisation des *phicons* concernant le poids, leurs formes et leurs fonctionnalités.

Puis, Ducasse *et al.* [31] ont proposé un nouveau type de *phicons* plus stables et plus polyvalents pour construire des cartes, appelés *Tangible Reels* (voir Figure 17, droite). Ces *phicons* sont des ventouses qui représentent des points d'intérêt avec des bobines qui représentent des liens entre des ventouses. Ainsi, une fois le *phicon* posé, il est stable et ne bouge pas lors de l'exploration. Ils sont particulièrement adaptés pour représenter des connexions entre des stations de métro ou des segments de formes géométriques, par exemple. Cet appareil permet aux utilisateurs déficients visuels de créer des cartes de manière dynamique : des instructions permettent à un utilisateur de placer les *phicons* sur la carte. Aussi, ils peuvent explorer des cartes existantes et récupérer des informations spécifiques relatives aux points et aux liens. Chaque *phicon* peut être placé n'importe

où sur l'écran et être lié à tout autre *phicon*. Par conséquent, cette approche a dépassé la limitation des cartes en lignes surélevées (c'est-à-dire statiques) et des cartes tangibles basées sur un nombre limité de positions (voir par exemple [16]).

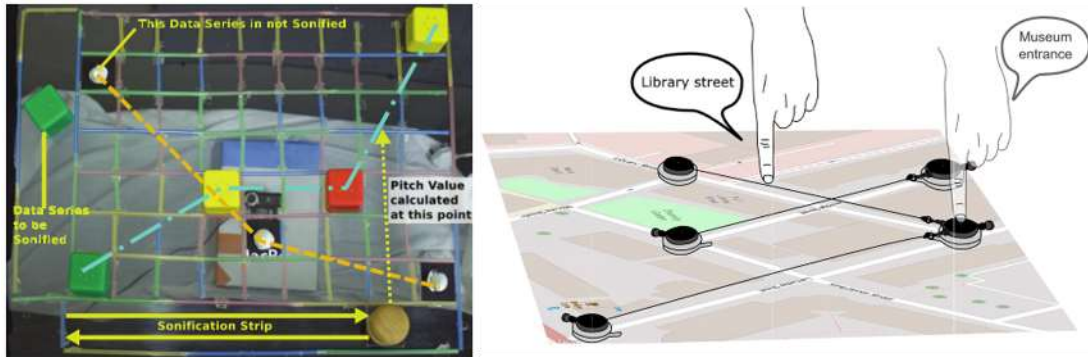


Figure 17. À gauche : un graphe avec des *phicons* de [103] ; à droite : des *phicons* reliés entre eux de [31].

Kane *et al.* ont proposé [74] un autre type d'objet tangible pouvant rendre accessibles les écrans tactiles appelé *Touchplates*. Ce sont des guides physiques qui sont posés sur un écran tactile et reconnus par l'application. Ainsi, les auteurs proposent différents *Touchplates* comme des claviers, des cartes, des menus. L'utilisateur pose l'objet de son choix sur l'écran tactile et peut interagir avec le système (par exemple, taper du texte à l'aide de l'objet clavier).

Plus récemment, un nouveau type de phicon a été utilisé : ce sont les robots de petite taille. Les robots peuvent être soit conçus par des unités de recherches [45,112] soit être disponibles dans le commerce [194,195]. Les robots présentent l'avantage de pouvoir se déplacer en fonction de la tâche demandée. Par exemple, le robot commercial, appelé Ozobot, est très petit (2,5 cm de hauteur) et est conçu pour suivre des lignes de couleurs grâce à des capteurs placés sous le robot. Différentes utilisations de ce robot sont proposées : changement de position d'un point d'intérêt dans une carte géographique [32], ou suivi de position d'un objet au cours du temps [52].

Ducasse *et al.* [32] ont permis aux utilisateurs de pouvoir accéder aux fonctions de *pan* et *zoom* sur une carte. Ainsi, les robots représentent des villes sur la carte et à chaque modification de l'échelle de la carte, les robots se repositionnent. Une autre possibilité est de rendre une vidéo accessible

[52] (voir Figure 18). Dans ce cas, les robots vont représenter des objets ou des personnes dans la vidéo. Ainsi, l'utilisateur peut suivre le mouvement des robots et comprendre la configuration de la scène. Dans un premier temps, une personne voyante doit annoter une vidéo à l'aide d'une application. Les annotations peuvent être de plusieurs types : définir la position d'objets ou de personnes dans la vidéo et ajouter une description de la scène. Ensuite, les personnes déficientes visuelles peuvent suivre la vidéo. Les applications sont diverses : suivre le mouvement des planètes dans le système solaire ou le mouvement d'une balle dans un contexte sportif.

Une limitation de l'utilisation des robots est que les utilisateurs peuvent facilement les déplacer involontairement. Une solution possible est de combiner l'utilisation du robot à un dispositif de suivi (les robots sont détectés par une caméra par exemple [32]), de façon à les programmer pour revenir à leur position initiale.

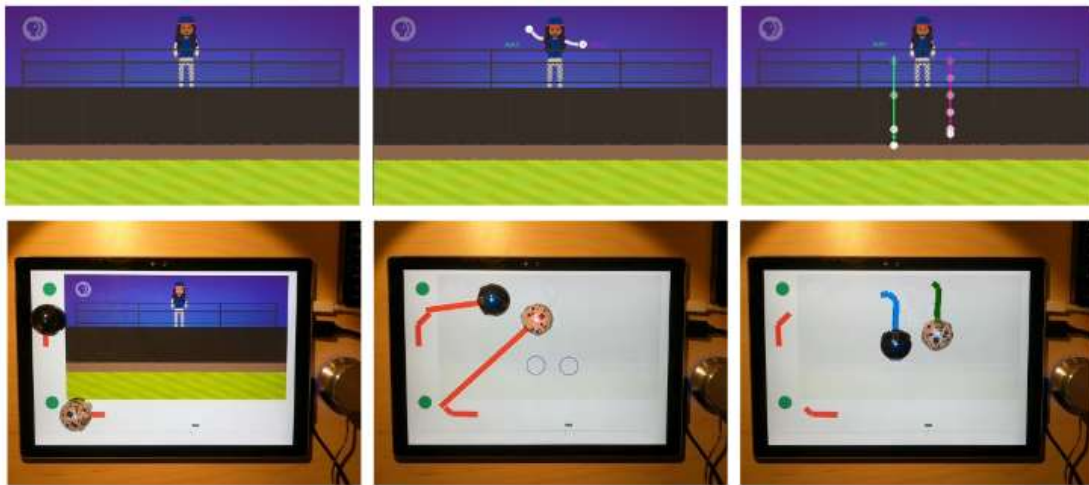


Figure 18. Mouvement des balles représentées par des robots de [52].

Au-delà de cette limitation, les graphiques tangibles présentent des inconvénients majeurs. Premièrement, le nombre de *phicons* pouvant être utilisés simultanément est limité, car ils peuvent être encombrants et la surface de travail est en général réduite. De plus, la présence de nombreux *phicons* (12 étant un nombre important) tend à ralentir le processus d'exploration de la main [31].

3.1.3 GRAPHIQUES DYNAMIQUES

L'utilisation d'afficheurs dynamiques présente l'avantage d'ajouter un relief dynamique, qui peut être combiné à des interactions en sortie. Le contenu de ces écrans peut être modifié à la volée. Ces écrans sont composés de petits picots qui peuvent monter ou descendre. Ainsi, le nombre de picots présent sur l'écran définit sa précision. L'utilisateur peut parcourir l'écran et ressentir les niveaux des picots pour comprendre ce qui est affiché sur l'écran. De tels écrans existent dans le commerce, comme HyperBraille (voir Figure 19) ou APH Graphiti, mais coûtent extrêmement cher (plusieurs dizaines de milliers d'euros pour une résolution de 60x60 picots).

Quelques travaux de recherche proposent des systèmes basés sur ces écrans [14,66,170,187,188]. Weng *et al.* [187] proposent un prototype pour explorer des cartes pour des utilisateurs non-voyants. Les utilisateurs peuvent faire des interactions de *pan* et *zoom* sur la carte.



Figure 19. Ecran BrailleDis 9000 avec la carte des États-Unis et ses états de [187].

Des équipes de recherche ont développé leurs propres écrans dynamiques. Par exemple, Velázquez *et al.* [169] ont proposé un prototype d'une résolution de 8x8 picots. Ce prototype est léger et facilement transportable et permet de représenter des formes simples [168]. De plus, BlindPad [12] est une petite tablette (inférieure à 15 cm de longueur) qui peut avoir une résolution de 32x24 picots. Elle permet d'afficher des graphes mathématiques par exemple. Une limitation des écrans

dynamiques est leurs coûts très élevés qui ne permettent pas une utilisation grand public. De plus, ces écrans ont dans la majorité des cas une faible résolution.

3.2 GRAPHIQUES NUMERIQUES INTERACTIFS

La deuxième approche pour explorer des graphiques numériques repose uniquement sur des systèmes numériques. Nous distinguons deux types d'exploration de graphiques interactifs numériques : une exploration indirecte et une exploration directe. Une exploration est dite indirecte si l'utilisateur explore le graphique au moyen d'un artefact électronique (par exemple avec un clavier ou avec une souris à retour de force). Une exploration est dite directe si l'utilisateur explore le graphique avec son doigt. Le doigt de l'utilisateur est ainsi le point de contact qui sera détecté par le système.

3.2.1 EXPLORATION INDIRECTE

Dans cette section, nous allons décrire les dispositifs utilisés pour une exploration indirecte. Les utilisateurs n'explorent pas directement le graphique, mais au travers d'un artefact électronique. Il faut noter que l'espace d'interaction (le clavier ou la souris à retour de force) et l'espace du graphique ne sont pas les mêmes. C'est-à-dire que lorsque l'utilisateur va utiliser son clavier pour déplacer le curseur sur le graphique numérique, il ne connaît pas la distance de déplacement de ce curseur. Ces deux espaces sont différents et les utilisateurs peuvent avoir des difficultés cognitives pour appréhender ces espaces.

3.2.1.1 CLAVIER OU JOYSTICK

L'utilisation du clavier se retrouve dans de nombreuses études [6,28,115,190]. En utilisant le clavier, les utilisateurs déficients visuels peuvent naviguer séquentiellement dans les régions d'une carte [115]. Les touches permettent de passer d'une région à l'autre.

Une autre possibilité consiste à diviser la carte en fonction d'une grille [190], généralement constituée de 3 cellules sur 3. Les utilisateurs peuvent cibler une cellule à l'aide du pavé numérique pour obtenir rapidement les informations relatives à cette cellule. La cellule peut être de nouveau découpée en grille. Ce système se base sur iSonic [193]. Zhao *et al.* [189] ont proposé une étude pour comparer des données présentées sur une carte. Ils ont pris la carte des États-Unis et leurs états. Plusieurs types de données étaient proposés pour chaque état. Les auteurs ont comparé l'utilisation d'un tableur (type Excel) pour parcourir toutes les données des états, avec l'utilisation de la carte numérique (voir Figure 20). Les utilisateurs pouvaient naviguer entre les états à l'aide du clavier. Ainsi, ils avaient les informations relatives à cet état. Les utilisateurs devaient comparer les données de différents états et dégager des « tendances géographiques ». Les participants ont réussi à comprendre la disposition de la carte numérique avec les données associées et ont préféré utiliser directement la carte numérique qu'utiliser un tableur. Les auteurs ont donné des recommandations de conception dans le cas d'utilisation de retour basé sur le son : les utilisateurs doivent pouvoir choisir leur mode de vue (soit une vue séquentielle tableur, soit une vue de la carte) ; un seul niveau de retour sonore n'est pas suffisant, les interfaces doivent donc proposer plusieurs niveaux d'informations sonores.

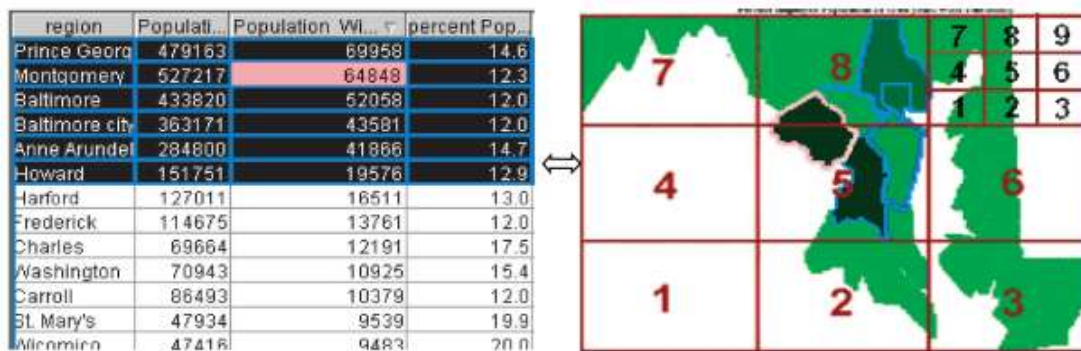


Figure 20. À gauche : navigation dans un tableur ; à droite : navigation dans une grille, tirée de [190].

Delogu *et al.* [28] ont proposé une étude pour comparer l'utilisation du clavier à une tablette. Les participants ont effectué des tâches de difficultés progressives. L'exploration basée sur le clavier,

étant strictement symbolique et discrète, nécessite davantage d'efforts cognitifs pour reconstruire la mise en page explorée [28]. L'utilisation de la tablette est préférée, car elle offre une expérience plus ludique que le clavier.

Des travaux de recherche ont utilisé des joysticks pour l'exploration de graphiques numériques [118]. L'utilisation de la plupart des joysticks ne diffère pas de celle du clavier, car il ne donne pas d'autre retour [30].

3.2.1.2 DISPOSITIF HAPTIQUE

Une autre possibilité est l'utilisation d'un dispositif haptique comme la souris à retour de force [22,67,83,115,124,148,162]. Nous pouvons trouver également des dispositifs haptiques qui peuvent naviguer dans les trois dimensions (comme la Geomagic Touch ou la Novint Falcon – voir Figure 21 – gauche et milieu). L'utilisateur ressent une force en touchant l'extrémité de ces dispositifs.



Figure 21. À gauche : Geomagic Touch X ; au milieu : Novint Falcon ; à droite : VTPlayer.

Il existe un autre type de dispositif haptique : c'est le cas des souris avec un retour cutané. Ces souris sont composées d'un ensemble de picots réparties sous formes de deux matrices de 4 x 4 picots (par exemple, le VTPlayer de VirTouch, Figure 21 – droite). Les picots sont situés sous l'index et le majeur et sont actionnés en fonction de l'emplacement du curseur. Plusieurs travaux de recherche ont utilisé cette souris [67,99,122,123,125,126,131]. Jansson *et al.* [68] ont utilisé la souris pour comprendre des textures au sein d'une carte géographique. 60 participants ayant les

yeux bandés ont comparé différentes représentations cartographiques (avec ou sans texture sur la carte). Pour les auteurs, une souris avec un retour cutané peut être une aide utile pour la lecture non visuelle de cartes numériques mais le logiciel doit être optimisé pour le toucher. Pietrzak *et al.* [123] ont proposé une nouvelle méthode pour explorer des formes. Les formes à explorer sont découpées en segments afin de guider l'utilisateur à la parcourir entièrement. Deux conditions sont testées : exploration unimanuelle (l'utilisateur a sa main dominante sur la souris) et exploration bimanuelle (l'utilisateur explore avec sa main dominante sur une tablette et avec l'autre main est posée sur la souris qui ne bouge pas). Comme les personnes aveugles peuvent avoir des problèmes lors de l'utilisation de la souris [69], l'exploration bimanuelle permet de contourner ce problème car ils explorent directement sur la tablette. Les résultats ont montré que les formes sont identifiées dans les deux conditions. Les auteurs recommandent l'utilisation bimanuelle afin d'explorer les formes avec une tablette plutôt qu'avec la souris avec retour cutané.

L'exploration basée sur des dispositifs haptiques génère des problèmes cognitifs. Il existe des différences entre les distances perçues et les distances réelles [70]. Cela génère un décalage spatial et éventuellement une désorientation lorsque le dispositif est utilisé sans vision [122,134].

3.2.2 EXPLORATION DIRECTE

Dans cette partie, nous nous penchons sur les dispositifs qui permettent d'explorer directement un graphique numérique. Dans ce cas, l'utilisateur parcourt le graphique numérique avec ses mains. Un ou plusieurs points de contact peuvent donc être utilisés sur le graphique.

3.2.2.1 AVEC UNE PETITE SURFACE

Certaines études ont porté sur l'exploration de graphiques numériques, notamment l'exploration de cartes, sur un smartphone [101,127,154] ou une tablette [46,72,146].

Tout d'abord, certaines études ont porté sur les gestes qu'il est possible d'effectuer sur un smartphone [73,77,101]. Les travaux de recherche se basent souvent sur l'exploration de cartes. Poppinga *et al.* [127] ont proposé un prototype afin d'explorer une carte sur smartphone doté de sorties tactiles et audio. Ils se basent sur les éléments importants d'une carte : les routes et les points d'intérêt. L'utilisateur peut suivre une route. Le smartphone annonce le nom de la rue en permanence. Lorsqu'il n'est plus positionné sur la route, les deux retours s'arrêtent. Cependant, le système ne prévient pas l'utilisateur des routes adjacentes lors d'un croisement par exemple. Dans cette étude, les participants perçoivent correctement les informations spatiales de base (comme la configuration des routes), mais la tâche est très fatigante sur le plan cognitif.

Plus récemment, Goncu *et al.* [46] ont utilisé une tablette, plutôt qu'un smartphone, pour parcourir un plan. À partir d'un plan disponible sur internet, le système simplifie le dessin et montre les pièces, les murs, les portes et fenêtres du plan. Chaque élément du plan est associé avec une description vocale (voir Figure 22). Les résultats ont montré que cette approche peut fournir un aperçu précis de la disposition des pièces dans un plan et que cette présentation peut être utilisée par des personnes déficientes visuelles pour comprendre la disposition d'un lieu. Les auteurs ont observé que les tablettes étaient utilisables, mais reposaient toujours sur des ressources cognitives importantes lors de l'exploration. Une exploration tactile est un processus lent, séquentiel [32,95].

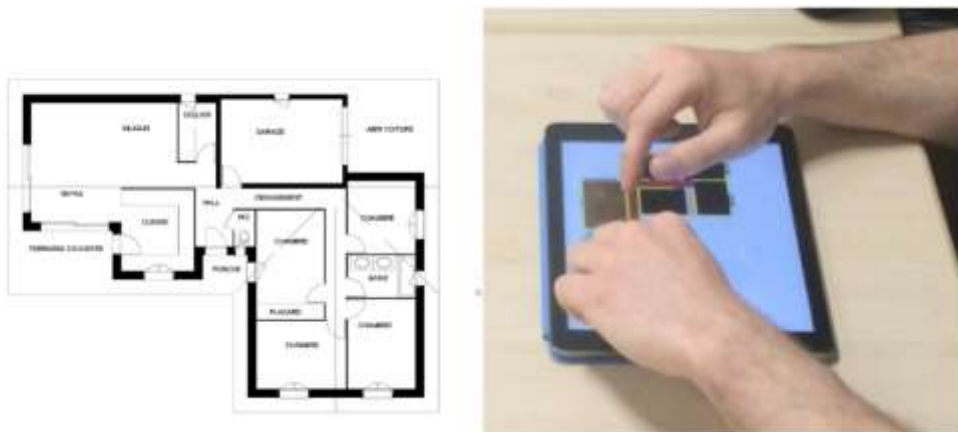


Figure 22. À gauche : **plan d'un appartement** ; à droite : **l'exploration de la version accessible** [46].

La principale limitation lors de l'exploration avec ces dispositifs est la taille de l'écran. En effet, que ce soit sur smartphone ou tablette, la surface d'exploration est réduite. Cela implique d'effectuer des interactions pour agrandir un graphique à explorer pour accéder à plus de détails. Ces interactions de pan et zoom largement utilisées par les voyants sont très difficiles à effectuer pour les personnes déficientes visuelles. Pour une opération de zoom, il faut avoir exploré le graphique entièrement pour savoir à quel endroit il faut effectuer l'opération [113,132]. Ce processus peut être extrêmement inefficace et frustrant en fonction de la complexité et de la structure du graphique [149,181].

3.2.2.2 AVEC UNE LARGE SURFACE

Nous avons recensé des travaux utilisant de larges surfaces [32,51,74,75,184]. Kane *et al.* [75] ont proposé trois techniques d'interaction pour explorer une carte sur une large surface : *Projection depuis les bords*, *Navigation des alentours* et *Toucher et parler* (voir Figure 23). Dans cette étude, les participants doivent trouver des points d'intérêts présents sur la carte, par exemple des villes. La première technique *Projection depuis les bords* consiste en des menus situés sur les côtés de la carte. En parcourant le menu de manière verticale, le nom des villes situées du Nord au Sud est annoncé suivant leur position. Le menu horizontal fonctionne de la même manière. Ainsi, pour localiser une ville, les utilisateurs la localisent d'abord sur les menus. Ensuite, ils doivent déplacer les doigts en ligne droite jusqu'à ce que leurs index se croisent. La deuxième technique *Navigation des alentours* utilise l'algorithme de Voronoi [36]. L'algorithme permet un découpage en zones à partir de points sur une carte (ici les différentes villes). Chaque zone créée contient un seul point (ou ville). La zone est formée de sorte que sa forme contient l'ensemble de l'espace le plus proche du point par rapport aux autres. Ainsi, l'utilisateur pose son doigt où il le souhaite sur la carte et la ville la plus proche est annoncée. Le système permet alors de le guider jusqu'à la ville. Enfin, la technique *Toucher et parler* permet à l'utilisateur d'accéder à un menu pour connaître la liste des villes, connaître les villes les plus proches ou donner le nom d'une ville. L'utilisateur est ensuite

guidé par le système. Les auteurs ont demandé aux participants de localiser, compter, relocaliser, sélectionner ou mettre en relation certaines villes. Les résultats montrent que la technique *Toucher et parler* est la plus rapide. Les participants ont préféré utiliser les techniques proposées par les auteurs plutôt que réaliser la tâche en utilisant VoiceOver.



Figure 23. À gauche : *Toucher et parler* ; à droite : *Projection depuis les bords*.

3.2.2.3 AVEC UNE CAMERA

Lors d'une exploration directe, il faut détecter le doigt de l'utilisateur (qui agit comme curseur) pour donner le retour par rapport à sa position. S'il est possible d'utiliser des écrans tactiles pour détecter le doigt ; une autre solution consiste à utiliser une caméra. Plusieurs prototypes se sont appuyés sur cette technique pour proposer un contenu accessible aux personnes déficientes visuelles [1,82,139,142,158]. Schneider *et al.* [139] ont proposé un système qui capture les positions des mains à l'aide d'une caméra et donne un retour sonore. Le système s'appuie sur des données cartographiques numériques adaptées aux besoins des utilisateurs. La caméra utilisée permet la détection de plusieurs positions. Les mouvements de la main génèrent des informations sur les points d'intérêt situés sous la main. Les participants peuvent suivre une rue avec l'index, guidé par un retour sonore. Plus récemment, Albouys-Perrois *et al.* [1] ont conçu une carte numérique destinée à être utilisée dans les classes de locomotion des centres d'éducation spéciale. Ce prototype est composé d'une caméra, d'une sortie audio et de jetons tactiles qui permettent ainsi à la fois

l'exploration de la carte et sa construction par les utilisateurs déficients visuels, voir Figure 24. Les enseignants de locomotion ont trouvé le prototype plus attrayant et utile qu'une simple carte en relief et la légende en Braille associée.



Figure 24. Utilisatrice explorant une carte numérique, tirée de [1].

3.3 CONCLUSION SUR LES GRAPHIQUES NUMERIQUES

Cette partie résume deux familles de dispositifs concernant l'accessibilité des graphiques numériques : les graphiques interactifs hybrides et les graphiques interactifs numériques. La première catégorie s'appuie sur un graphique physique combiné à un dispositif interactif. Les graphiques physiques interactifs ont l'avantage d'ajouter de l'interactivité à un contenu en relief (papier ou imprimé en 3D). Les utilisateurs explorent les cartes de manière habituelle et ont des retours audio et/ou tactiles en complément. Mais l'impression des graphiques physiques est toujours requise. Le graphique physique n'est pas dynamique, il faut donc l'imprimer de nouveau à chaque changement effectué. Les graphiques tangibles permettent aux personnes déficientes visuelles de construire seules un graphique [31]. Mais l'utilisation de tels systèmes peut être fastidieuse car les objets physiques peuvent être déplacés de manière fortuite durant l'exploration.

Les écrans déformables présentent quant à eux de nombreux avantages, notamment pour afficher des contenus qui peuvent être modifiés facilement. Cependant, leur coût excessif ne permet pas une utilisation grand public.

La deuxième famille est celle des graphiques interactifs numériques. Deux sous-catégories existent : l'exploration indirecte ou l'exploration directe. L'exploration indirecte ne permet pas un lien direct entre la position du curseur et la distance réelle parcourue (notamment avec l'utilisation du clavier). Au contraire, l'exploration directe va permettre à l'utilisateur d'appréhender la largeur et la longueur de la surface sur laquelle est projeté le graphique. L'utilisation du smartphone ou de la tablette permet à l'utilisateur d'utiliser son propre matériel pour explorer un graphique numérique. Cela peut s'avérer très important, car les utilisateurs déficients visuels en sont équipés [196]. Un autre avantage de ces dispositifs est la mobilité : en effet, ils peuvent être utilisés dans n'importe quelle situation. Mais leur surface d'interaction est réduite et nécessite donc des opérations de pan et zoom très difficiles à réaliser par les utilisateurs déficients visuels. Une possibilité est alors d'utiliser des surfaces larges. Elles ont l'avantage de permettre une surface d'interaction plus grande, mais elles ne sont pas accessibles au grand public dû à leur prix élevé. Les dispositifs utilisant une caméra pour suivre le doigt permettent une flexibilité concernant la surface d'interaction. A partir du moment où la caméra est placée au-dessus de la surface, l'utilisateur peut parcourir des graphiques numériques. Mais ces systèmes sont assez difficiles à utiliser dans l'espace public, car ils nécessitent des conditions de lumières particulières pour fonctionner.

Quel que soit le choix effectué pour rendre l'accessibilité des graphiques numériques, le retour est primordial. Il va permettre à l'utilisateur de comprendre le graphique. Nous détaillons cet aspect dans la section suivante.

4 INTERACTIONS EN SORTIE

Afin de lire du texte sur un écran, les personnes déficientes visuelles utilisent des lecteurs d'écrans. Des sondages réalisés par WebAIM entre 2009 et 2015 ont permis de révéler les préférences de ces utilisateurs dans ce secteur [196]. Les résultats ont montré que le lecteur d'écran JAWS est le plus utilisé. Sur mobile, l'assistant VoiceOver est le plus répandu. Ces lecteurs d'écrans sont adaptés pour lire des informations linéaires, mais ils le sont beaucoup moins pour explorer des graphiques numériques. Les différents dispositifs utilisés pour explorer des graphiques reposent sur différentes modalités en sortie pour donner des informations : la modalité auditive et la modalité vibratoire.

4.1 MODALITE AUDITIVE

La modalité auditive est largement utilisée dans les travaux de recherche. En effet, elle permet de retranscrire facilement de l'information aux utilisateurs déficients visuels. La modalité auditive comprend le retour via la synthèse vocale, mais aussi l'utilisation de son ou de musique. La synthèse vocale est principalement utilisée dans les travaux de recherche [1,16,20,22,31,32,52,67,74,75,115,127,134,158,174,179,185,187,188]. Elle permet de remplacer la légende Braille. Lors de l'exploration de graphiques numériques, la synthèse vocale donne directement l'information à l'utilisateur. L'utilisateur gagne du temps lors de l'exploration de graphiques numériques et son exploration n'est plus coupée pour lire la légende associée à un point d'intérêt. L'intérêt de la synthèse vocale est qu'elle peut être configurée par l'utilisateur pour répondre à ses besoins (réglage de la vitesse, du volume, de la voix, etc.). Stent *et al.* [152] ont mis en avant les préférences utilisateurs d'une synthèse vocale. Les 36 utilisateurs de cette étude ont écouté plusieurs synthèses vocales et devaient retranscrire ce qu'ils avaient compris. Les résultats ont montré que l'âge influait sur la capacité de comprendre rapidement une synthèse vocale. De

plus, les auteurs ont constaté que la familiarité avec une synthèse vocale a un impact sur l'intelligibilité de la parole.

Les sons permettent de retranscrire de l'information très rapidement. Certains sons peuvent encoder de l'information liée à un événement [40], par exemple une icône sonore donne un son ayant des liens sémantiques avec les événements physiques qu'ils représentent [26]. Mais le lien entre le son et l'évènement n'est pas toujours associé et nécessite un apprentissage afin de le comprendre (par exemple le son de notification de réception d'un email) [13].

Plusieurs travaux de recherche ont combiné la synthèse vocale avec l'utilisation du son [22,83,115,147,148]. Cependant, nous avons répertorié des études utilisant le son uniquement [106,119,154,190]. Su *et al.* [154] ont étudié l'utilisation du son sur des cartes numériques de navigation. Le prototype TimbreMap repose sur l'utilisation d'un smartphone. L'utilisateur parcourt l'écran avec son doigt et reçoit le son associé à sa position, ce qui lui permet de suivre des lignes. Suivant le son qu'il entend, l'utilisateur peut aussi se repositionner (voir Figure 25). L'évaluation par des utilisateurs déficients visuels a montré que Timbremap transmet des informations géométriques complexes. Les participants ont une précision moyenne de 81 % dans l'identification des formes. Le prototype permet d'explorer des plans complexes : un utilisateur peut ainsi créer une carte mentale d'un plan complexe et décrire les points d'intérêt présents.



Figure 25. Utilisation de TimbreMap, tiré de [154].

Delogu *et al.* [28], en accord avec Millar *et al.* [104], ont montré que tous les participants à leur étude, aveugles ou voyants, ont éprouvé des difficultés à obtenir des détails précis sur les cartes sonifiées.

4.2 MODALITE VIBRATOIRE

Les *tactons* sont des signaux vibro-tactiles abstraits structurés qui véhiculent des informations de différents paramètres (fréquence, amplitude, forme d'onde, durée, et le rythme) [15]. Leurs avantages résident dans la possibilité pour communiquer des informations, même lorsque le bruit ambiant est à un niveau trop élevé ou lorsque la vie privée doit être garantie. Les *tactons* sont particulièrement intéressants pour les personnes déficientes visuelles qui ont l'habitude d'utiliser la modalité auditive dans beaucoup de tâches de la vie quotidienne. Différentes études ont utilisé des *tactons* pour une tâche de guidage [2,5]. L'utilisation de la vibration se fait via de nombreux dispositifs interactifs (comme les smartphones et les tablettes) [4,24,44,49,120,121,137,164] ou via l'usage d'un dispositif à porter [25,96,153,186].

Plusieurs prototypes ont proposé d'utiliser la vibration du smartphone pour guider l'utilisateur. Une approche a utilisé différents patterns de vibrations qui indiquent les directions à l'utilisateur [120,121,137]. Tactile Compass [121] a utilisé un moteur vibratoire pour indiquer la direction à prendre sur un cercle de 360 ° en faisant varier la longueur de deux impulsions consécutives. NaviRadar [137] utilisait un seul vibreur sur un appareil mobile : lorsque l'utilisateur fait un balayage circulaire sur un écran tactile, le retour vibratoire était utilisé pour confirmer la direction à suivre.

4.3 CONCLUSION SUR LES INTERACTIONS EN SORTIE

Nous avons vu les modalités auditives et vibratoires pour encoder de l'information. Ces modalités ont chacune leurs avantages et inconvénients. La modalité auditive (synthèse vocale notamment) donne un retour concret et sans ambiguïté à l'utilisateur. Le son va être associé à un évènement. Afin d'être bien compris, il peut y avoir une phase d'apprentissage. Ces modalités néanmoins peuvent s'avérer compliquées à utiliser dans un contexte bruyant.

La modalité vibratoire est plus discrète pour l'utilisateur. Elle peut s'utiliser dans de nombreux domaines et elle est notamment associée à une tâche de guidage. Il est nécessaire d'avoir un système interactif équipé d'un moteur vibratoire afin de pouvoir utiliser cette modalité. L'utilisation d'un dispositif approprié à porter est largement répandue, car il procure de nombreux avantages. Il peut être composé d'un ou de plusieurs points de vibration. Une étude a révélé que les personnes déficientes visuelles préfèrent l'avoir au poignet [128]. Ces dispositifs sont maintenant utilisés dans différents contextes. Ils peuvent avoir un ou plusieurs points de vibration [163]. Ils peuvent être fabriqués dans des unités de recherches pour répondre à une tâche particulière ou être commercialisés pour le grand public. C'est le cas des bracelets ou les montres connectées qui permettent de mesurer le rythme cardiaque, le nombre de pas ou le rythme du sommeil dans le but de contribuer à une meilleure santé. Outre l'utilisation prévue, ils permettent de créer de nouvelles techniques d'interaction. Ces appareils ont des formes différentes, étant intégrés dans les vêtements, gants, lunettes, bijoux, etc. [163]. Leurs intérêts a récemment été démontré pour les personnes déficientes visuelles [186].

Nous suggérons que pour l'exploration de graphiques numériques la modalité vibratoire est un complément utile à la modalité auditive. La modalité auditive, et plus particulièrement la synthèse vocale, est primordiale pour retranscrire des informations textuelles du graphique numérique. En complément de la synthèse vocale, la modalité vibratoire apporte une plus-value pour donner des informations non textuelles.

5 CONCLUSION DU CHAPITRE

Nous avons vu qu'il existe plusieurs classifications pour les graphiques visuels. Les icônes ou les symboles sont utilisés dans le processus d'adaptation de graphiques en relief pour les personnes déficientes visuelles. Nous ne les considérons pas comme des catégories à part entière comme [93,94], mais comme des composites nécessaires pour créer des graphiques adaptés. À partir des catégories proposées par des précédentes études et répertoriées dans ce chapitre, et en prenant en compte les contraintes nécessaires à l'adaptation des graphiques en relief, nous avons sélectionné trois catégories de graphiques : les dessins, les graphes mathématiques et les cartes. Nous avons pu observer que ces catégories sont celles qui sont utilisées dans des écoles spécialisées [29] :

- Les dessins sont les représentations d'une image, d'un objet ou d'un lieu.
- Les données statistiques sont représentées par des histogrammes des camemberts, etc.
- Les cartes rassemblent les représentations d'un lieu (à l'échelle d'un pays ou d'un quartier par exemple).

Des études ont mis en avant la manière dont les personnes déficientes visuelles explorent les graphiques en relief. Ces études ont comparé les performances des différentes populations (des personnes voyantes, des personnes aveugles précoces et des personnes aveugles tardives) sur l'identification de dessins en relief. Suivant le contexte et la tâche demandée, les résultats sont parfois contradictoires d'une étude à l'autre. Il n'existe pas de consensus scientifique sur les performances de ces différentes populations. Enfin, plusieurs études ont dégagé un ensemble de stratégies que mettent en place les utilisateurs lors de l'exploration pour répondre à une tâche donnée. Cependant, les études reposent sur un seul type de graphique (les cartes). Nous voyons plusieurs axes d'amélioration pour comprendre l'exploration de graphiques en relief par des personnes déficientes visuelles. Dans un premier temps, les études comparent les populations suivant leur degré de déficience visuelle. Nous pensons que l'expertise en exploration haptique de chaque utilisateur dépend de son expérience (l'accès à des formations ou des cours par les

utilisateurs pour explorer des graphiques tactilement). Ensuite, nous voulons connaître les mécanismes mis en jeu sur d'autres types de graphiques. Par conséquent, nous avons proposé deux études qui analysent les stratégies d'exploration suivant le type d'expertise de l'utilisateur et suivant le type de graphiques utilisés (dessins, graphes mathématiques, cartes géographiques). Nous décrivons ces études dans le chapitre 3.

Plus récemment les travaux de recherche ont porté sur l'accessibilité des graphiques numériques en se basant sur différentes technologies (graphiques physiques interactifs et graphiques numériques interactifs). L'usage des graphiques physiques interactifs se rapproche de l'exploration habituelle des utilisateurs (comparé à l'exploration haptique). Ces usages nécessitent toujours l'utilisation d'un graphique physique et se heurtent à la réimpression du graphique physique à chaque modification. Les prototypes basés sur des graphiques numériques interactifs offrent l'avantage d'adapter facilement le graphique aux besoins utilisateurs. Les graphiques numériques interactifs sont explorés de manière indirecte (usage d'un clavier) ou directe (usage d'un smartphone). L'exploration indirecte relève une charge cognitive plus élevée. La distance perçue par l'utilisateur lors d'un changement de position du curseur n'est pas la même que la distance réelle. L'exploration directe présente l'avantage de considérer le doigt comme curseur. Cette approche plus fonctionnelle consiste à laisser l'utilisateur explorer un graphique numérique avec ses mains : chaque doigt peut alors être considéré comme un curseur. Les retours sonores et vibratoires sont déclenchés en fonction de la position du doigt sur le graphique numérique. Ainsi, cet usage se rapproche de l'exploration haptique. Nous proposons un prototype qui repose une exploration directe avec un appareil mobile dont les utilisateurs déficients visuels sont déjà propriétaires (pour ne pas les surcharger avec de nouveaux dispositifs). La revue des travaux de recherche révèle que les retours s'appuient sur des modalités auditives ou tactiles pour une exploration de graphiques numériques. Une solution multimodale (tactile et auditive) s'avère la plus appropriée pour notre prototype. L'usage de dispositifs approprié à être porté permet de

conserver les mains libres durant l'exploration. Ils sont le plus appréciés lorsqu'ils sont portés au poignet. Ainsi, nous proposons un prototype pour explorer des graphiques numériques avec une ou deux mains utilisant une montre connectée combinée à une caméra. De plus, à notre connaissance, le retour multimodal sur les deux mains n'a jamais été étudié. Nous décrivons ce prototype dans le chapitre 4.

CHAPITRE 3

STRATEGIES D'EXPLORATION

Structure du chapitre

- 1 Introduction
- 2 Conception des différents graphiques en relief
- 3 Méthode d'analyse des mouvements d'exploration tactile
- 4 Étude 1 : Impact du statut visuel (voyants vs non-voyants) sur performances de l'exploration tactile
- 5 Étude 2 : Impact de l'expertise sur l'exploration tactile
- 6 Conclusion

Publications associées

S. Bardot, M. Serrano, B. Oriola, C. Jouffrais. Identifying how Visually Impaired People Explore Raised-line Diagrams to Improve the Design of Touch Interfaces. CHI'17

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

Les graphiques en relief permettent aux personnes déficientes visuelles d'accéder aux dessins, cartes ou encore aux graphiques mathématiques [95]. La capacité de lire et de comprendre un graphique en relief n'est pas une compétence automatique pour les personnes déficientes visuelles. En effet, les utilisateurs ont besoin d'une formation pour percevoir et interpréter le relief [33]. Généralement, le contenu doit être adapté et simplifié suivant le besoin de l'utilisateur. Des travaux de recherches ont permis d'évaluer la capacité à identifier ou reconnaître des graphiques en relief par exploration tactile. En général, ces études ont comparé le taux de reconnaissance des dessins d'objets courants (voiture, fruit, outil, etc.) obtenus par des personnes aveugles précoces et/ou tardives et par des personnes voyantes. Cependant, ces études reposent principalement sur les taux d'identification des graphiques et ne renseignent pas sur les mouvements des mains et des doigts. Quelques études ont analysé le mouvement des mains des utilisateurs lors de l'exploration de graphiques en relief. L'analyse des résultats se fait principalement à partir des vidéos des utilisateurs. Les résultats ont montré qu'une exploration avec les deux mains est plus efficace qu'une exploration utilisant une main [81,107]. Dans la section 2.5.3, nous avons décrit les stratégies d'exploration lors de l'exploration de graphiques numériques [51,148]. Ces stratégies sont soit des stratégies de découverte, soit des stratégies de mémorisation.

1.2 QUESTIONS DE RECHERCHE

Nos études étaient axées sur les questions de recherche suivantes :

- **Quel est l'usage des deux index lors de l'exploration de graphiques en relief ?**

Généralement, les deux mains sont utilisées pour parcourir un graphique, mais leurs usages diffèrent. Dans ces études, nous nous sommes concentrés sur l'utilisation des deux index. En effet,

ce sont le plus souvent ces doigts qui sont utilisés pour lire et récupérer les informations d’un graphique. Les utilisateurs déficients visuels lisent le Braille avec l’index gauche. Nous avons donc fait l’hypothèse que l’index gauche est le plus utilisé lors de l’exploration de graphiques.

- Le type de graphique en relief a-t-il un impact sur les stratégies d’exploration utilisées par les utilisateurs ?

Chaque type de graphique comporte ses propres spécificités. Un dessin ou une carte ne présentent pas la même quantité et le même type d’information. Des différences peuvent donc apparaître dans les stratégies utilisées lors de l’exploration des graphiques. Nous avons fait l’hypothèse que les utilisateurs adoptent des stratégies différentes suivant le type de graphique exploré.

- L’expertise de l’utilisateur a-t-elle un impact sur l’exploration de graphiques en relief et sur les stratégies utilisées ?

Nous avons fait l’hypothèse que chaque utilisateur a sa propre expertise tactile. Cette expertise va orienter les déplacements de ses doigts lors d’une exploration de graphiques en relief. Une personne ayant l’habitude d’explorer des graphiques va être plus rapide à les identifier.

1.3 MOTIVATION

Nos études ont été inspirées par les travaux de Wijntjes *et al.* [182], regardant les mouvements des doigts lors d’une exploration de dessins en relief, ainsi que de Simonet *et al.* [148] pour l’analyse des stratégies utilisées lors de l’exploration de cartes numériques. Nous avons décidé d’étendre ces travaux afin de quantifier le temps d’exploration de chaque main et les stratégies effectuées lors de l’exploration de différents types de graphiques en relief. Nous voulons mettre en avant l’exploration haptique des utilisateurs sur différents types de graphiques et la tâche demandée. Nous avons proposé deux études portant sur l’exploration de différents graphiques en relief suivant le niveau d’expertise des utilisateurs. L’intérêt de ces études est triple : 1) comprendre le rôle des

deux index lors de l’exploration de graphiques en relief suivant 2) le type de graphique et 3) l’expertise utilisateur. Nous avons utilisé différents types de graphiques : des dessins en 2D, des dessins avec des indices de 3D (comme la perspective), des graphiques mathématiques, des cartes géographiques et des plans.

La première étude portait sur la différence entre utilisateurs voyants et utilisateurs déficients visuels. Dans cette étude, les utilisateurs voyants étaient considérés comme novices en exploration tactile et les personnes déficientes visuelles comme des experts en exploration tactile.

La deuxième étude incluait des personnes déficientes visuelles uniquement et portait sur l’exploration de graphiques en relief. Nous avons concentré notre étude avec des participants déficients visuels afin de comprendre l’impact de l’expertise tactile dans l’exploration. Nous avons divisé les participants à cette étude en deux catégories selon leur expertise en exploration tactile. Nous avons déterminé leur expertise sur la base d’un questionnaire portant sur les formations reçues pour explorer des graphiques en relief.

1.4 STRUCTURE DU CHAPITRE

Dans la section 2, nous décrivons les différents types de graphiques choisis pour les deux études. Nous détaillons les caractéristiques de conception de chaque type. Dans la section 3, nous détaillons les méthodes d’analyses des résultats de nos études. Dans la section 4, nous décrivons la première étude réalisée auprès de personnes voyantes et de personnes déficientes visuelles sur l’exploration de graphiques en relief et les résultats de celles-ci. La section 5 est consacrée à la deuxième étude qui est axée sur les stratégies d’exploration de graphiques en relief auprès des personnes déficientes visuelles et les résultats de cette étude. Enfin dans la section 6, nous discutons les résultats des deux études, ainsi que les implications pour concevoir des graphiques interactifs.

2 CONCEPTION DES DIFFERENTS GRAPHIQUES EN RELIEF

La plupart des études concernant l'exploration tactile reposent sur des dessins d'objets quotidiens (des ciseaux, un marteau, etc.) [84,150,182]. Mais ces dessins ne sont pas les plus utilisés par les utilisateurs déficients visuels. En effet, dans les écoles spécialisées, les élèves suivent des cours de géographie, de mathématiques et de locomotion. En nous appuyant sur les types de graphiques utilisés dans les écoles ainsi que les différents types identifiés dans l'état de l'art, nous avons sélectionné cinq types de graphiques différents : les dessins 2D (pour pouvoir comparer avec la littérature), les dessins avec des indices de 3D (perspective), les graphes mathématiques, les cartes géographiques et les plans (de quartier et de bâtiment).

Nous avons ainsi décidé de séparer les dessins en deux catégories distinctes : les dessins 2D et les dessins avec des perspectives. Nous avons fait ce choix, car la perspective est une notion visuelle qui est difficile à comprendre tactilement. De même, nous avons séparé les cartes et les plans en deux catégories distinctes. Tandis que les cartes géographiques sont employées dans un contexte d'apprentissage éducatif, les plans sont utilisés régulièrement pour appréhender le plan urbain d'un nouveau quartier ou un trajet.

La conception de tous ces graphiques a été réalisée en s'appuyant sur les recommandations issues de la littérature, mais aussi avec l'aide d'une transcriptrice¹ du CESDV-IJA. Nous avons également effectué plusieurs itérations avec les utilisateurs déficients visuels pour affiner la largeur des lignes en relief, ainsi que la lisibilité du texte en braille. Les graphiques en relief ont tous été imprimés sur du papier Swell sur des feuilles A3 au format paysage (29,7 x 42 cm).

¹ Le transcripneur est un professionnel formé pour créer des documents tactiles.

2.1 DESSINS 2D

Les dessins illustrent généralement un objet. Ils sont représentés suivant leurs contours et leurs caractéristiques. Dans notre étude, nous nous sommes appuyés sur un ensemble d'images prédéfini et largement utilisé dans la littérature [84,150,182]. Cet ensemble de 260 images standardisées par Snodgrass et Vanderwart [150] a été créé pour être utilisé dans des expériences sur les différences et les similitudes dans le traitement des images.

Nous avons utilisé cette base de données sans retoucher aucun détail des images. Nous avons sélectionné des images représentant des objets du quotidien ou des images d'animaux, voir Figure 26.

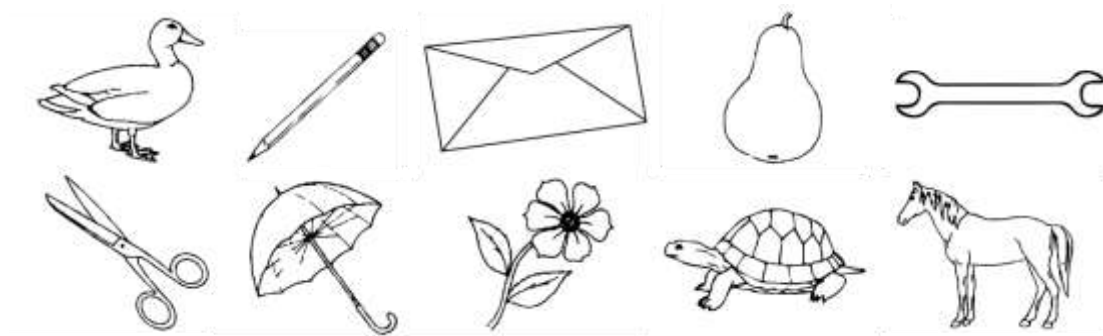


Figure 26. Dessins 2D tirés de nos études.

2.2 DESSINS AVEC PERSPECTIVES

Les dessins avec perspectives ont été tirés de la même base d'images. Nous avons souhaité séparer les dessins 2D et les dessins avec perspectives car ils représentent une difficulté supplémentaire lors d'une exploration tactile. En effet, la notion de perspective est un concept visuel qui ne correspond à aucune expérience tactile. Dans cette série d'images, nous avons sélectionné des bâtiments, du mobilier et des moyens de transport, voir Figure 27.

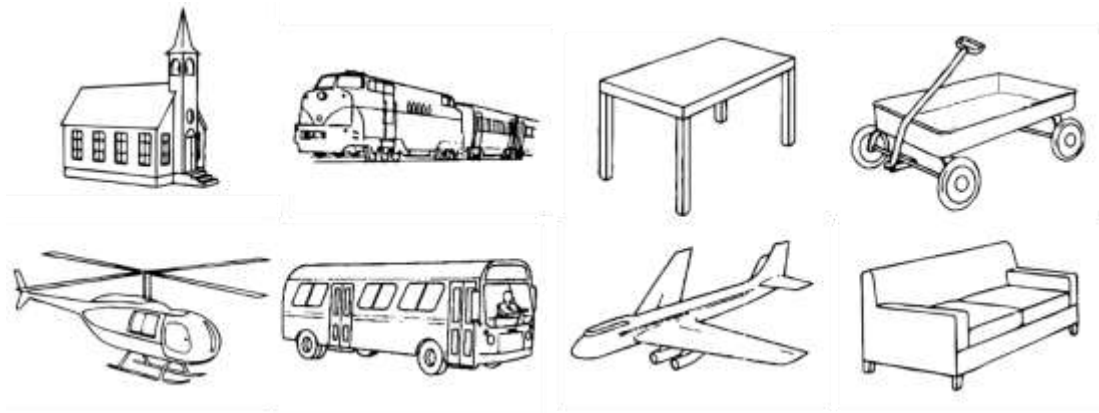


Figure 27. Dessins avec perspectives tirés de nos études.

2.3 GRAPHES MATHÉMATIQUES

Les graphes mathématiques illustrent la relation entre des ensembles de données au moyen de points, de lignes ou de barres. Ils sont utilisés en complément du texte imprimé pour aider le lecteur à organiser mentalement les informations. Ils sont essentiels et donc incontournables dans les programmes scolaires dans un large éventail de domaines, notamment la physique, la chimie, l'économie, la géographie et les mathématiques [33].

Dans ce contexte, nous avons conçu nos graphes conformément aux *Guidelines and Standards for Tactile Graphics* [157]. Deux types de graphes ont été inclus dans notre étude : les graphes linéaires qui affichent des informations sous forme d'une série de points reliés par des segments de droite, et les histogrammes (voir Figure 28) représentant des catégories de données avec des barres rectangulaires tracées verticalement ou horizontalement. Le repère orthonormé (les axes des abscisses et des ordonnées) se distingue par des lignes épaisses. Pour les deux types de graphiques, nous avons tracé les lignes de la grille en pointillé (les lignes les moins distinctes du graphique). Afin de distinguer les différentes courbes du graphe, nous avons utilisé deux styles de traits : une ligne pleine ou une ligne en pointillés serrés. Dans les histogrammes, pour différencier les différentes catégories (représentées par des rectangles), nous avons utilisé différentes textures

proposées dans les *Guidelines for Mathematical Diagrams*. Si les graphes ou les histogrammes nécessitent une légende, elle est située en bas à droite de la page.

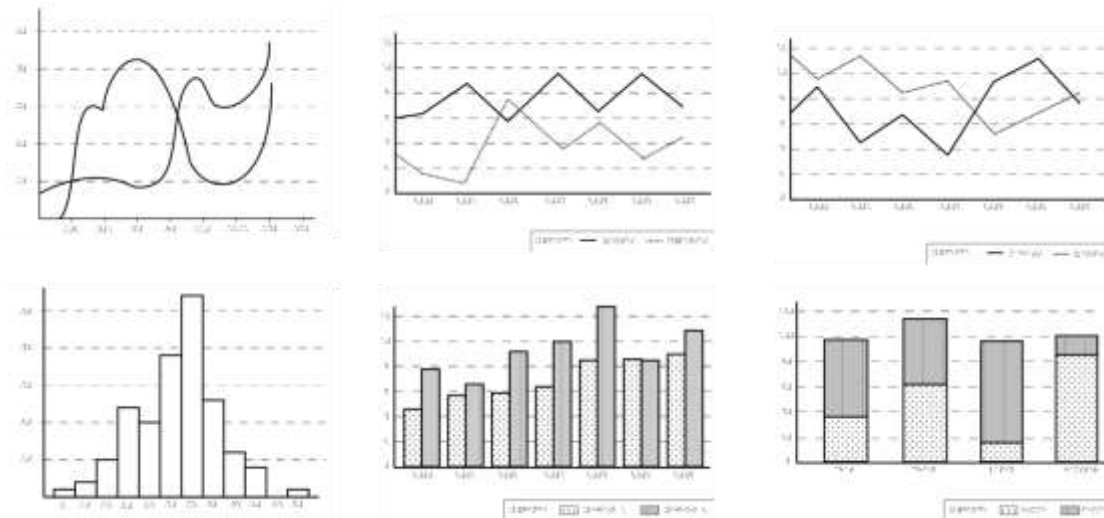


Figure 28. Graphes mathématiques tirés de nos études.

2.4 CARTES GEOGRAPHIQUES

Les cartes géographiques permettent de représenter un lieu. Ce sont des outils puissants qui permettent d'avoir une vision rapide et globale d'une vaste zone connue ou inconnue. Les cartes sont omniprésentes dans notre vie quotidienne et largement utilisées, notamment dans un contexte d'apprentissage à l'école. Cependant, pour les comprendre, l'utilisateur déficient visuel doit trouver le sens exact de chaque élément les composant : il doit être explicite et sans ambiguïté.

Les cartes que nous avons réalisées sont toutes des cartes d'un pays avec éventuellement ses voisins. Elles sont de deux types : soit ce sont des cartes comprenant les différentes régions du pays, soit ses différentes villes (voir Figure 29). La construction de nos cartes géographiques s'est appuyée sur différents symboles et éléments: les contours des frontières des pays sont des lignes pleines, les frontières des régions sont des lignes pointillées et les villes sont représentées par des ronds pleins [33]. À l'intérieur des régions, un numéro en Braille permet de les différencier. De même, chaque ville a son nom associé à côté en Braille (ici représenté par un numéro pour plus de simplicité).

Afin de symboliser la mer, nous avons utilisé la même texture utilisée dans les écoles spécialisées. Une légende est placée en bas et à droite et est composée de deux colonnes : les symboles sont placés dans la colonne de gauche et les descriptions en braille sont placées en face de chaque symbole sur la colonne de droite.



Figure 29. Cartes géographiques tirées de nos études.

2.5 PLANS

Les plans sont particulièrement utilisés par les personnes déficientes visuelles pour leur vie quotidienne. Afin de préparer en amont un trajet, elles utilisent les plans afin de l'apprendre pour être confiantes une fois dans la rue. Nous avons deux types de plans : les plans de bâtiments et les plans de quartiers, voir Figure 30. Afin de représenter les rues, nous avons opté, avec l'aide d'un transcripteur de l'IJA, pour des lignes simples pleines (c'est-à-dire que seule la route principale est représentée, mais pas sa composition : trottoirs, routes), car cela donne des images mentales plus précises [9]. Pour les éléments spécifiques, nous avons choisi des points pleins et des triangles pleins et vides qui font partie des symboles recommandés [110]. Une légende est située en bas à droite pour la description de chaque symbole.

Concernant les plans de bâtiments, les murs sont représentés par des lignes pleines. Nous avons, avec l'aide d'un transcripateur de l'IJA, représenté les portes des salles par un vide entre les murs à la place d'un arrondi afin de ne pas surcharger les graphiques. À l'intérieur de chaque salle, un numéro en Braille permet de les différencier les unes des autres.

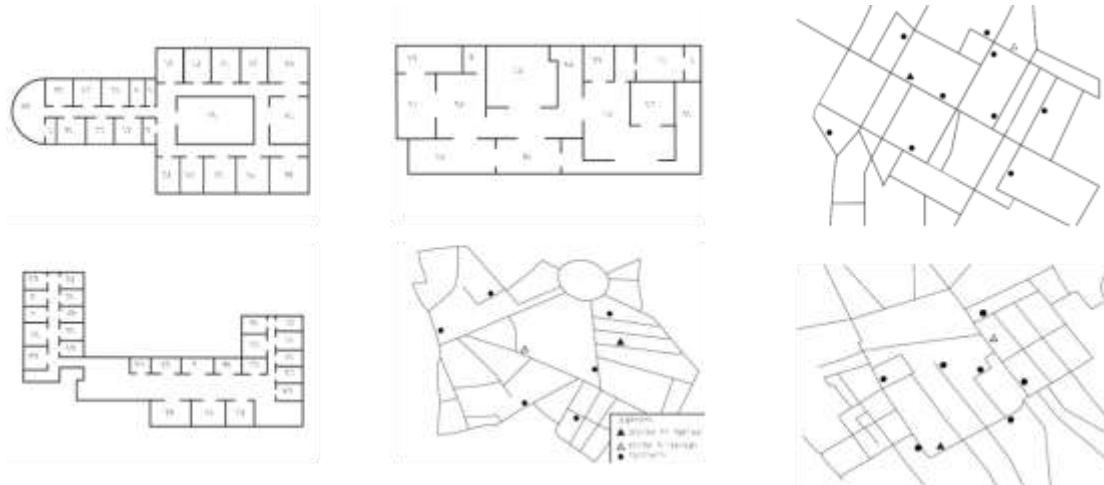


Figure 30. Plans tirés de nos études.

3 METHODE D'ANALYSE DES MOUVEMENTS D'EXPLORATION TACTILE

Lors de l'exploration tactile de graphiques en relief, les doigts parcourent les éléments en relief. Ils suivent les contours et peuvent s'arrêter sur certains éléments d'intérêt du graphique. Nous avons vu que plusieurs études se sont penchées sur le mouvement des deux mains [182] lors de l'exploration de graphiques en relief. Dans notre étude, nous avons analysé la performance de l'utilisateur suivant la tâche demandée mais aussi les mouvements réalisés par les deux index de l'utilisateur.

3.1 DISPOSITIF EXPERIMENTAL PERMETTANT DE SUIVRE LE MOUVEMENT DES DOIGTS

Le sujet était assis devant le dessin en relief (format A3 paysage). Nous avons utilisé une webcam Logitech C270 (1280x720 px), au-dessus de la carte, voir Figure 31. Afin de suivre les doigts (les deux index), nous avons placé des repères de couleur différents sur les ongles. Nous avons enregistré la position de chaque doigt à chaque fréquence d'acquisition. La fréquence d'acquisition pour la webcam était de 50 Hz. Tous les traitements des résultats ont été réalisés après les expérimentations.

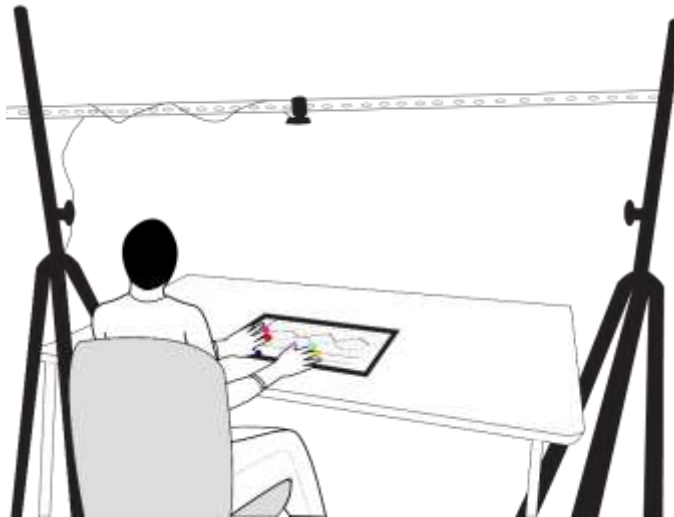


Figure 31. Dispositif expérimental.

3.2 PERFORMANCE D'IDENTIFICATION DES GRAPHIQUES

Nous avons regardé le taux d'identification des graphiques en relief. À la fin de l'exploration, les participants devaient aussi décrire le graphique exploré. Pour les dessins 2D et les dessins avec perspectives, les participants devaient donner le nom exact du dessin pour considérer l'identification comme correcte. Pour les graphes mathématiques, les participants devaient donner

le type du graphe (par exemple c’est un histogramme) et donner la légende associée (par exemple « comparaison des revenus et des achats selon les années »). Pour les cartes géographiques, les participants devaient identifier le type de carte (carte de ville ou carte de région) puis donner la légende associée. Enfin pour les plans, les participants devaient identifier le type de plan (bâtiment ou plans de quartier) et pour les plans de quartier se référer à la légende pour connaître les éléments présents (par exemple « plans de quartiers contenant des commerces »).

3.3 MOUVEMENTS DES MAINS

Les mouvements des mains permettent de découvrir un nouveau graphique tactile et se composent de deux phases : la phase de découverte et la phase de mémorisation [148]. Pendant la phase de découverte, l’utilisateur parcourt l’espace du graphique et identifie les éléments qui le composent (des points, des traits, des zones, du texte, une légende, etc.). Cette découverte peut se faire de façon complètement aléatoire, en bougeant les mains au hasard sur le graphique. Mais très souvent cette découverte se fait de façon ordonnée, selon une stratégie bien définie. Par exemple, l’utilisateur peut déplacer ses mains à la façon d’un « serpent » en balayant le graphique depuis le haut de la feuille. Il part de la gauche jusqu’à la droite puis en arrivant au bout de la feuille, il descend légèrement plus bas et repart depuis la droite jusqu’à la gauche et ainsi de suite jusqu’au bas de la feuille.

En parallèle de la découverte des éléments tactiles constituant le graphique, l’utilisateur commence à créer une image mentale du graphique et met en mémoire les différents éléments qui le composent et leur localisation relative. Ce processus de mémorisation fait apparaître des stratégies d’exploration qui le facilitent. Évidemment, différents comportements peuvent se combiner et donner naissance à des stratégies d’exploration plus évoluées. Par exemple, une main peut rester immobile sur un point d’intérêt, et la seconde parcourir plusieurs points situés autour de ce point

d'intérêt. Ce processus permet de mettre en relation spatiale plusieurs points d'intérêts les uns par rapport aux autres.

Nous avons analysé le comportement des utilisateurs lors de l'exploration des différents types de graphique. Nous avons extrait un ensemble d'observables qui nous ont permis de mettre en évidence les différences de stratégies en fonction des types de graphiques mais aussi entre utilisateurs experts et non-experts.

3.3.1 RÔLE DES DOIGTS DE CHAQUE MAIN

Les utilisateurs déficients visuels utilisent l'index pour lire le Braille et plus spécifiquement l'index gauche et donc, les index ont une meilleure discrimination tactile [10]. Les utilisateurs utilisent soit un seul index, soit les deux pour lire. S'ils en utilisent un seul, c'est l'index gauche qui sera utilisé. Plus l'utilisateur est expert en lecture Braille, plus il va être capable de lire le Braille avec les deux index, chaque index lisant sa partie de la ligne. De manière similaire lors de l'exploration tactile, l'utilisation de l'index reste majoritaire. C'est pour cela que dans nos études, nous nous sommes focalisé uniquement sur le parcours des deux index.

3.3.2 DISTANCE PARCOURUE

Lors de l'exploration d'un graphique en relief, nous avons regardé la distance parcourue par les index. Cette distance permet de mettre en évidence la mobilité et l'importance de chaque index lors de l'exploration.

3.3.3 TAUX DE RECOUVREMENT

Nous avons analysé le taux de recouvrement des graphiques généré par le parcours des deux index. Le taux de recouvrement se base sur le relief des graphiques, c'est-à-dire sur les parties noires des graphiques.

3.3.4 FIXATIONS TACTILES

3.3.4.1 SIMILITUDES AVEC LES FIXATIONS OCULAIRES

Une fixation oculaire apparaît entre deux saccades oculaires, lorsque l’œil s’arrête sur un élément d’intérêt de la scène. La fixation oculaire se mesure grâce à une accumulation de points du regard dans une même zone lors d’un suivi oculaire. La fixation est détectée en fonction d’une fenêtre spatiale et temporelle déterminée. La fenêtre spatiale est généralement comprise entre 20 et 50 pixels et la fenêtre temporelle entre 200 et 300 ms [64].

Afin de mettre en évidence l’arrêt des doigts sur des éléments d’intérêt du graphique, nous avons proposé une variable inspirée des fixations oculaires, que nous avons appelé « fixation tactile ».

3.3.4.2 MESURE DES FIXATIONS TACTILES

Il existe différents algorithmes pour détecter les fixations oculaires [138]. Nous avons utilisé l’algorithme appelé *Dispersion-Threshold Identification (I-DT)*. Cet algorithme requiert deux paramètres : une fenêtre de fixation et un seuil temporel à partir duquel on considère que la fixation commence. Dans notre contexte, les seuils des fixations oculaires (20-50 pixels pour la fenêtre et 200 à 300 ms comme seuil temporel) ne sont pas applicables, car les valeurs spatiales et temporelles sont trop petites pour une exploration tactile. Loomis *et al.* [95] ont mesuré la fenêtre « visuelle » d’un index lors d’une exploration tactile, cela correspond à un rectangle de 11 mm en largeur et 18 mm en hauteur. En se basant sur ces données, nous avons fait varier la fenêtre (un carré de 18 mm à 28 mm de côté) et le seuil temporel (à partir de 300 ms jusqu’à 1500 ms) sur l’ensemble de nos essais pour déterminer les valeurs à appliquer pour déterminer une fixation tactile (voir Figure 32).

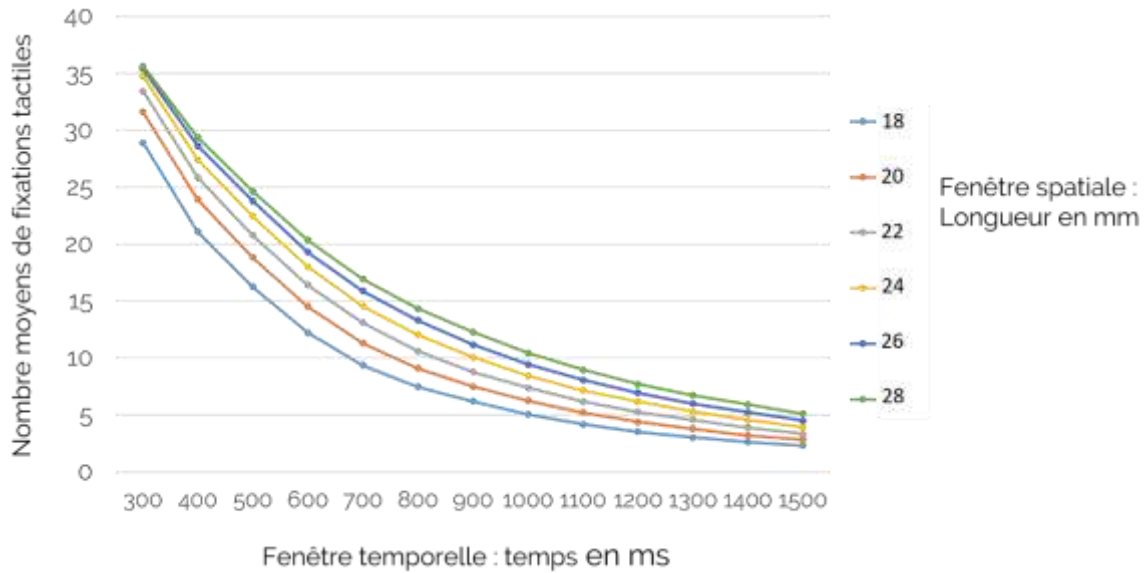


Figure 32. Nombre de fixations tactiles détectées en fonction de la taille de la fenêtre et du seuil.

En observant le graphique, nous constatons que le nombre moyen de fixations descend progressivement à mesure que le seuil temporel augmente. Il apparaît que la taille de fenêtre spatiale n'a que très peu d'impact sur la détection des fixations. A l'inverse, le nombre de fixations dépend fortement de la taille du seuil temporel considéré. Afin de retenir une valeur représentative, nous avons regardé les vidéos de certains participants et nous avons compté le nombre de fixations tactiles observées. Nous avons choisi au hasard cinq essais (un par type de graphique) réalisés par trois personnes expertes et trois personnes non expertes et analysé visuellement les vidéos de l'exploration. En comparant le nombre de fixations observées dans les vidéos et le nombre de fixations détectées par notre algorithme, nous avons défini les paramètres permettant d'identifier une fixation tactile, soit une fenêtre spatiale de 2,2 cm de côté et un seuil temporel de 900 ms.

3.3.5 MOUVEMENTS UNIMANUELS VS. BIMANUELS

Nous avons mesuré le pourcentage de temps passé à explorer avec une seule des deux mains qui bouge (et laquelle), avec les deux mains qui bougent simultanément, ou alors lorsqu’aucune des deux mains ne bouge (fixation tactile). Nous avons réalisé cette mesure en utilisant les fixations tactiles précédemment expliquées.

3.3.6 STRATEGIES D’EXPLORATION

Des études ont montré les différentes stratégies des utilisateurs lors d’explorations haptiques [51,148,182]. Deux types de stratégies entrent en jeu : des stratégies de découverte (*périmètre*) et des stratégies de mémorisation (*point-de-référence*, *allers-retours* et *cyclique*). Pour analyser ces stratégies, nous nous sommes basés sur les fixations tactiles que nous avons précédemment définies.

Pour détecter la stratégie *périmètre*, nous avons demandé à trois juges indépendants d’analyser visuellement le parcours des mains des utilisateurs. Nous leur avons montré des exemples de stratégie *périmètre* observés sur différents types de graphiques, puis ils ont analysé tous les essais des participants. Les juges étaient naïfs concernant les objectifs du protocole de l’expérience.

Pour les autres stratégies, nous avons développé et testé des algorithmes afin de détecter les différentes stratégies utilisées.

4 ÉTUDE 1 : IMPACT DU STATUT VISUEL (VOYANTS VS NON-VOYANTS) SUR LES PERFORMANCES DE L’EXPLORATION TACTILE

Le but de cette première étude était de comprendre le rôle de chaque index lors de l’exploration tactile de différents types de graphiques en relief (dessins 2D, dessins avec des perspectives, graphes mathématiques, cartes géographiques et plans) par des utilisateurs ayant des compétences

d’exploration tactile très différentes (personnes voyantes ayant les yeux bandés et personnes déficientes visuelles). Nous avons utilisé les dessins 2D pour évaluer le niveau d’expertise de chaque participant en termes d’exploration de graphiques en relief. Ensuite, nous avons proposé deux modes d’exploration : libre et dirigée. L’exploration libre va nous permettre de mettre en évidence les stratégies de découverte tandis que l’exploration dirigée va mettre en avant les stratégies de mémorisation et mise en relation d’éléments.

4.1 TACHES ET INSTRUCTIONS

Au cours de l’étude, chaque participant a exploré 22 graphiques en relief au total : 10 dessins 2D et 3 exemplaires des quatre autres types de graphiques (dessins avec perspectives, graphes mathématiques, cartes géographiques, plans).

L’étude a été divisée en deux étapes (voir Figure 33) :

- La première étape a consisté à identifier le plus rapidement possible 10 dessins du quotidien. La catégorie du dessin a été mentionnée avant le début de l’exploration de l’utilisateur (par exemple, objet ou animal). Le participant avait 90 secondes au maximum pour identifier le dessin. Nous avons mesuré le temps nécessaire pour identifier le dessin.
- La deuxième étape a consisté à explorer les quatre autres types de graphiques en relief par blocs de 3 essais (12 essais au total). Les participants ont d’abord exploré librement un graphique sur 30 secondes (*exploration libre*). Ensuite, ils ont eu 60 autres secondes pour explorer le même graphique afin de répondre à une question (*exploration dirigée*). Les questions variaient selon le type de graphique : pour les dessins avec perspectives, les participants devaient reconnaître le dessin parmi 4 propositions. Pour les graphes mathématiques, ils devaient trouver des valeurs

spécifiques (par exemple : donner la valeur en ordonnée des points situés en abscisse à <valeur 1> et à <valeur 2>). Pour les cartes géographiques, ils devaient comparer différents éléments (par exemple : y-a-t-il plus de grandes villes que de petites villes ?). Pour les plans de quartiers, ils devaient répondre à une question sur des éléments spécifiques présents sur un itinéraire entre un point de départ et un point d'arrivée (par exemple : qui est le plus près du rond-point entre le point de départ et le point d'arrivée ?).

Aucune instruction n'a été donnée concernant l'utilisation des mains lors de l'exploration.

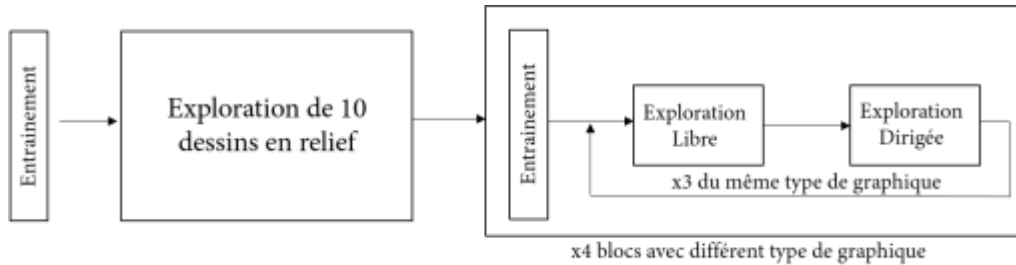


Figure 33. Protocole de l'expérimentation.

4.2 PARTICIPANTS

Nous avons recruté deux groupes de participants : 6 sujets voyants qui avaient les yeux bandés (3 femmes) et 6 sujets déficients visuels (5 femmes). Les participants voyants ne sont pas des experts en exploration tactile, mais peuvent s'appuyer sur des connaissances visuelles antérieures pour identifier les dessins. En revanche, les personnes déficientes visuelles sont probablement plus experts en exploration tactile, mais avec peu de connaissances visuelles antérieures, voire aucune.

Parmi les participants voyants, 2 étaient étudiants universitaires et 4 membres du personnel, âgés de 27 ans en moyenne (SD = 2). Ils n'avaient aucune expérience préalable de lecture Braille et d'exploration tactile de graphiques en relief.

Parmi les personnes déficientes visuelles, 5 étaient enseignants et 1 animateur de programme radiophonique, âgés de 46 ans en moyenne ($SD = 14$). Parmi eux, 5 étaient aveugles de naissance et 1 avait une vision résiduelle (perception de la lumière) très limitée. Tous les participants étaient droitiers mais lisent le Braille avec la main gauche. Il avait les yeux bandés pendant l'étude. Avant l'expérience, nous avons mené un questionnaire pour évaluer les compétences en lecture Braille et en exploration de graphique en relief (sur une échelle de Likert à 5 points). Tous les participants déficients visuels ont évalué leur expertise entre 2 et 5 ($M = 4,5$) pour la lecture en braille et entre 1 et 4 ($M = 3$) pour l'exploration tactile. Ils utilisaient tous leur main gauche comme main de lecture principale, mais différemment : une personne lit avec la main gauche seulement et les 5 autres avec leurs deux mains. Les 5 professeurs déficients visuels explorent des graphiques en relief plusieurs fois par semaine.

Participant	Sexe	Âge	Profession	Déficiences visuelle	Fréquence d'utilisation du Braille	Expertise en lecture Braille (1-5)	Fréquence d'utilisation d'images tactiles	Expertise en images tactiles
P7	F	47	Enseignante	Malvoyant	Plusieurs fois par semaine	2	Plusieurs fois par mois	4
P8	F	45	Enseignante	Aveugle	Plusieurs fois par jour	5	Jamais	1
P9	F	20	Animatrice radiophonique	Aveugle	Plusieurs fois par jour	5	Rarement	3
P10	M	51	Enseignant	Aveugle	Plusieurs fois par jour	5	Plusieurs fois par semaine	3
P11	F	59	Enseignant	Aveugle	Plusieurs fois par jour	5	Plusieurs fois par semaine	4
P12	F	56	Enseignante	Aveugle	Plusieurs fois par jour	5	Plusieurs fois par semaine	3

Tableau 1. Profil des participants déficients visuels.

4.3 PLAN D'EXPERIENCE

Notre étude a suivi un design intra-participant, avec un seul facteur : le type de graphique (dessins 2D, dessins avec perspectives, graphes mathématiques, cartes géographiques et plans). Le premier bloc correspondait à l'exploration des dessins 2D. L'ordre des dessins était généré de manière aléatoire entre les participants. L'ordre des 4 derniers blocs (un bloc pour chaque type de graphique) a été contrebalancé par les participants. Dans chaque bloc, l'ordre des 3 essais était aléatoire. Les utilisateurs étaient libres de faire une pause entre les blocs.

4.4 GRAPHIQUES EN RELIEF

Pour cette étude nous avons sélectionné les graphiques en relief comme suit, voir Figure 34 :

- Les dessins 2D choisis étaient les suivants : un ciseau, une enveloppe, une chaussette, une clé à molette, un crayon, un parapluie, un camion, un escargot, une tortue, un lapin et une poire.
- Les dessins avec perspectives incluant de la perspective étaient : un canapé, une église, une table et un hélicoptère.
- Les graphes mathématiques : nous avons utilisé trois différents types à savoir les histogrammes, les graphes et les camemberts.
- Les cartes géographiques étaient de deux types : soit une carte des villes, soit une carte des régions d'un pays. Les villes étaient représentées par des points pleins, avec les deux premières lettres de son nom écrites en braille. Les régions ont été séparées par des lignes en pointillés représentant les frontières. L'intérieur des régions avait une texture différente (traits pleins horizontaux ou verticaux).

- Les plans de quartier représentaient une zone délimitée d'une ville. Un point de départ (triangle vide), un point d'arrivée (triangle plein) et des commerces (ronds pleins) ont été ajoutés.

Les graphiques ne possèdent pas de légende. Au début de l'exploration, l'expérimentateur rappelle les différents éléments que composent les graphiques si besoin (notamment pour les cartes et les plans).

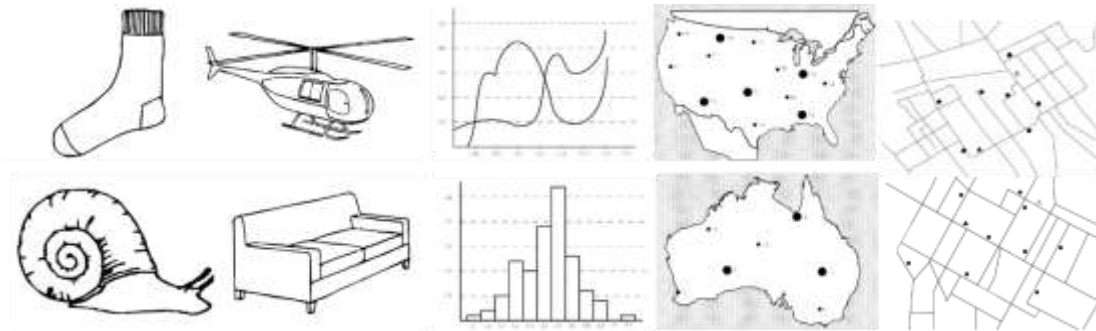


Figure 34. Images tirés de la première étude.

4.5 DONNEES COLLECTEES ET VARIABLES

Nous avons recueilli les coordonnées des doigts. Nous avons également mesuré le temps d'exploration nécessaire pour répondre aux questions. De plus, les sujets devaient évaluer la difficulté de chaque type de graphique. À la fin de la séance, nous leur avons demandé s'ils avaient mis en place, selon eux, une stratégie d'exploration spécifique lors de l'exploration. Nous avons également recueilli leurs impressions subjectives sur le nombre de mains et de doigts qu'ils ont utilisés et quels étaient leur usage.

Au total, nous avons collecté (10 dessins 2D + 4 types de graphiques x 3 répétitions x 2 explorations) x 12 participants = 408 essais.

Nous avons analysé suivant l'identification des graphiques et le temps d'exploration, la distance parcourue, le taux de recouvrement et l'exploration bimanuelle.

4.6 RESULTATS

Nous avons effectué une ANOVA univariée avec un test post-hoc de Bonferroni pour comparer les résultats.

4.6.1 TEMPS D'EXPLORATION ET PRECISION DE RECONNAISSANCE

Nous avons trouvé des différences entre les différents types de graphique ($F_{4,44} = 6,9$; $p < 0,001$) et les groupes d'utilisateurs ($F_{1,11} = 8,1$; $p = 0,005$) sur les temps d'exploration. Les temps d'exploration moyens étaient de 45,9 secondes pour les participants voyants et de 39,4 secondes pour les participants déficients visuels. La comparaison post-hoc a révélé une différence significative ($p < 0,001$) entre les durées d'exploration des dessins 2D ($M = 44,7$ s) et des dessins avec perspectives ($M = 27,5$ s).

En ce qui concerne la précision, nous avons trouvé un effet du type de graphique ($F_{4,44} = 8,7$; $p < 0,001$) et une interaction entre le type de graphique et le groupe utilisateurs ($F_{1,11} = 8,7$; $p = 0,006$). La comparaison post-hoc a montré une différence significative entre les dessins 2D et les plans ($p = 0,002$) et les dessins 2D et les dessins avec perspectives ($p < 0,001$). La précision par type de graphique était la suivante (participants voyants vs participants déficients visuels) : Dessins 2D (58,6 % vs 41,3 %) ; Dessins avec perspectives (93,7 % contre 5 %) ; Graphes mathématiques (62,5 % vs 75 %) ; Cartes géographiques (27,7 % contre 70,5 %) ; et Plans (11 % contre 31 %).

4.6.2 RECOUVREMENT DES GRAPHIQUES

Nous avons mesuré le taux de recouvrement pour chaque type de graphique, c'est-à-dire le pourcentage de graphique exploré. Nous avons trouvé un effet du type de graphique ($F_{4,44} = 4,5$; $p = 0,003$) et du groupe d'utilisateurs ($F_{1,11} = 9,1$; $p = 0,003$) sur le recouvrement. La comparaison post-hoc a montré une différence significative entre les dessins 2D d'un côté et les plans ($p = 0,002$), les cartes géographiques ($p = 0,002$) et les graphes mathématiques ($p = 0,01$) de l'autre côté. Le taux

de recouvrement moyen des graphiques était de 65,7 % pour les utilisateurs voyants et de 52,2 % pour les participants déficients visuels. Le taux de recouvrement par type de graphique (participants voyants vs participants déficients visuels) était : dessins 2D (74,2 vs. 59,7 %) ; dessins avec perspectives (75,7 contre 46,1 %) ; graphes mathématiques (52,3 % contre 51,1 %) ; cartes géographiques (51,6 % contre 44,1 %) ; et plans (55,4 % contre 40,6 %).

4.6.3 DISTANCE PARCOURUE PAR TYPE DE GRAPHIQUE ET PAR UNE MAIN

Nous avons mesuré la distance totale parcourue par chaque main et type de graphique (Figure 35). Nous avons trouvé un effet du groupe d'utilisateurs sur la distance parcourue par les mains droite ($F_{1,11} = 61$; $p < 0,001$) et gauche ($F_{1,11} = 17,5$; $p < 0,001$). Pour les participants voyants, les distances parcourues étaient de 460 et 727 cm pour les mains gauche et droite respectivement. Pour les participants déficients visuels, les distances d'exploration étaient de 769 et 257 cm pour les mains gauche et droite respectivement.

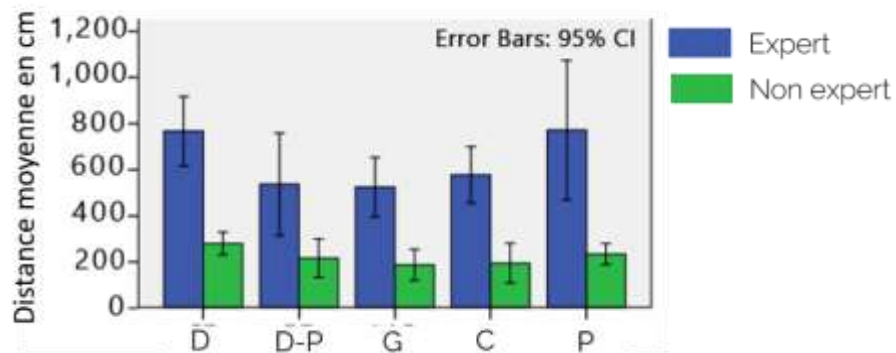


Figure 35. Distance moyenne d'exploration pour la main droite ; D : Dessin ; D-P : Dessin avec perspective ; G : Graphe ; C : Carte ; P : Plan.

4.6.4 EXPLORATION BIMANUELLE

Pour chaque essai, nous avons également calculé le temps pendant lequel les deux mains bougeaient simultanément (temps d'exploration bimanuelle). Nous avons trouvé un effet du type graphique ($F_{4,44} = 3,8$; $p = 0,004$) et du groupe d'utilisateurs ($F_{1,11} = 27,5$; $p < 0,001$). Les durées d'exploration bimanuelle étaient respectivement de 43 secondes (83,6 %) et de 28,7 secondes (74,6 %) pour les participants voyants et les participants déficients visuels, voir Figure 36.

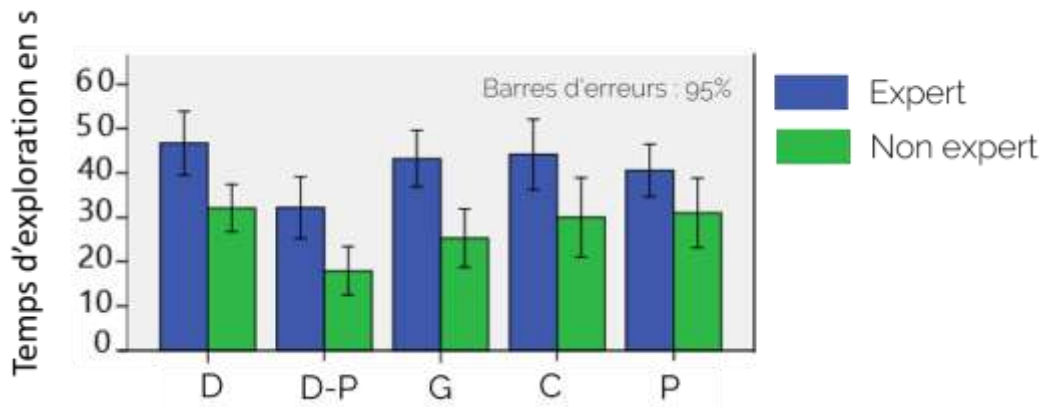


Figure 36. Temps moyen d'exploration des deux mains de manière simultanées. D : Dessin ; D-P : Dessin avec perspective ; G : Graphe ; C : Carte ; P : Plan.

4.7 DISCUSSION

Ces résultats ont montré que les sujets déficients visuels sont plus rapides que les sujets voyants lorsque tous les types de graphiques sont pris en compte. Ils sont similaires aux résultats de [56] et reflètent probablement la plus grande expertise des sujets déficients visuels. Cependant, un autre résultat est frappant. Bien que les sujets voyants et déficients visuels aient atteint la même performance d'identification globale (52 %), le pourcentage de réponses correctes est significativement différent selon le type de dessin. Par exemple, les sujets déficients visuels ont obtenu 31 % de réponses correctes sur les plans, alors que les sujets voyants n'ont atteint que 11 % de réponses correctes. En fait, les sujets déficients visuels sont plus aptes à explorer les cartes

géographiques ou les plans. Au contraire, les sujets voyants étaient plus aptes à identifier les dessins 2D et les dessins avec perspectives. Il est probable que les adultes déficients visuels explorent plus fréquemment des cartes et des graphes mathématiques que des dessins d'objets. De plus, les dessins avec perspectives reposent sur des conventions visuelles moins signifiantes pour les personnes déficientes visuelles [56].

Nos résultats ont également montré que les participants déficients visuels couvrent une distance d'exploration inférieure à celle des participants voyants pour tous les types de graphiques (52 % contre 66 %), bien qu'ils obtiennent des taux de réussite équivalents. La distance d'exploration par main a montré que les sujets voyants et déficients visuels ont des comportements opposés : les personnes déficientes visuelles utilisent principalement la main gauche (769 cm par essai), c'est-à-dire leur main dominante en lecture braille ; tandis que les sujets voyants utilisent principalement la main droite (727 cm). Il est intéressant de noter que les sujets déficients visuels couvrent une distance limitée avec la main droite (257 cm par essai) et que les sujets voyants passent plus de temps à effectuer une exploration bimanuelle (c'est-à-dire une exploration avec les deux mains en même temps). Cette observation reflète probablement le fait que les sujets déficients visuels utilisent leur deuxième main comme une ancre qui aide à comprendre le graphique.

Lors de cette première étude, nous nous sommes concentrés sur les différences entre deux catégories d'utilisateurs distinctes (les voyants et les personnes déficientes visuelles). Comme le montrent les questionnaires subjectifs, les personnes voyantes représentent une population novice en matière d'exploration tactile, alors que c'est l'inverse pour les personnes déficientes visuelles sélectionnées, qui sont plutôt des experts en exploration tactile. Nous avons pu voir que des différences apparaissent entre ces deux populations, notamment sur l'utilisation de chacune des mains mais aussi sur l'utilisation des deux mains en simultané lors de l'exploration.

Généralement les études [56,182] distinguent les participants aveugles suivant l'âge auquel ils ont perdu la vue (personnes aveugles précoces ou tardives). Nous pensons que les formations ou les

cours dispensés pour mieux appréhender un graphique en relief sont primordiaux dans la meilleure compréhension de celui-ci. Par exemple, une personne aveugle précoce peut avoir été formée afin d’acquérir de l’expérience tactile. Nous pensons que l’expertise tactile d’un utilisateur va impacter sa stratégie d’exploration. Nous proposons ainsi une deuxième étude, inspirée de la première, en prenant en compte l’expertise utilisateur.

5 ÉTUDE 2 : IMPACT DE L’EXPERTISE SUR L’EXPLORATION TACTILE

Le but de cette seconde étude consistait à confirmer les résultats de la première mais avec des personnes déficientes visuelles uniquement et dont le niveau d’expertise était différent. Nous avons réparti nos utilisateurs en deux groupes de novices et d’experts en exploration tactile.

5.1 TACHES ET INSTRUCTIONS

Comme précédemment, nous avons utilisé 5 types de graphiques : dessins 2D, dessins avec perspectives, graphes mathématiques, cartes géographiques et plans de quartier ou de bâtiments. Chaque séance de cette étude était divisée en trois étapes : une exploration sans contexte, une exploration avec contexte et une exploration dirigée (voir Figure 37). L’exploration sans contexte permet d’analyser les stratégies de découverte d’un graphique lorsqu’aucun élément n’est donné. L’exploration avec contexte, qui est une condition plus réaliste, permet d’analyser les éléments qui sont déterminants pour identifier un graphique lorsque l’utilisateur connaît la catégorie du graphique. Enfin, l’exploration dirigée permet de mettre en avant les stratégies de mémorisation et mise en relation d’éléments.

- L’exploration sans contexte consistait à explorer librement le graphique pendant une minute au maximum. La consigne était d’identifier le graphique le plus rapidement et le plus précisément possible. Aucune indication n’était donnée concernant la nature du graphique.

- L'exploration avec contexte consistait à explorer librement le graphique pendant une minute au maximum. La consigne était d'identifier le graphique le plus rapidement et le plus précisément possible. Avant l'exploration, l'expérimentateur donnait la catégorie du graphique (par exemple : un animal pour les dessins 2D ou un histogramme pour les graphes mathématiques).
- L'exploration dirigée consistait à répondre le plus rapidement et le plus précisément possible à une question. Les participants avaient au maximum une minute et trente secondes pour répondre. Avant l'exploration, nous avons donné la nature du graphique. Les questions étaient différentes suivant le type de graphique. Pour les dessins 2D ou les dessins avec perspectives, c'étaient des questions avec choix forcé parmi deux choix possibles (par exemple « est-ce une poule ou un canard ? »). Pour les graphiques mathématiques, les questions portaient sur la comparaison de données (« Est-ce que les achats sont plus importants que les ventes en 2001 ou en 2006 ? »). Pour les cartes géographiques, des questions de distance ou de grandeur étaient demandées (« Est-ce que la ville n° 45 est plus proche de la ville n° 3 ou de la ville n° 55 ? » ou encore « Est-ce que la région n° 1 est plus grande que la région n° 95 ? »). Enfin pour les plans de quartier, les questions portaient sur le point de départ et d'arrivée (« Entre le point de départ et le point d'arrivée, lequel est le plus proche d'un commerce à vol d'oiseau ? »). Enfin, pour les plans de bâtiments, la question portait sur la comparaison des différentes pièces (« Est-ce que la pièce n° 23 est plus proche de la pièce n° 55 ou n° 10 ? »). Les questions changeaient suivant les graphiques, mais pas leur nature.

Au cours de l'étude, chaque participant a exploré 30 graphiques en relief au total : 10 graphiques de chaque type. Les graphiques étaient tous différents, quelle que soit la tâche réalisée.

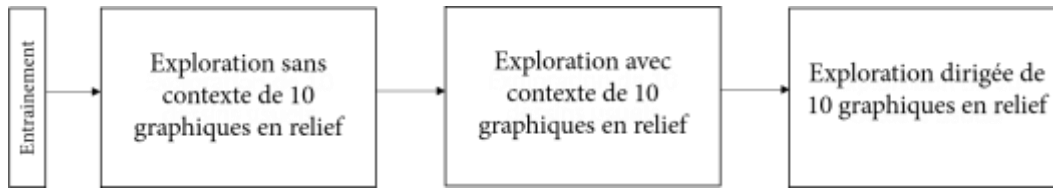


Figure 37. Procédure de l'expérimentation.

5.2 PARTICIPANTS

Nous avons recruté 12 participants déficients visuels (4 femmes). Aucun de ces participants n'avait pris part à la première étude. Parmi les participants, 4 étaient retraités, 2 étaient formateurs, 2 étaient enseignants, 1 sans-emploi, 1 développeur informatique, 1 masseur et 1 kinésithérapeute. Ils étaient âgés de 50 ans en moyenne ($SD = 12$). Parmi eux, 10 étaient aveugles et 2 avaient une vision résiduelle très limitée (hypermétropes). Ils avaient les yeux bandés pendant l'étude. Onze participants étaient droitiers et un était gaucher dans la vie quotidienne. Tous les participants étaient lecteurs de Braille et lisent le Braille avec la main gauche ; cependant l'âge de l'apprentissage du Braille variait (15 ans en moyenne, $SD = 12$). Tous les participants déficients visuels ont évalué leur expertise en lecture Braille sur une échelle de Likert à 7 points ($M = 4,2$; $SD = 2$).

Participant	Sexe	Âge	Profession	Déficiência visuelle	Âge d'apparition de la déficiência visuelle	Âge d'apprentissage de la lecture Braille	Fréquence d'utilisation du Braille	Evaluation subjective d'expertise en lecture Braille (1-7)	Latéralité
P1	M	45	Sans emploi	Aveugle	0	5	Plusieurs fois par jour	4	Droitier
P2	F	61	Retraité	Malvoyant	15	18	Rarement	3	Droitier
P3	M	62	Formateur	Aveugle	3	5	Plusieurs fois par jour	6	Droitier
P4	M	68	Retraité	Aveugle	2	5	Plusieurs fois par jour	5	Droitier
P5	M	58	Retraité	Aveugle	10	15	Plusieurs fois par mois	2	Droitier
P6	F	37	Enseignant	Aveugle	2	5	Plusieurs fois par jour	6	Droitier

P7	M	46	Enseignant	Malvoyant	18	18	Jamais	1	Droitier
P8	M	45	Développeur	Aveugle	0	6	Plusieurs fois par jour	7	Droitier
P9	F	63	Retraité	Aveugle	57	61	Rarement	1	Droitier
P10	F	48	Masseur	Aveugle	5	9	Plusieurs fois par jour	6	Droitier
P11	M	48	Kinésithérapeute	Aveugle	5	12	Plusieurs fois par jour	4	Gaucher
P12	M	27	Formateur	Aveugle	3	16	Plusieurs fois par jour	5	Droitier

Tableau 2. Profil des participants de l'étude.

Avant l'expérience, nous avons mené un entretien pour évaluer leur niveau d'expertise en exploration tactile. Nous leur avons demandé s'ils ont reçu des cours ou des formations portant sur l'exploration de documents en relief. Les cours sont les enseignements dispensés durant la scolarité du participant, tandis que les formations sont les apprentissages proposés par les centres spécialisés. Nous leur avons également demandé leurs habitudes concernant l'utilisation de graphiques en relief. Enfin, nous leur avons demandé d'évaluer subjectivement leur expertise en exploration tactile. 6 participants ont déclaré n'avoir jamais eu d'apprentissage en exploration tactile, 3 avoir eu des formations dans des centres spécialisés (à l'IJA à Toulouse, à La Villette et à la Cité des sciences à Paris), 2 avoir eu des cours et des formations (au collège et lycée, à l'IJA à Toulouse) et 1 uniquement des cours (au lycée). Une seule personne a déclaré utiliser quotidiennement des graphiques en relief avec l'association Les Mirauds Volants, alors que les autres participants n'utilisaient pas régulièrement des graphiques en relief (5 personnes n'en possédaient pas chez eux et 6 personnes n'avaient ni le besoin, ni l'occasion d'en utiliser). Les participants ont jugé leur expertise en moyenne à 3,5 (SD = 1,78) sur une échelle de 1 à 6.

Participant	Apprentissage reçu	Fréquence d'utilisation de graphiques en relief	Dessins	Plans	Cartes	Graphes	Raison d'une utilisation peu fréquente	Evaluation subjective d'expertise en exploration tactile (1-6)	Groupe expertise
P1	Cours Formation	Rarement		X	X		N'en possède pas	2	NE
P2	Formation	Une fois par an ou plus	X	X			Pas l'occasion	4	NE
P3	Formation	Tous les jours			X			6	E
P4	Non	Plusieurs fois en ans		X	X		N'en possède pas	5	E
P5	Non	Par période (souvent avant un voyage)	X		X		Pas l'occasion	2	E
P6	Non	Rarement		X			Pas occasion	4	E
P7	Non	Jamais					N'en possède pas	1	NE
P8	Non	Jamais					Pas occasion	5	E
P9	Formation	Une fois par an ou plus			X		N'en possède pas	1	NE
P10	Non	Rarement		X	X		N'en possède pas	5	E
P11	Cours Formation	Rarement		X			Pas le besoin	2	NE
P12	Cours	Une fois par mois ou plus		X	X		Pas l'occasion	5	E

Tableau 3. Profil de l'expertise en exploration tactile des participants.

Nous avons séparé nos participants en deux groupes : un groupe expert et un groupe non expert en exploration tactile. À notre connaissance, il n'existe pas de méthode éprouvée qui permet de déterminer l'expertise utilisateur. Nous nous sommes renseignés auprès des enseignants spécialisés, qui n'ont pas de méthode particulière pour déterminer l'expertise d'un utilisateur. Les cours sont dispensés suivant la déficience de la personne. Nous avons donc séparé nos participants selon leur déclaration au questionnaire subjectif réalisé en début d'expérience et nous avons analysé le pourcentage d'identification correcte des graphiques lors des deux premières

explorations. Ainsi, notre groupe d’experts était composé de : P3, P4, P5, P6, P8, P10 et P12, pour un total de 7 personnes. Notre groupe de non expert était composé de : P1, P2, P7, P9 et P11, soit 5 personnes.

5.3 PLAN D’EXPERIENCE ET PROCEDURE

Notre étude a suivi une conception intra-participant, avec deux facteurs : le type de graphique (dessins 2D, dessins avec perspectives, graphes mathématiques, cartes géographiques et plans) et le contexte d’exploration (sans contexte, avec contexte, et exploration dirigée). Un bloc correspondait à un type de contexte et était composé de 10 graphiques (2 pour chaque type). Au sein de chaque bloc, l’ordre des graphiques était aléatoire. L’ordre des blocs était le même pour tous les participants : exploration sans contexte, exploration avec contexte et exploration dirigée. Pour chaque participant, nous avons contrebalancé les graphiques entre les blocs : suivant les participants, un même graphique pouvait être exploré dans l’un des trois contextes d’exploration. Les utilisateurs étaient libres de faire une pause entre les blocs.

5.4 GRAPHIQUES EN RELIEF

Pour cette étude, nous avons sélectionné et réalisé les graphiques en relief comme suit, voir Figure 38 :

- Les dessins 2D choisis étaient tous des animaux : un cheval, une tortue, un dromadaire, un canard, un lapin et un écureuil.
- Les dessins avec perspectives étaient tous des moyens de transport: un bus, un avion, une luge, un chariot, un train et une moto.
- Nous avons utilisé deux types différents de graphiques mathématiques, à savoir les histogrammes et les graphes.

- Les cartes géographiques étaient de deux types : carte des villes ou carte des régions d'un pays. Les villes étaient représentées par des points pleins, avec un chiffre associé écrit en braille. Les régions étaient séparées par des lignes en pointillés représentant les frontières. Chaque région était associée à un chiffre écrit en braille à l'intérieur de la région.
- Les plans étaient soit des plans de quartier, soit des plans de bâtiments. Les plans de quartiers contenaient un point de départ (triangle vide), un point d'arrivée (triangle plein) et des commerces (ronds pleins). Dans les plans de bâtiments, chaque pièce était associée à un chiffre écrit en braille à l'intérieur de la pièce.

Une légende accompagnait les graphes mathématiques, les cartes géographiques et les plans de quartiers graphiques afin de comprendre les différents éléments présents dans le graphique.

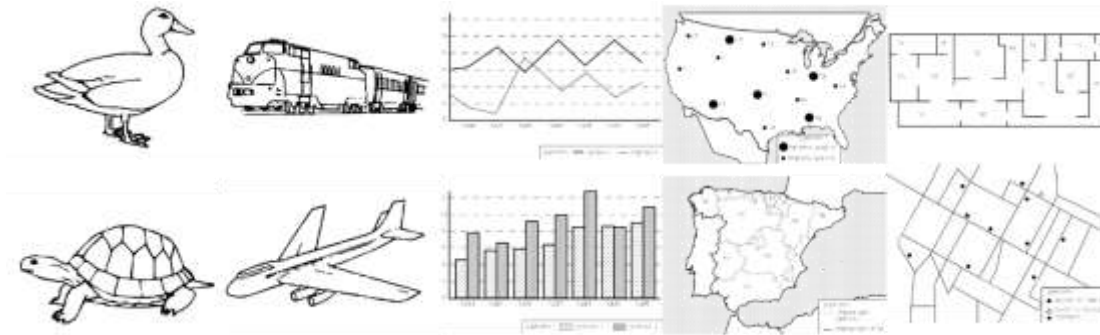


Figure 38. Images tirées de la deuxième étude.

5.5 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Nous avons utilisé le même dispositif expérimental que pour l'étude précédente. Une webcam Logitech C270 (1280x720 px) était située au-dessus du dessin en relief. Afin de suivre les doigts, nous avons placé des repères de couleur sur les ongles. La fréquence d'acquisition était de 50 Hz pour la webcam. Nous avons recueilli les coordonnées des index, des majeurs et des pouces pour

tous les essais. Nous avons fait ce choix, car nous avons observé lors de la première étude que parfois certains utilisateurs explorent avec d’autres doigts que l’index.

5.6 VARIABLES OBSERVEES

Lors de l’exploration sans contexte, nous avons collecté deux variables concernant l’identification des graphiques: type de document reconnu et graphique parfaitement identifié. Par exemple, si un participant identifiait une poule à la place d’un canard dans l’exploration sans contexte, la catégorie du graphique était exacte, mais l’identification du graphique était considérée comme incorrecte. Pour l’exploration avec contexte, nous avons collecté les réponses des participants. Pour l’exploration dirigée, nous avons également mesuré le temps d’exploration nécessaire pour répondre aux questions ainsi que l’exactitude des réponses.

Au total, nous avons collecté 3 contextes d’exploration x 5 types de graphiques x 2 répétitions x 12 participants = 360 essais.

5.7 ANALYSE DES RESULTATS

Nous avons, dans un premier temps, analysé le temps passé à explorer les graphiques et la performance d’identification. Nous avons utilisé un test de Shapiro-Wilk pour déterminer la normalité des distributions des données collectées. Comme les distributions n’étaient pas normales et ne pouvaient pas être normalisées, nous avons utilisé des tests Wilcoxon et Friedman non paramétriques pour deux ou plusieurs comparaisons, respectivement. Nous avons utilisé la correction de Bonferroni.

5.7.1 IDENTIFICATION DES GRAPHIQUES

5.7.1.1 EXPLORATION SANS ET AVEC CONTEXTE

Nous avons regardé la performance d'identification des graphiques des utilisateurs suivant les deux premiers contextes d'exploration : avec et sans contexte. De façon non surprenante, nous constatons une meilleure identification des graphiques lors de l'exploration avec contexte comparé à l'exploration sans contexte (voir Figure 39). Lors de l'exploration sans contexte, les participants ont en moyenne identifié correctement les graphiques dans 32,9 % ([22,1 % ; 43,7 %]) des essais. Lors de l'exploration avec contexte, les participants ont en moyenne identifié correctement les graphiques dans 60 % ([49,0 % ; 70,9 %]) des essais. Un test de Wilcoxon a montré une différence suivant le contexte d'exploration ($Z = -3,1$; $p < .01$).

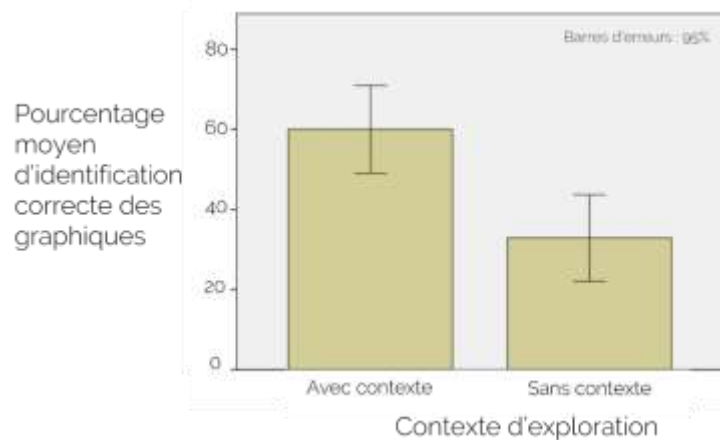


Figure 39. Pourcentage moyen d'identification correcte des graphiques en fonction du type d'exploration.

Nous avons aussi analysé la performance d'identification des graphiques en fonction de l'expertise utilisateur (voir Figure 40). Les participants experts ont, en moyenne, identifié correctement les graphiques dans 44,4 % (CI [27,4 % ; 61,5 %]) des essais pour l'exploration sans contexte et dans 67,5 % (CI [52,3 % ; 82,7 %]) pour l'exploration avec contexte. Les participants non experts ont, en moyenne, identifié correctement les graphiques dans 22,5 % (CI [8,9 % ; 36,0 %]) des essais pour l'exploration sans contexte et dans 52,5 % (CI [36,3 % ; 68,6 %]) pour l'exploration avec contexte.

Concernant les utilisateurs non experts, nous avons trouvé une différence entre les deux contextes d'exploration ($Z = -2,1$; $p = 0,001$). Nous n'avons pas trouvé de différence des deux contextes d'explorations suivant les utilisateurs experts.

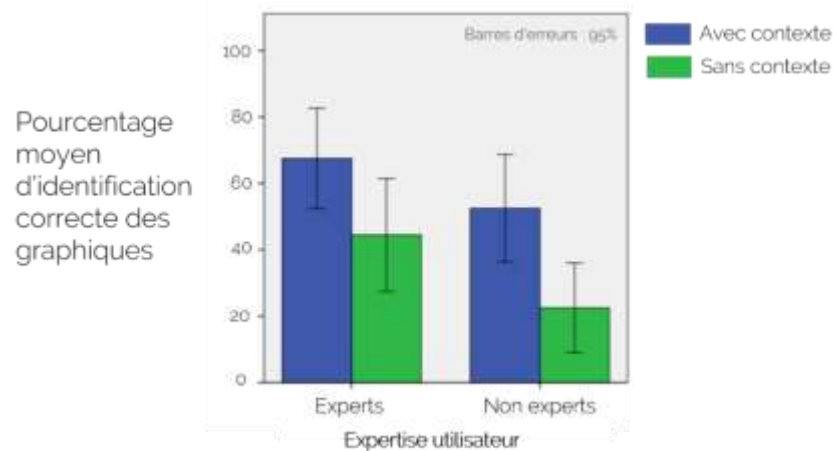


Figure 40. Pourcentage moyen d'identifications correctes des graphiques en fonction de l'expertise utilisateur et du contexte d'exploration.

5.7.1.2 EXPLORATION DIRIGEE

Les participants experts ont répondu correctement à la question posée dans 90 % des essais (CI [80,2 % ; 99,7 %]). Les participants non experts ont répondu correctement à la question posée dans 70 % des essais (CI [55,1 % ; 84,8 %]) (voir Figure 41).

Nous n'avons pas trouvé de différence liée à l'expertise utilisateur lors de l'exploration dirigée ($Z = -1,8$; $p = 0,09$).

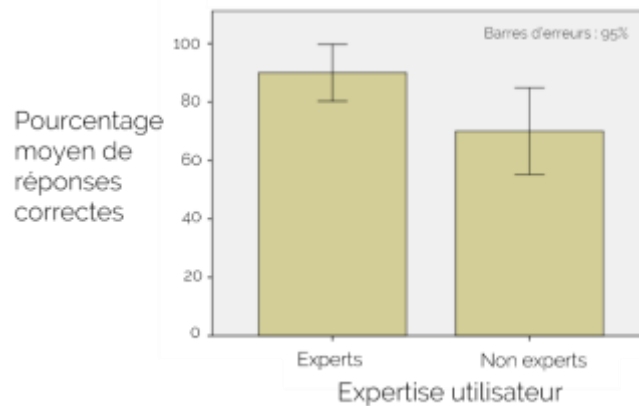


Figure 41. Pourcentage moyen des réponses correctes en fonction de l'expertise.

5.7.2 MOUVEMENTS DES MAINS LORS D'UNE EXPLORATION SANS CONTEXTE

Nous avons d'abord analysé les mouvements des mains lors de l'exploration sans contexte. Nous avons focalisé nos analyses sur le nombre moyen de fixations tactiles réalisées, le pourcentage de mouvements unimanuels vs. bimanuels, et les stratégies d'exploration. Pour chaque mesure, nous avons regardé les résultats dans leur globalité, puis selon l'expertise utilisateur, et enfin par type de graphique.

5.7.2.1 FIXATIONS TACTILES

5.7.2.1.1 RESULTATS GENERAUX

En moyenne, les participants ont effectué 8,8 (CI [7,6 ; 10,2]) fixations tactiles avec l’index gauche et 7 (CI [6,1 ; 8]) avec l’index droit (voir Figure 42 - gauche). Nous n’avons pas trouvé de différence significative liée au nombre moyen de fixations tactiles réalisées par l’index gauche et droit.

La durée moyenne d’une fixation tactile avec l’index gauche est de 1,5 s (CI [1,4 s ; 1,7 s]) et de 2, s (CI [1,6 s ; 2,3 s]) avec l’index droit (voir Figure 42 – droit). Nous n’avons pas trouvé de différence significative liée à la durée moyenne de fixations tactiles réalisé par l’index gauche et droit.

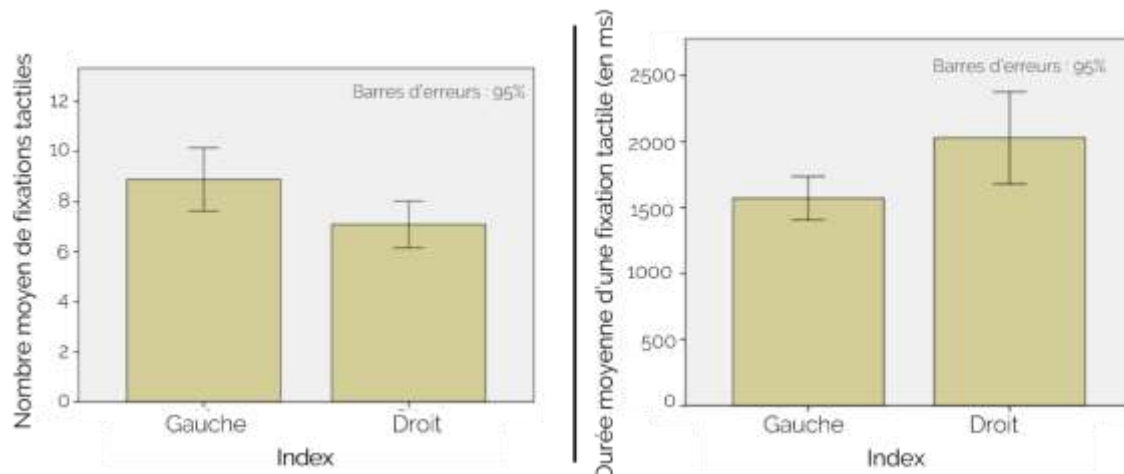


Figure 42. Fixations tactiles des index gauche et droit.

5.7.2.1.2 RESULTATS SELON L’EXPERTISE

Nous avons regardé le nombre et la durée moyens des fixations tactiles en fonction de l’expertise utilisateur (voir Figure 43).

Avec l’index gauche, les utilisateurs experts font en moyenne 6,1 fixations tactiles (CI [4,8 ; 7,5]) pour une durée moyenne de 1,4 s (CI [1,3 s ; 1,5 s]). Les utilisateurs non experts font en moyenne 11,1 fixations tactiles (CI [9,3 ; 12,9]) pour une durée moyenne de 1,7 s (CI [1,4 s ; 2 s]).

Pour l'index gauche, nous avons observé une différence du nombre moyen de fixations tactiles en fonction de l'expertise utilisateur ($Z = -3,4$; $p < .001$). Nous n'avons pas trouvé de différence significative liée à la durée moyenne d'une fixation tactile.

Avec l'index droit, les utilisateurs experts font en moyenne 5,8 fixations tactiles (CI [4,4 ; 7,2]) pour une durée moyenne de 2,2 s (CI [1,5 s ; 2,8 s]). Les utilisateurs non experts font en moyenne 8,1 fixations tactiles (CI [6,9 ; 9,3]) pour une durée moyenne de 1,8 s (CI [1,5 s ; 2,2 s]). Nous n'avons pas trouvé de différence significative liée au nombre et à la durée moyenne d'une fixation tactile.

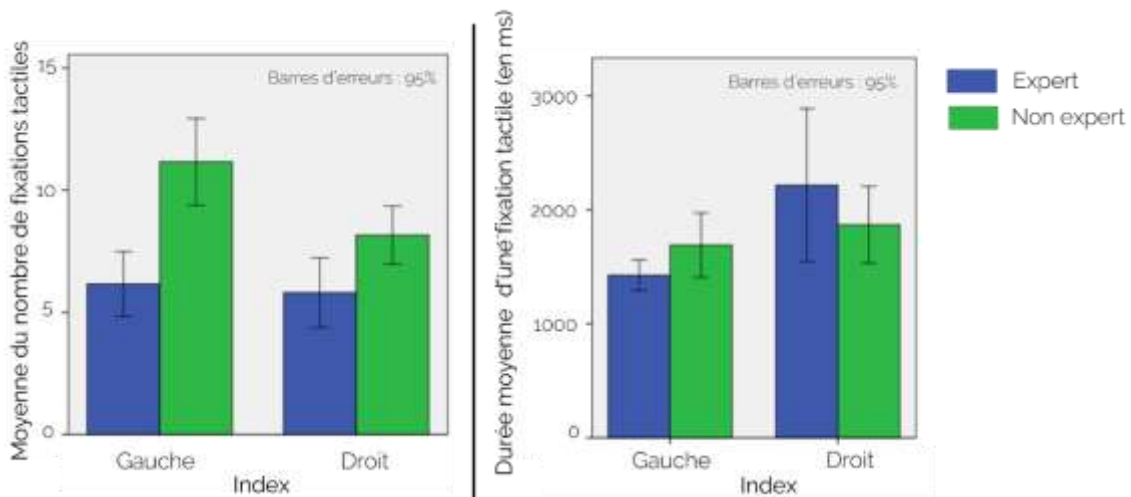


Figure 43. Fixations tactiles des index gauche et droit en fonction de l'expertise utilisateur.

5.7.2.2 MOUVEMENTS DES MAINS ET STRATEGIES

5.7.2.2.1 RESULTATS GENERAUX

En moyenne, les participants ont passé 56,6 % (CI [51,3 % ; 61,9 %]) du temps à explorer avec leurs deux mains simultanément. Ils ont passé 15,9 % (CI [12,8 % ; 18,9 %]) du temps avec la main gauche uniquement, et 17,5 % (CI [14,1 % ; 20,9 %]) du temps avec la main droite uniquement. Ils ont passé 7,1 % (CI [5,5 % ; 8,6 %]) du temps avec les deux mains immobiles, voir Figure 44.

Nous avons observé une différence dans temps d'exploration passé à explorer avec 0, 1 ou 2 mains ($\chi^2(3)=19,95$; $p<.001$). Nous avons aussi trouvé une différence concernant le temps des explorations à deux mains et à une main : gauche uniquement ($Z = -6,96$; $p<.001$), droite uniquement ($Z = -6,53$; $p<.001$). Il existe aussi une différence de temps passé avec les deux mains mobiles ou immobiles ($Z = -7,06$; $p<.001$). Pour finir, il existe aussi une différence de temps passé avec la main droite mobile uniquement et les deux mains immobiles ($Z = -5,57$; $p = 0,01$).

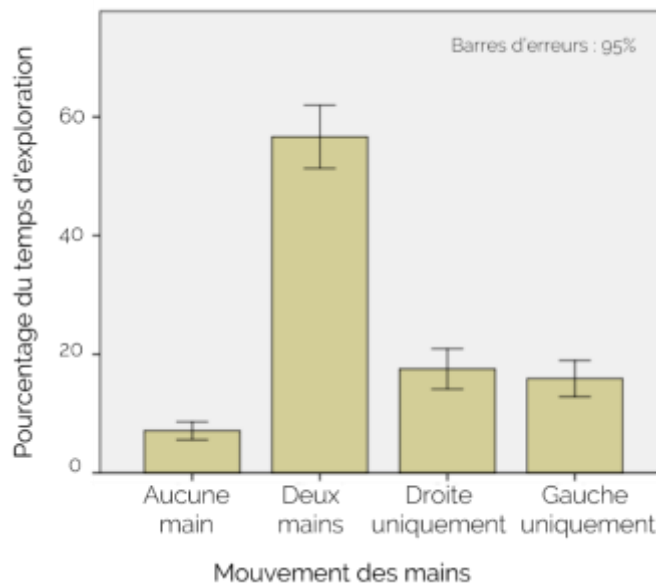


Figure 44. Pourcentage du temps d'exploration avec 0, 1 ou 2 mains mobile(s).

5.7.2.2.2 RESULTATS SELON L'EXPERTISE

Les participants experts ont passé 62,2 % (CI [54 % ; 70 %]) du temps à explorer avec leurs deux mains mobiles simultanément, 9,9 % (CI [6,9 % ; 13 %]) avec la gauche uniquement, 19,3 % (CI [13,6 % ; 25,1 %]) avec la main droite uniquement, et 5,2 % (CI [3,4 % ; 7 %]) avec les deux mains immobiles.

Les participants non experts ont passé 50,9 % (CI [44,3 % ; 57,6 %]) du temps à explorer avec leurs deux mains mobiles simultanément, 21,8 % (CI [17 % ; 26,5 %]) avec la gauche uniquement, 15,6

% (CI [11,8 % ; 19,4 %]) avec la main droite uniquement et 9 % (CI [6,63 % ; 11,36 %]) avec les deux mains immobiles.

Nous avons observé une différence selon l’expertise utilisateur pour l’exploration avec la main gauche uniquement ($Z = -3,29$; $p < .001$). Nous n’avons pas observé de différence de temps passé à explorer avec les deux mains, avec la main droite uniquement ou avec les deux mains immobiles, voir Figure 45.

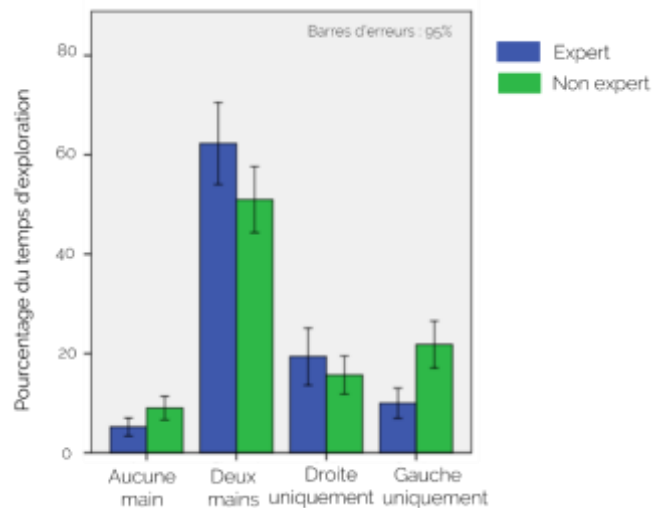


Figure 45. Pourcentage d’implication des mains selon l’expertise.

5.7.2.3 STRATEGIES D’EXPLORATION

Nous avons observé des stratégies de *périmètre* dans 33,5 % (CI [28,5 % ; 39 %]), la stratégie *point-de-référence* dans 11,5 % (CI [5,5 % ; 14 %]), la stratégie *cyclique* dans 44 % (CI [28 % ; 68 %]), la stratégie *allers-retours* dans 55,5 % (CI [43,5 % ; 78 %]). Nous n’avons pas observé de différences de stratégies dues à l’expertise utilisateur ou au type de graphiques.

5.7.3 MOUVEMENTS DES MAINS LORS D’UNE EXPLORATION AVEC CONTEXTE

Nous avons ensuite analysé les mouvements des mains lors de l’exploration avec contexte suivant le nombre moyen de fixations tactiles réalisées, le pourcentage de mouvements unimanuels vs. bimanuels, et les stratégies d’exploration.

5.7.3.1 FIXATIONS TACTILES

5.7.3.1.1 RESULTATS GENERAUX

En moyenne, les participants ont effectué 9,1 (CI [7,9 ; 10,4]) fixations tactiles avec l’index gauche et 6,3 (CI [5,4 ; 7,1]) avec l’index droit (voir Figure 46 - gauche). Nous avons trouvé une différence d’utilisation des index gauche et droit ($Z = -3,77$; $p < .001$).

La durée moyenne d’une fixation tactile avec l’index gauche est de 1,5 s (CI [1,4 s ; 1,6 s]) et de 2 s (CI [1,6 s ; 2,3 s]) avec l’index droit (voir Figure 46 – droit). Nous avons également trouvé une différence de temps moyen d’une fixation tactile entre les deux index ($Z = -2,11$; $p = 0,034$).

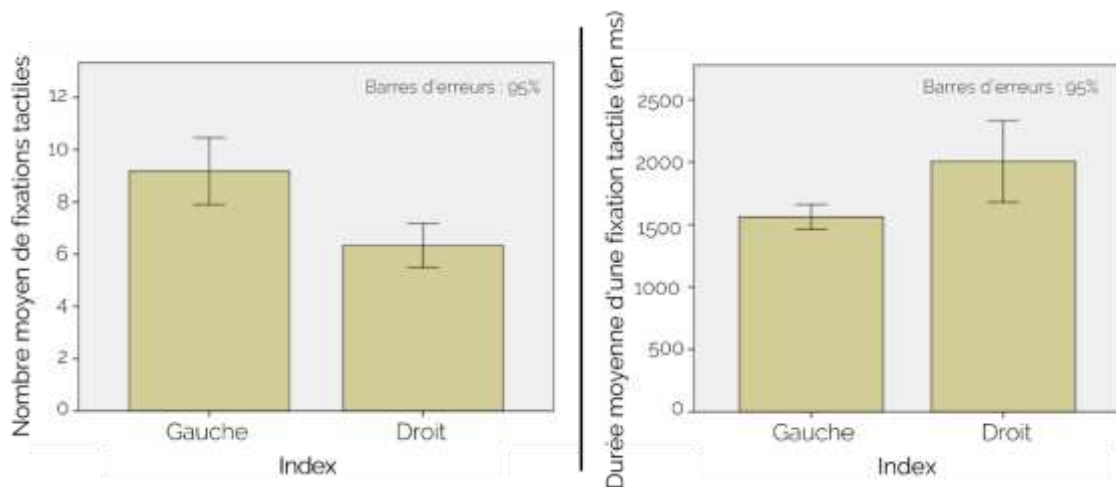


Figure 46. Fixations tactiles des index gauche et droit.

5.7.3.1.2 RESULTATS SELON L'EXPERTISE

Nous avons regardé le nombre et la durée moyens des fixations tactiles en fonction de l'expertise utilisateur (voir Figure 47).

Avec l'index gauche, les utilisateurs experts font en moyenne 6,4 fixations tactiles (CI [5 ; 7,7]) pour une durée moyenne de 1,5 s (CI [1,3 s ; 1,6 s]). Les utilisateurs non experts font en moyenne 11,9 fixations tactiles (CI [10 ; 13,8]) pour une durée moyenne de 1,5 s (CI [1,4 s ; 1,7 s]).

Pour l'index gauche, nous avons observé une différence du nombre moyen de fixations tactiles en fonction de l'expertise utilisateur ($Z = -3,83$; $p < .001$). Nous n'avons pas trouvé de différence de durée moyenne d'une fixation tactile.

Avec l'index droit, les utilisateurs experts font en moyenne 4,7 fixations tactiles (CI [3,8 ; 5,6]) pour une durée moyenne de 2,3 s (CI [1,7 s ; 2,9 s]). Les utilisateurs non experts font en moyenne 8 fixations tactiles (CI [6,8 ; 9,2]) pour une durée moyenne de 1,5 s (CI [1,4 s ; 1,7 s]).

Pour l'index droit, nous avons observé une différence du nombre moyen de fixations tactiles selon l'expertise utilisateur ($Z = -3,66$; $p < .001$). Nous avons aussi trouvé une différence de la durée moyenne d'une fixation tactile ($Z = -2$; $p = 0,04$).

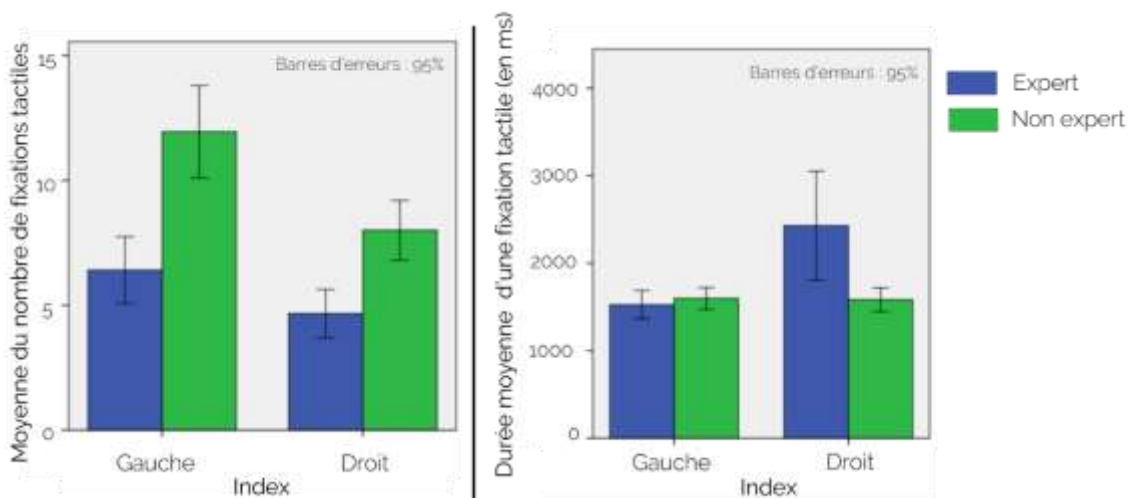


Figure 47. Fixations tactiles des index gauche et droit en fonction de l'expertise utilisateur.

5.7.3.2 MOUVEMENTS DES MAINS

5.7.3.2.1 RESULTATS GENERAUX

En moyenne, les participants ont passé 56,5 % (CI [51,9 % ; 61,1 %]) du temps à explorer avec leurs deux mains simultanément. Ils ont passé 20,3 % (CI [17,2 % ; 23,5 %]) du temps avec la main gauche uniquement, et 13,9 % (CI [10,4 % ; 17,4 %]) du temps avec la main droite uniquement. Ils ont passé 6,9 % (CI [5,6 % ; 8,2 %]) du temps avec les deux mains immobiles.

Nous avons observé une différence liée au temps d'exploration passé à explorer avec 0, 1 ou 2 mains ($\chi^2(3)=17,55$; $p<.001$). Nous avons aussi trouvé une différence concernant le temps des explorations à deux mains et à une main : gauche uniquement ($Z = -6,95$; $p<.001$), droite uniquement ($Z = -6,92$; $p<.001$). Il existe aussi une différence de temps passé avec les deux mains mobiles ou immobiles ($Z = -7,71$; $p<.001$). Pour finir, il existe aussi une différence de temps passé avec la main gauche mobile uniquement et les deux mains immobiles ($Z = -7,13$; $p = 0,01$), voir Figure 48.

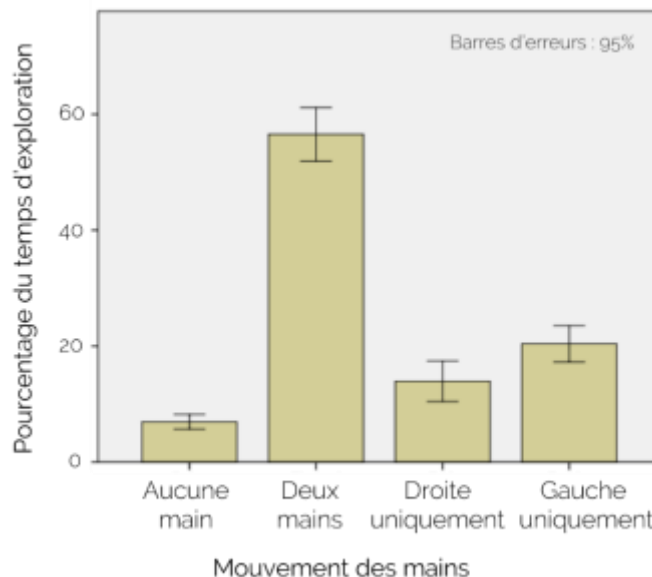


Figure 48. Pourcentage du temps d'exploration avec 0, 1 ou 2 mains mobile(s).

5.7.3.2.2 RESULTATS SELON L'EXPERTISE

Les participants experts ont passé 63 % (CI [55,6 % ; 70,5 %]) du temps à explorer avec leurs deux mains mobiles simultanément, 14,5 % (CI [11,3 % ; 17,6 %]) avec la gauche uniquement, 15,4 % (CI [8,8 % ; 22 %]) avec la main droite uniquement, et 4,6 % (CI [3,1 % ; 6,1 %]) avec les deux mains immobiles.

Les participants non experts ont passé 49,9 % (CI [45 % ; 54,8 %]) du temps à explorer avec leurs deux mains mobiles simultanément, 26,2 % (CI [21,4 % ; 31,1 %]) avec la gauche uniquement, 12,4 % (CI [9,7 % ; 15,1 %]) avec la main droite uniquement et 9,2 % (CI [7,3 % ; 11,1 %]) avec les deux mains immobiles.

Nous avons observé une différence selon l'expertise utilisateur pour l'exploration à deux mains ($Z = -2,93$; $p = 0,002$), et l'exploration avec la main gauche uniquement ($Z = -3,37$; $p < .001$), voir Figure 49.

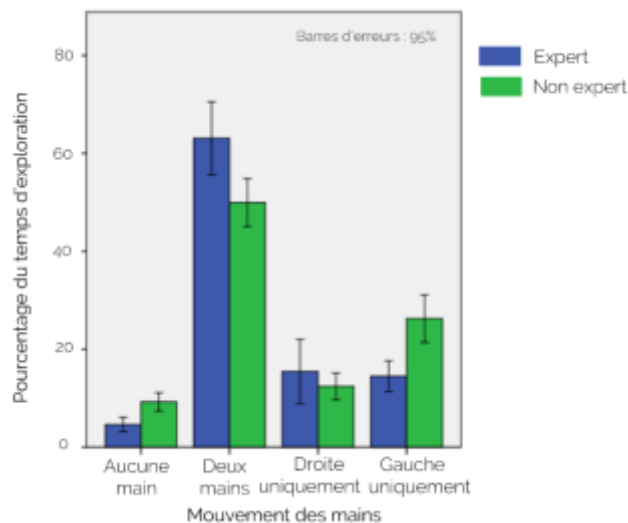


Figure 49. Pourcentage d'implication des mains selon l'expertise.

5.7.3.3 STRATEGIES D'EXPLORATION

Nous avons observé des stratégies de *périmètre* dans 42,5 % (CI [25 % ; 55 %]), la stratégie *point-de-référence* dans 7,5 % (CI [0 % ; 15 %]), la stratégie *cyclique* dans 32,5 % (CI [15 % ; 52,5 %]), la stratégie *allers-retours* dans 72,5 % (CI [57,5 % ; 100 %]). Nous n'avons pas observé de différences de stratégies dues à l'expertise utilisateur ou au type de graphiques.

5.7.4 MOUVEMENTS DES MAINS LORS D'UNE EXPLORATION DIRIGEE

Nous avons analysé les mouvements des mains lors de l'exploration dirigée suivant le nombre moyen de fixations tactiles réalisées, le pourcentage de mouvements unimanuels vs. bimanuels, et les stratégies d'exploration.

5.7.4.1 FIXATIONS TACTILES

5.7.4.1.1 RESULTATS GENERAUX

En moyenne, les participants ont effectué 10,2 (CI [8,6 ; 11,7]) fixations tactiles avec l'index gauche et 7,7 (CI [6,4 ; 9,1]) avec l'index droit (voir Figure 50 - gauche). Nous n'avons pas trouvé de différence significative liée aux nombres moyens de fixations.

La durée moyenne d'une fixation tactile avec l'index gauche est de 1,8 s (CI [1,5 s ; 2,2 s]) et de 2,4 s (CI [1,9 s ; 2,8 s]) avec l'index droit (voir Figure 50 – droit). Nous n'avons pas trouvé de différence significative liée à la durée moyenne de fixations.

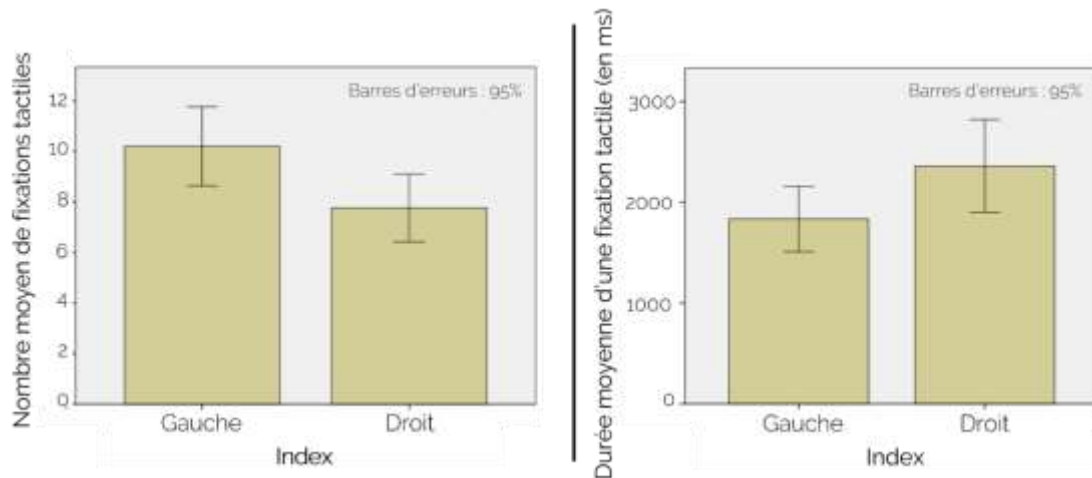


Figure 50. Fixations tactiles des index gauche et droit.

5.7.4.1.2 RESULTATS SELON L'EXPERTISE

Nous avons regardé le nombre et la durée moyens des fixations tactiles en fonction de l'expertise utilisateur (voir Figure 51).

Avec l'index gauche, les utilisateurs experts font en moyenne 8,4 fixations tactiles (CI [6,7 ; 10,2]) pour une durée moyenne de 1,6 s (CI [1,3 s ; 1,8 s]). Les utilisateurs non experts font en moyenne 11,9 fixations tactiles (CI [9,4 ; 14,4]) pour une durée moyenne de 2,1 s (CI [1,5 s ; 2,7 s]). Nous n'avons pas trouvé de différence liée au nombre moyen et à la durée moyenne d'une fixation tactile.

Avec l'index droit, les utilisateurs experts font en moyenne 6,1 fixations tactiles (CI [4,7 ; 7,5]) pour une durée moyenne de 2,4 s (CI [1,7 s ; 3,1 s]). Les utilisateurs non experts font en moyenne 9,4 fixations tactiles (CI [7,1 ; 11,6]) pour une durée moyenne de 2,3 s (CI [1,6 s ; 2,9 s]). Nous n'avons pas trouvé de différence liée au nombre moyen et à la durée moyenne d'une fixation tactile.

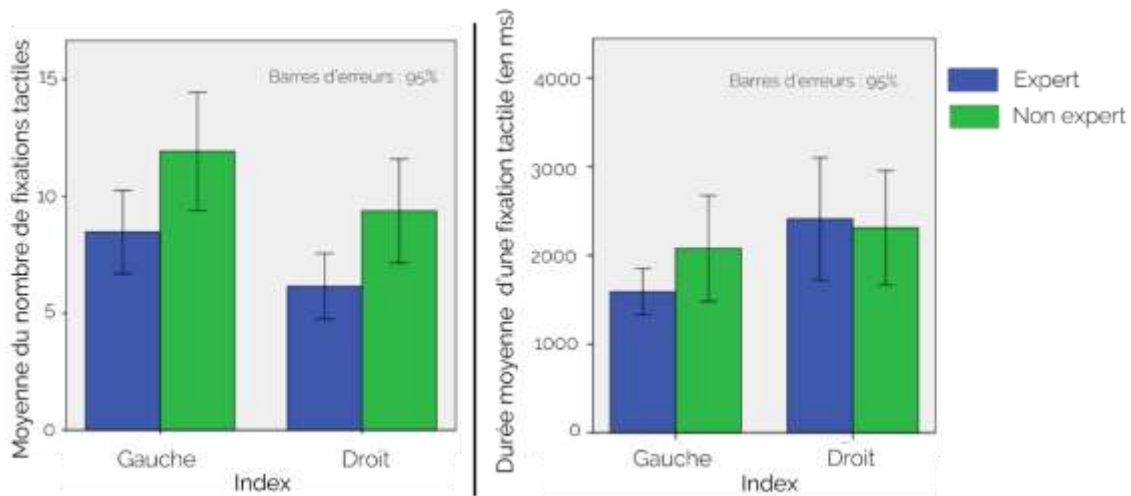


Figure 51. Fixations tactiles des index gauche et droit en fonction de l'expertise utilisateur.

5.7.4.2 MOUVEMENTS DES MAINS

5.7.4.2.1 RESULTATS GENERAUX

En moyenne, les participants ont passé 48,4 % (CI [43,2 % ; 53,6 %]) du temps à explorer avec leurs deux mains simultanément. Ils ont passé 21,9 % (CI [18,6 % ; 25,4 %]) du temps avec la main gauche uniquement, et 18,7 % (CI [15,1 % ; 22,2 %]) du temps avec la main droite uniquement. Ils ont passé 8,8 % (CI [6,9 % ; 10,6 %]) du temps avec les deux mains immobiles.

Nous avons observé une différence dans le temps d'exploration passé à explorer avec 0, 1 ou 2 mains ($\chi^2(3)=19,95$; $p<.001$). Nous avons aussi trouvé une différence concernant le temps des explorations à deux mains et à une main : gauche uniquement ($Z = -5,71$; $p<.001$), droite uniquement ($Z = -5,86$; $p<.001$). Il existe aussi une différence de temps passé avec les deux mains mobiles ou immobiles ($Z = -7,25$; $p<.001$). Pour finir, il existe aussi une différence de temps passé avec la main gauche mobile uniquement et les deux mains immobiles ($Z = -5,14$; $p = 0,04$) et avec la main droite mobile uniquement et les deux mains immobiles ($Z = 6,36$; $p = 0,04$), voir Figure 52.

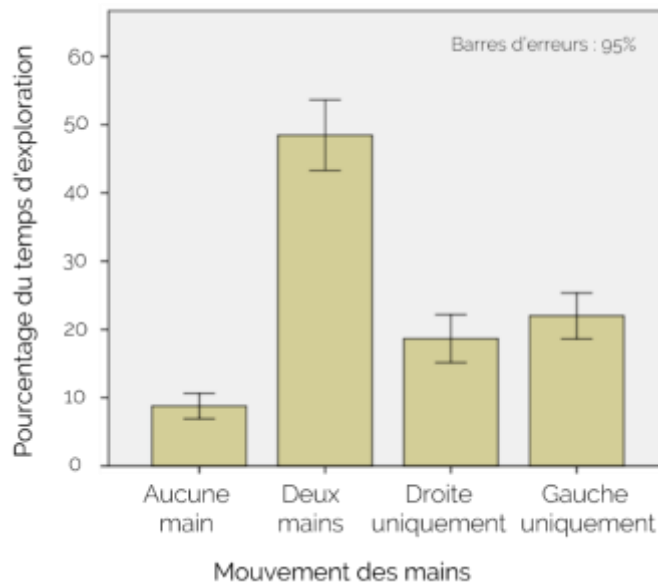


Figure 52. Pourcentage du temps d'exploration avec 0, 1 ou 2 mains mobile(s).

5.7.4.2.2 RESULTATS SELON L'EXPERTISE

Les participants experts ont passé 54,4 % (CI [46,9 % ; 62,3 %]) du temps à explorer avec leurs deux mains mobiles simultanément, 18,9 % (CI [15 % ; 22,9 %]) avec la gauche uniquement, 20,5 % (CI [14,4 % ; 26,5 %]) avec la main droite uniquement et 6,7 % (CI [4,9 % ; 8,6 %]) avec les deux mains immobiles.

Les participants non experts ont passé 42,5 % (CI [36 % ; 48,9 %]) du temps à explorer avec leurs deux mains mobiles simultanément, 25 % (CI [19,5 % ; 30,4 %]) avec la gauche uniquement, 16,8 % (CI [13,1 % ; 20,6 %]) avec la main droite uniquement et 10,8 % (CI [7,6 % ; 13,9 %]) avec les deux mains immobiles. Nous n'avons pas trouvé de différence liée aux mouvements des mains suivant l'expertise utilisateur voir Figure 53.

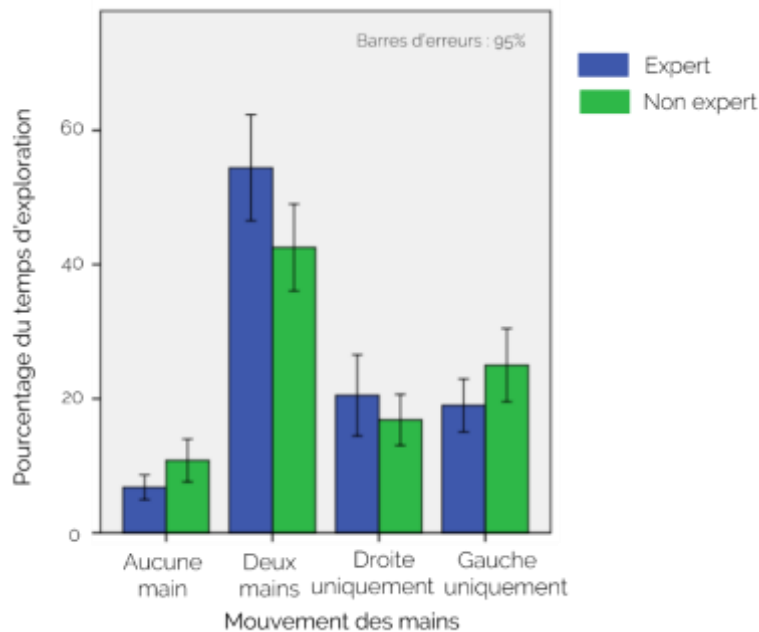


Figure 53. Pourcentage d'implication des mains selon l'expertise.

5.7.4.3 STRATEGIES D'EXPLORATION

Nous avons observé des stratégies de *périmètre* dans 15,5 % (CI [7,5 % ; 21,5 %]), la stratégie *point-de-référence* dans 19 % (CI [9 % ; 36 %]), la stratégie *cyclique* dans 23 % (CI [12,5 % ; 34 %]), la stratégie *allers-retours* dans 89 % (CI [79 % ; 100 %]). Nous n'avons pas observé de différences de stratégies dues à l'expertise utilisateur ou au type de graphiques.

5.8 DISCUSSION

Nous avons introduit une nouvelle mesure pour l’analyse des parcours utilisateurs que nous avons appelé fixations tactiles. Basé sur ces fixations, nous avons analysé nos résultats en termes de mouvement des mains et stratégies utilisateurs.

Nos différentes mesures ont montré une différence d’expertise utilisateur lors de l’exploration des graphiques en relief. L’analyse des résultats a révélé une différence d’expertise en nombre et temps moyen des fixations tactiles des index gauche et droit. En effet, les participants experts réalisent moins de fixations tactiles que les participants non experts et ces fixations tactiles durent moins longtemps.

L’analyse du mouvement des mains nous montre que les participants passent plus de la moitié du temps d’exploration à explorer avec les deux mains simultanément. Ce résultat est intéressant, car il montre bien que, quelle que soit l’expertise utilisateur, une exploration bimanuelle est mise en place par les utilisateurs.

Nous avons également observé des différences suivant le contexte d’exploration : les participants effectuent plus de fixations tactiles (gauche ou droite) lors de l’exploration dirigée. Ce résultat est conforté par les stratégies d’exploration utilisées. Tandis que la stratégie *périmètre* est moins utilisée, la stratégie *allers-retours* est largement utilisée par les participants. Ainsi, les participants adaptent leurs stratégies suivant la tâche demandée.

6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons décrit les études portant sur l'analyse des mouvements des mains sur différents types de graphiques et suivant différents niveaux d'expertise utilisateur. Ces études nous ont permis de mieux comprendre comment les personnes déficientes visuelles explorent des graphiques en relief. Nous avons pu constater que l'expertise de l'utilisateur impacte son exploration. De manière générale, les utilisateurs experts parcourent une plus grande distance avec leurs mains et leurs mains sont plus souvent en mouvement : ils font moins de fixations tactiles, et utilisent les deux mains de manière simultanée plus fréquemment que chez les utilisateurs non experts. Nos études ont donc mis en évidence l'importance du mouvement des mains dans l'exploration tactile : ils utilisent leurs deux mains de manière simultanée. Ce résultat est important, car peu d'études proposent une interaction bimanuelle lors de l'exploration de graphiques numériques.

Les résultats de ces deux études devraient être étendus : une analyse plus fine permettrait de mieux appréhender l'exploration de graphiques en relief, notamment lorsque les deux mains explorent de manière simultanées. Des directives générales de conception de graphiques numériques pourrait être permettaient de adapter le graphiques aux besoins utilisateurs. De plus, la méthode de suivi de main peut être utilisée dans le domaine de la psychologie expérimentale pour mieux comprendre le rôle de chaque doigt lors de l'exploration tactile. Elle peut également être utilisée pour répondre à des questions de conception spécifiques en fonction des types de graphiques, des tâches et des utilisateurs ciblés.

CHAPITRE 4

EXPLORATION INTERACTIVE DE CARTES NUMERIQUES

Structure du chapitre

- 1 Introduction
- 2 Exploration numérique non-visuelle de données géospatiales
- 3 Études des techniques d'interaction pour explorer des cartes numériques
- 4 Conclusion du chapitre

Publications associées

S. Bardot, M. Serrano, C. Jouffrais. From tactile to virtual: using a smartwatch to improve spatial map exploration for visually impaired users. MobileHCI'16

S. Bardot, M. Serrano, S. Perrault, S. Zhao, C. Jouffrais. Investigating Feedback for Two-Handed Exploration of Digital Maps without Vision. Interact'19

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE ET OBJECTIF

Les cartes numériques sur des surfaces tactiles constituent une alternative pratique aux cartes physiques en relief pour les utilisateurs déficients visuels. Pour compenser l'absence d'informations tactiles, elles fournissent un retour auditif et/ou vibrotactile.

Notre premier projet a été inspiré par une étude sur l'exploration de données non visuelles à l'aide d'un filtrage de données (voir section 1.3.2.1.1). [190] a conçu un appareil qui s'appuie sur des vues multiples pour accéder aux données démographiques : l'utilisateur peut accéder aux données soit par un tableur (par exemple Excel), soit par une carte numérique. Dans ce système, les utilisateurs peuvent filtrer les données du tableur, puis changer de vue afin de naviguer directement sur la carte numérique à l'aide du clavier. En utilisant cette fonction de filtrage, ils n'entendent que les données sélectionnées. Nous nous sommes concentrés sur l'objectif d'améliorer l'accès aux données d'une carte numérique en fournissant à l'utilisateur un retour localisé en s'appuyant sur une montre connectée. Le retour localisé permet directement à l'utilisateur de savoir quelle main a déclenché l'interaction.

Sur des surfaces tactiles, le retour est ambigu en cas d'utilisation de plusieurs doigts : les utilisateurs peuvent ne pas identifier le doigt qui a déclenché l'interaction (voir section 1.3.2.2.1). Généralement, c'est la surface tactile qui vibre, le retour est donc non localisé. Pour résoudre ce problème, dans notre deuxième projet, nous avons exploré l'utilisation de retour bilatéral pour l'exploration de cartes numériques. Ainsi, les utilisateurs déficients visuels peuvent explorer la carte en utilisant les deux mains. Nous avons d'abord créé un espace de conception pour cette interaction bimanuelle, qui combine deux dimensions : la localisation spatiale et la similarité. Nous avons étudié la similarité, car l'utilisation de voix différentes et l'utilisation de différents motifs vibratoires peuvent aider les utilisateurs à se concentrer sur chaque retour indépendamment [108].

Pour ces deux projets, nous nous sommes limités à l’exploration de cartes numériques. Nous verrons dans la section 2.1.2 comment adapter nos techniques d’interaction aux autres types de graphiques.

1.2 QUESTION DE RECHERCHE

Au cours des deux projets, nous avons voulu répondre aux problématiques de recherches suivantes :

- Comment une montre connectée peut permettre l’**exploration non**-visuelle des cartes interactives numériques ? Nous avons décrit plusieurs projets de recherches permettant d’explorer des cartes interactives numériques. Principalement, ils reposent sur des interactions avec un seul doigt. Nous avons développé et évalué des techniques d’interaction permettant d’explorer avec les deux mains (et plus précisément avec les deux index) avec un retour localisé sur chaque main. Le retour localisé est réalisé grâce à la montre connectée.
- Quelles combinaisons d’indices audio et/ou haptiques provenant d’une ou de plusieurs montres connectées peuvent améliorer l’exploration des cartes numériques ? Des projets de recherches ont étudié les limites du *cocktail party effect* [50] tout en étant attentif à une tâche donnée. Le *cocktail party effect* est l’attention auditive d’une personne dans un contexte bruyant. Nous avons défini un espace de conception afin de connaître les meilleures combinaisons d’indices audio et haptiques permettant d’améliorer l’exploration bimanuelle de cartes numériques. Les techniques issues de cet espace de conception ont été évaluées dans des expériences utilisateurs.

1.3 STRUCTURE DU CHAPITRE

Dans la section 2, nous décrivons les techniques d'interaction développées pour l'exploration de données spatiales avec une montre connectée. Nous détaillons la construction de cartes numériques ainsi que le choix de la montre connectée. Dans la section 3, nous décrivons les études réalisées auprès de personnes déficientes visuelles et les résultats de celles-ci. D'abord, nous présentons les études avec une exploration à une main puis les études faites pour une exploration à deux mains. Enfin dans la section 4, nous discutons des avantages et les limites du système (à une main et deux mains).

2 EXPLORATION NUMERIQUE NON-VISUELLE DE DONNEES GEOSPATIALES

2.1 CONCEPTION DE CARTES : INFORMATIONS REPRESENTEES

Transformer des cartes tactiles en relief en cartes numériques accessibles pour les utilisateurs déficients visuels n'est pas simple. Nous devons d'abord analyser la disposition et le contenu des cartes en relief, puis identifier les éléments à préserver pour concevoir des cartes numériques accessibles.

Les cartes en relief présentent deux avantages principaux : l'information est en relief et l'exploration est directe. Ces cartes sont réalisées selon des directives : simplification des contours, réduction du nombre d'éléments, légendes [157] (voir Figure 54). Ces cartes en relief contiennent des éléments importants :

- Le contour des surfaces, rendu à travers les lignes surélevées, généralement représenté par des traits pleins ;

- Les points d'intérêt et étiquettes représentées par des symboles tactiles spécifiques. Ces symboles sont généralement simples et facilement reconnaissables comme des triangles ou des ronds ;
- Une légende en braille décrivant chaque zone et chaque point d'intérêt. La légende n'est pas nécessairement présente sur la carte, la légende se trouve dans certains cas sur une autre feuille en relief ;
- Des données associées à chaque zone ou point d'intérêt, par exemple la population d'une région.



Figure 54. Exemple de carte utilisée en école spécialisée.

De plus, l'exploration tactile de cartes en relief repose sur des stratégies comportementales. Par exemple, Hill *et al.* [62] ont observé des stratégies spécifiques pour l'élaboration de mise en relations des éléments. Dans la section 2.5.3, nous avons observé des comportements similaires lorsque les utilisateurs déficients visuels explorent les cartes en relief : ils reviennent souvent sur des objets ou des zones déjà explorés, mais ils adoptent aussi des stratégies plus globales, comme

le parcours de l'image de gauche à droite et de haut en bas. Enfin, il est important de noter que les cartes en relief s'appuient sur l'exploration bimanuelle.

L'important est de préserver ces stratégies lors de l'exploration des cartes numériques. Nous avons donc utilisé le suivi de la main et nous avons utilisé les fonctions auditives et vibrotactiles de la montre connectée pour transmettre l'information qui se trouve sous la main.

2.2 AVANTAGES D'UNE SOLUTION BASEE SUR LE SUIVI DE LA MAIN POUR L'EXPLORATION DIRECTE

L'exploration directe en utilisant un système de suivi des mains au lieu d'écrans capacitifs offre plusieurs avantages pour les personnes déficientes visuelles. Premièrement, elles ont tendance à poser plusieurs doigts et la paume de la main sur la surface, ce qui, en l'absence de retour visuel, génère des événements inattendus [16]. Au lieu de cela, le suivi de la main peut simplement associer un point à chaque main ou doigt. Deuxièmement, le suivi du mouvement de la main permet de capturer des gestes effectués en l'air, par exemple pour modifier le niveau d'information de la carte en levant la main.

Enfin, des solutions mobiles et peu coûteuses de suivi du mouvement des mains ont récemment été proposées [98], qui pourraient permettre de rendre l'exploration des cartes numériques possible dans différents contextes et sur différentes surfaces, comme un bureau ordinaire, sans avoir besoin d'une surface sensible au toucher.

2.3 DISPOSITIF MOBILE ET PERSONNEL : LA MONTRE CONNECTEE

Des travaux récents ont montré l'intérêt des personnes déficientes visuelles pour les dispositifs à porter [186], et en particulier pour les montres connectées : elles sont petites, discrètes à porter. Le poignet est la partie préférée du corps [128]. Les montres actuelles ont l'avantage d'inclure des haut-parleurs et un retour vibratoire.

Par conséquent, nous avons décidé d'utiliser une montre connectée pour des cartes numériques. Nous avons utilisé la montre à la fois comme point d'entrée et de sortie. En entrée, l'écran tactile de l'appareil est utilisé pour filtrer les données en effectuant de simples gestes de balayages horizontaux ou verticaux. En sortie, l'appareil est utilisé avec la synthèse vocale, pour lire par exemple le nom des régions. Le retour vibratoire est également utilisé pour restituer des informations, comme la position des points d'intérêt ou des frontières entre les régions. Ainsi, nous avons utilisé la synthèse vocale pour la description des éléments et la vibration pour la position des éléments. Nous avons identifié différentes correspondances entre ces modalités d'entrée/sortie et la tâche d'exploration cartographique. Nous avons conçu trois techniques d'exploration différentes (Directe, Filtre et Grille) basées sur la montre. Ces trois techniques permettent différents accès aux informations de la carte. L'exploration Directe donne toutes les informations de la carte. Nous avons vu plusieurs manières de découper l'information : avec un filtrage des données ou avec une grille [190]. Le découpage avec une grille permet à l'utilisateur d'accéder aux informations de chaque cellule. L'utilisateur n'accède plus à la carte numérique mais explore de cellule en cellule. Ainsi, nous proposons une technique Filtre et une technique Grille.

2.4 TECHNIQUES D'EXPLORATION AVEC UNE MAIN

2.4.1 EXPLORATION DIRECTE

L'exploration Directe est une exploration de carte numérique équivalente à une exploration de carte physique thermogonflée. Elle consiste à parcourir une carte numérique composée de régions (voir Figure 55). Les informations de la région sous la main sont restituées à l'aide de la montre connectée. Pour cette technique, la montre connectée est utilisée uniquement en sortie : nous avons combiné un retour auditif (avec la synthèse vocale) et vibratoire.

La synthèse vocale restitue les informations présentes sous la main, telles que le nom des régions et sa population. Une vibration de 100 ms correspond à la transition (la frontière) d'une région à

une autre. Une vibration continue signifie que la main est en dehors de la carte numérique. L'avantage de cette technique est sa simplicité. Par contre, l'utilisateur peut facilement manquer des petites régions.

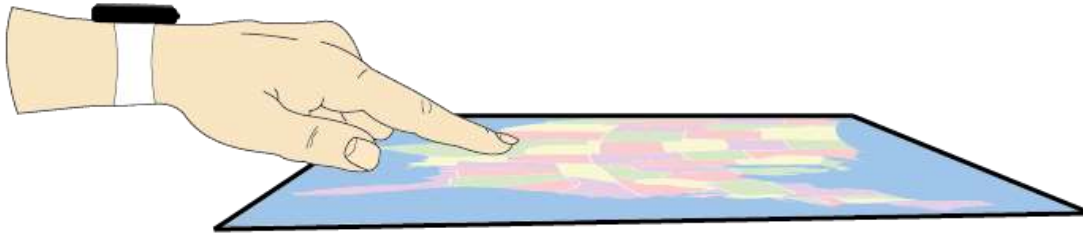


Figure 55. Exploration Directe : L'utilisateur parcourt la carte avec son doigt.

2.4.2 EXPLORATION FILTRE

Le filtrage des données avant l'exploration permet de réduire la quantité d'informations à restituer par la synthèse vocale. La charge cognitive de l'utilisateur est donc réduite. Le filtrage permet de sélectionner une sous-gamme de données, par exemple les régions qui cultivent du tournesol. Pour effectuer le filtrage, les utilisateurs font des balayages sur la montre. Une succession de balayages horizontaux sur la montre lit les données du filtre, voir Figure 56. Un *double-tap* sélectionne le filtre courant.

Après filtrage, seules les données correspondant au filtre sélectionné sont lues. Selon l'état du filtre, la synthèse vocale lit les informations présentes sous le doigt, telles que le nom de la région et sa population. Comme pour l'exploration Directe, une vibration de 100 ms signale la transition d'une région à une autre. Une vibration continue signifie que la main est en dehors de la carte numérique.

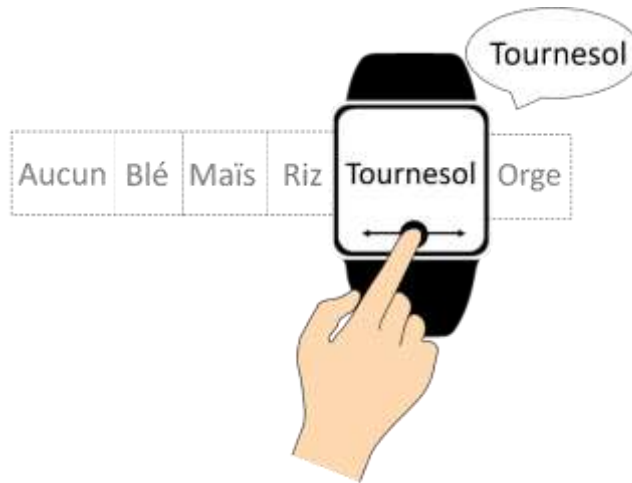


Figure 56. Pour sélectionner une donnée (filtre sémantique ou bon mot), il faut effectuer un balayage vertical.

2.4.3 EXPLORATION GRILLE

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le filtrage peut réduire le temps d'exploration et la charge cognitive de l'utilisateur. Cependant, il peut être difficile de trouver certaines régions sur une carte, surtout si elles sont petites. Pour avoir un aperçu complet d'une carte sans manquer aucune région, une solution consiste à utiliser une grille de 3x3 cellules [190], et ainsi lire les informations concernant toutes les régions contenues dans chaque cellule de la grille. Nous avons fait le choix de découper la grille en 3x3 cellules car ce découpage référence à un modèle mental connus des personnes déficientes visuelles (avec l'utilisation du pavé numérique). L'utilisateur ne se déplace plus de région en région, mais d'une cellule de la grille à une autre.

Cependant, lorsque des régions sont regroupées dans une cellule de la grille, les relations spatiales entre les régions sont masquées. En effet, lorsque la synthèse vocale lit la liste des régions présentes

au sein d'une cellule, il est impossible de connaître les positions spatiales relatives des régions. Pour surmonter cette limitation, nous avons combiné l'exploration Grille avec l'exploration Directe. L'utilisateur peut utiliser une technique d'exploration ou une autre en fonction de la hauteur de sa main au-dessus de la carte. Lorsque la main est posée sur la surface, l'utilisateur explore la carte de région en région (exploration Plain). Lorsque la main se déplace au-dessus de la carte, l'utilisateur explore la carte en utilisant la grille, comme illustré sur la Figure 57.

Au niveau de la carte, l'interaction est identique à la technique présentée ci-dessus. Au niveau de la grille, une vibration de 100 ms notifie la limite entre deux cellules de la grille. Une double vibration avertit l'utilisateur lorsqu'il change de mode d'exploration, c'est-à-dire lorsqu'il lève ou baisse sa main.

Il peut arriver que des cellules de la grille chevauchent une seule région. Afin de ne pas répéter d'information et ne pas surcharger cognitivement l'utilisateur, la région est associée à une seule cellule de la grille. Nous avons joint la région dans laquelle se trouve la plus grande aire à la cellule de la grille correspondante.

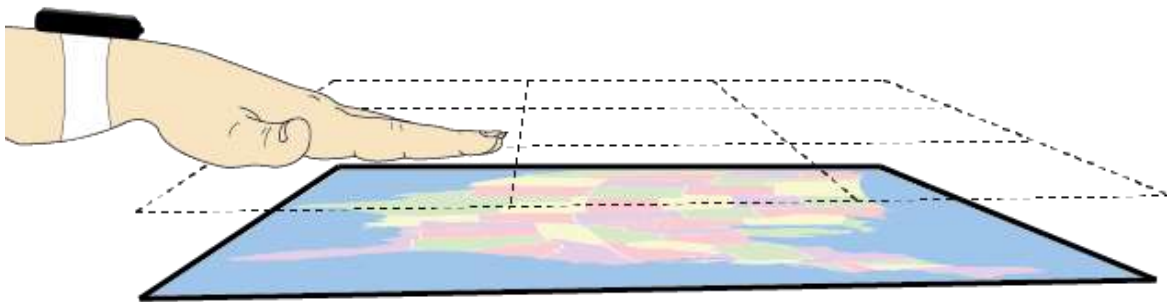


Figure 57. L'utilisateur accède à la grille en hauteur.

2.5 ESPACE DE CONCEPTION POUR UNE EXPLORATION A DEUX MAINS

Les trois techniques précédentes sont utilisées avec une seule main pour l'exploration. Or, dans la section 2.5.3, nous avons identifié différentes stratégies d'exploration bimanuelle sur des

graphiques en relief. Afin de préserver ces stratégies et notamment l'utilisation de la deuxième main lors de l'exploration, nous avons étudié comment rendre possible une exploration bimanuelle sur des cartes numériques.

Une exploration à deux mains exige des retours adéquats : l'utilisateur doit pouvoir savoir quelle main à déclencher le retour. Nous nous sommes intéressés aux possibles combinaisons de sorties. Ainsi, pour étudier l'effet des retours bilatéraux, nous avons proposé un espace de conception basé sur la combinaison de deux facteurs : la localisation du retour (unilatéral ou bilatéral) et la similarité du retour (retour identique ou différent). L'utilisation de différents retours peut aider à identifier le doigt qui l'a déclenché [108]. Par exemple, l'utilisation de voix différentes (un homme ou une femme) et différents modèles de vibration (long ou court) peut aider à identifier la main qui l'a déclenché.

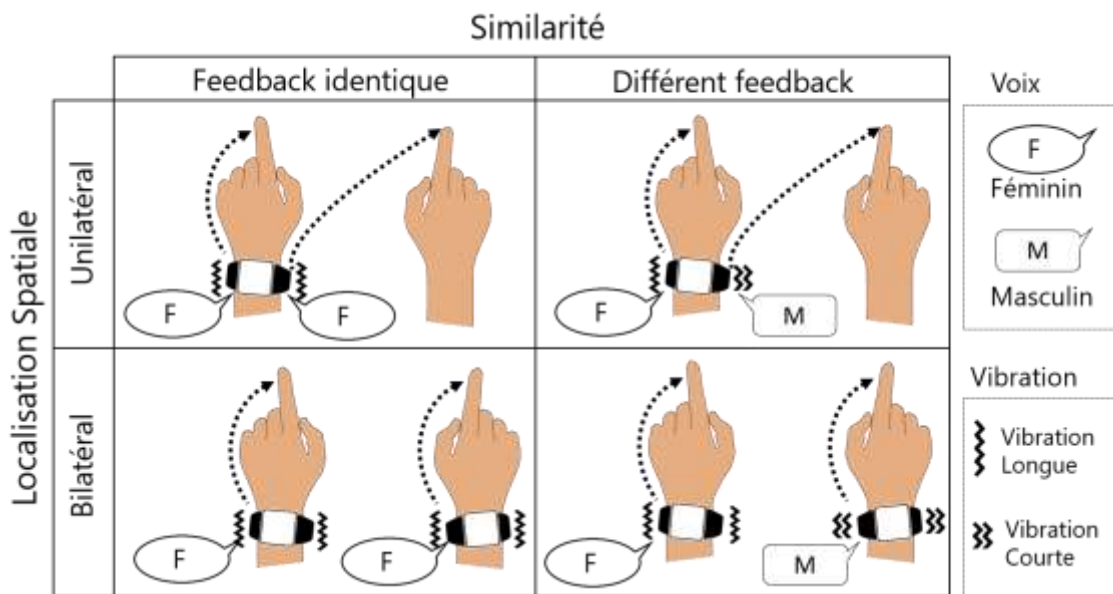


Figure 58 : Notre espace de conception combine deux dimensions de retour : la localisation spatiale (unilatérale, bilatérale) et la similarité (identique, différente).

La combinaison de ces deux facteurs de conception a abouti à quatre techniques d'interaction, voir Figure 58 : 1) unilatérale avec un retour identique pour les deux mains (U-SF) ; 2) unilatéral avec

un retour différent pour chaque main (U-DF) ; 3) bilatéral avec les mêmes retours pour les deux mains (B-SF) ; et 4) bilatéral avec des retours différents pour chaque main (B-DF).

Pour les conditions avec des retours différents (U-DF et B-DF), nous avons utilisé une voix féminine et une vibration longue pour la main gauche, et une voix masculine et deux vibrations courtes pour la main droite. Pour les conditions unilatérales (U-SF et U-DF), si l'utilisateur bouge les deux mains en même temps, le retour correspond au dernier mouvement de la main détecté.

Il est intéressant de noter que la condition U-SF est similaire à l'exploration d'une carte interactive numérique sur un écran tactile lorsque vous utilisez deux doigts (par exemple, exploration d'une carte sur une tablette avec VoiceOver activée).

3 ÉTUDES DES TECHNIQUES D'INTERACTION POUR EXPLORER DES CARTES NUMERIQUES

3.1 PART A : ETUDES DES TECHNIQUES D'EXPLORATION UNIMANUELLES

Nous avons dans un premier temps étudié l'utilisabilité de la montre connectée pour explorer des cartes numériques à une main. Les deux évaluations effectuées se font avec un seul point de contact sur la carte.

3.1.1 DISPOSITIF EXPERIMENTAL POUR LES ETUDES AVEC UNE SEULE MAIN

3.1.1.1 CREATION DE CARTES NUMERIQUES

Ces cartes ont été produites en utilisant l'algorithme de Voronoi [36]. Cet algorithme nous a permis de configurer et générer des régions de manière aléatoire. Les régions ainsi créées ont des formes et tailles différentes. La taille des cartes est fixe au format A3 (29.7 x 42 cm). Nous avons choisi ce format car c'est le format préféré des personnes déficientes visuelles [19].

3.1.1.2 SYSTEME DE SUIVI DE LA MAIN

Le système de suivi de la main est basé sur l'utilisation du système Optitrack. Dans notre dispositif Optitrack, huit caméras optiques à infrarouge capturent la position 3D (x, y et z) des marqueurs à fréquence de 100HZ avec 1 mm de précision. Des marqueurs ont été positionnés autour de l'index de chaque main ainsi que sur les bords de la surface de travail délimités par un rebord physique (voir Figure 59).



Figure 59. À gauche : configuration expérimentale avec les caméras ; à droite : marqueurs sur le doigt.

3.1.1.3 MONTRE CONNECTEE

Nous avons utilisé une montre autonome Android SimValley AW-414 (91 grammes, 45.3x44.3x14.1 mm, écran tactile de 28x28 mm) avec la synthèse vocale de Google. Nous avons utilisé des sockets TCP sur un réseau local Wi-Fi pour connecter la montre et le système Optitrack à l'ordinateur principal (Dell Latitude E6430s, Windows 7).

Afin de définir les différents paramètres de la montre, notamment la vitesse et le volume de la synthèse vocale, nous avons réalisé calibrages. Nous avons défini la vitesse de la synthèse vocale deux fois supérieure à la synthèse vocale par défaut. Le retour vibratoire a été réglé à 100 ms lorsqu'un utilisateur traverse une frontière entre deux régions ou entre deux cellules pour la technique Grille. Une double vibration de 100 ms signifie le passage entre la technique Grille à

Directe ou vice-versa. Enfin, une vibration continue indique à l'utilisateur que sa main est située en dehors des limites de la carte.

Concernant les interactions avec la montre, nous avons utilisé les paramètres par défaut pour détecter les gestes de balayage ainsi que pour détecter le *double-tap*. Nous avons défini les paramètres de distance et de vitesse lors de tests utilisateurs pour nous assurer que les balayages verticaux pouvaient être effectués facilement.

3.1.2 ÉTUDE 1 : COMPARAISON DES TECHNIQUES DIRECTE, FILTRE, GRILLE

Le but de cette première étude était de comparer l'efficacité de nos trois techniques à la technique usuelle (cartes imprimées en relief). Cette étude se concentrait sur l'exploration de cartes numériques ou physiques. Nous avons comparé les 3 techniques décrites ci-dessus sur des cartes numériques.

3.1.2.1 CREATION DES CARTES PHYSIQUES ET NUMERIQUES

Nous avons généré des cartes avec un nombre différent de régions : 30, 45 et 60 (Figure 60). Nous avons varié le nombre de régions afin d'évaluer la complexité des cartes sur nos techniques. Chaque région contenait deux informations : son nom (représenté par un numéro) et la principale culture céréalière dans cette région (représentée par une lettre).

Afin de réduire le nombre de cartes à imprimer, nous avons réutilisé les cartes en relief entre chaque participant. Cependant, pour qu'aucune condition ne soit jamais répétée entre les participants, nous avons changé la donnée (le nom de la céréale cultivée) au sein d'une même carte. Nous avons imprimé 27 cartes au format A3. Les cartes physiques ont été imprimées sur du papier Swell. Le nom de la région était représenté par un nombre et le nom de la céréale par son initiale. Par exemple, la région numéro 11 qui cultive principalement du maïs était décrite comme « 11 M ». Cela était écrit en Braille dans la région.

Les cartes numériques (voir Figure 60) ont été utilisées dans les 3 conditions de test. Chaque participant a exploré une carte différente à chaque essai, soit 27 cartes pour chaque condition (81 cartes en tout). Aucune carte n'a jamais été réutilisée ; nous avons donc créé 324 cartes en tout. Les cartes numériques avaient la même structure que les cartes physiques utilisées dans la condition contrôle.

Pour la technique Grille, les cellules de la grille étaient énoncées suivant l'ordre alphabétique. En effet, comme les régions sont déjà représentées par des numéros, nous avons fait le choix de changer de mode de présentation pour ne pas perturber les utilisateurs.

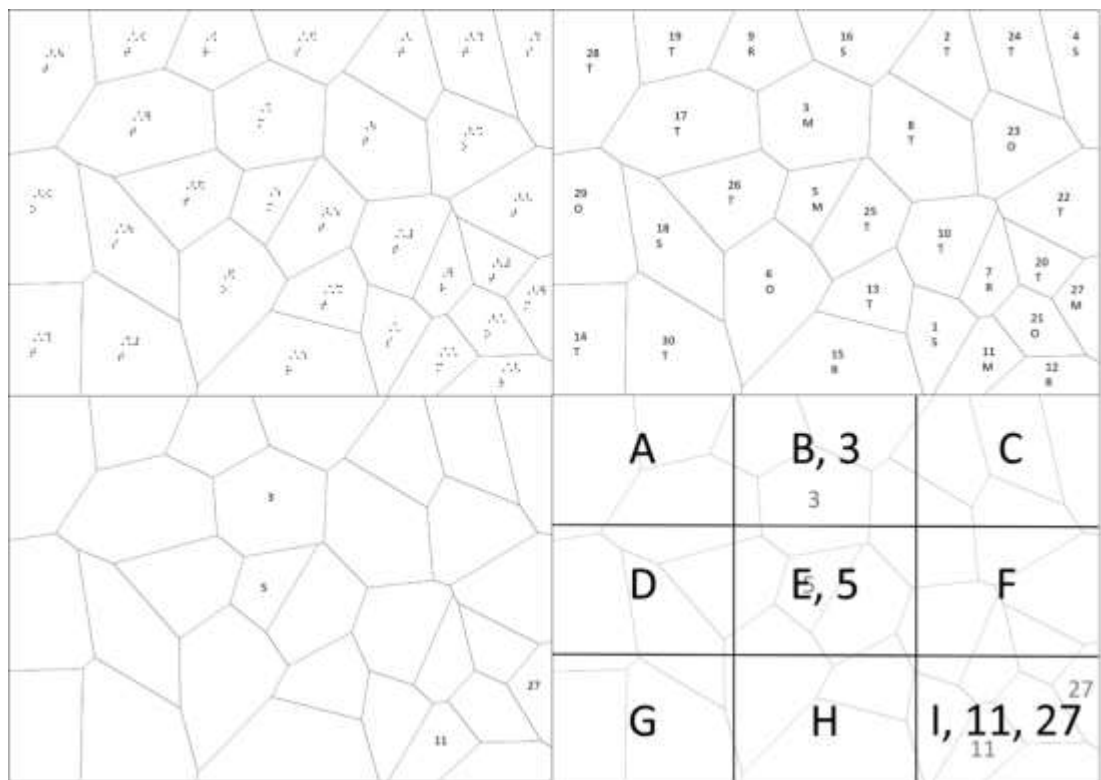


Figure 60. En haut à gauche : Carte physique en relief, avec un chiffre et une lettre braille ; en haut à droite : carte numérique en exploration Direct ; en bas à gauche : carte numérique en exploration Filtre (filtre activé sur maïs) ; en bas à droite : carte numérique en exploration Grille (filtre activé sur maïs).

3.1.2.2 TACHES ET INSTRUCTIONS

La tâche consistait à explorer la carte le plus rapidement possible et de trouver des régions spécifiques. La question était la même à chaque essai : *Donner le nom des quatre régions qui cultivent du <nom de la céréale>*. Le choix du nom de la céréale était tiré au hasard pour chaque essai. Si un participant ne trouvait pas les quatre régions en moins de 4 minutes, l'essai était considéré comme un échec. Le participant pouvait donner chaque réponse de manière séquentielle (pendant son exploration) afin d'éviter toute mémorisation.

3.1.2.3 PARTICIPANTS

Douze personnes déficientes visuelles (5 femmes), âgées de 20 et 65 ans ($M=47$, $SD=13$), ont participé à cette expérience. Tous savaient lire le Braille. Les participants ont déclaré avoir une expertise de lecture Braille de 2,9 en moyenne sur une échelle allant de 1 à 5 ($SD=1,3$, $\min=2$, $\max=5$). Le degré de déficience visuelle variait : sept d'entre eux présentaient une cécité totale, cinq avaient des perceptions lumineuses (ils ont porté un masque occultant sur les yeux durant l'expérience). Concernant leur niveau d'étude, six d'entre eux ont le bac, cinq ont un master et un a un doctorat. Concernant leur métier, deux étaient étudiants, trois étaient à la retraite, trois avaient un travail et quatre étaient sans emploi. Parmi les participants, onze ont déclaré posséder un téléphone portable qu'ils utilisent quotidiennement, une personne possédait une tablette et aucun participant n'avait utilisé de montre connectée avant cette expérience.

3.1.2.4 PLAN D'EXPERIENCE ET PROCEDURE

Cette évaluation suivait un plan d'expérience 3×2 avec la *Technique d'exploration* (Physique, Directe, Filtre et Grille) et le *Nombre de régions* (30, 45 et 60) comme facteurs. Les essais pour chaque technique d'exploration étaient rassemblés dans un même bloc, dans lequel nous avons fait varier le nombre de régions de façon pseudo-aléatoire. À l'intérieur de chaque bloc, les participants ont réalisé trois essais pour chaque nombre de régions ; ils devaient donc explorer neuf cartes

numériques. L'ordre des blocs et du nombre de régions a été contrebalancé à travers les participants. Au début de chaque bloc, une phase d'entraînement a été mise en place afin de permettre à l'utilisateur de se familiariser avec la technique. Nous leur avons expliqué comment fonctionne la technique d'exploration et nous leur avons demandé de s'entraîner à la tâche, c'est-à-dire à trouver les régions spécifiques à une donnée associée. Durant cette phase d'entraînement, il a été demandé à l'utilisateur de choisir la main avec laquelle il souhaitait explorer la carte numérique et celle avec laquelle il souhaitait interagir avec la montre. Uniquement lors de l'entraînement, pour la condition en relief, nous avons imprimé une légende sur une feuille à part. La légende contenait l'initiale des céréales et leur nom complet. Les participants pouvaient ainsi s'y référer au besoin. Pour l'exploration Grille, nous avons imprimé une grille sur une carte en relief afin que les participants comprennent la configuration de la carte avec la grille et les retours vocaux associés. Une fois que les participants se sentaient à l'aise avec la technique, ils pouvaient commencer le bloc.

Tous les participants ont choisi leur main non dominante pour explorer la carte et porter la montre et leur main dominante afin d'interagir avec la montre. En moyenne, l'expérience a duré deux heures. Nous avons informé les utilisateurs qu'ils pouvaient faire des pauses entre chaque bloc.

3.1.2.5 DONNEES COLLECTEES

Nous avons enregistré toutes les données relatives au mouvement de la main qui explorait la carte. Pour chaque essai, nous avons également mesuré le temps pour effectuer la tâche comme suit : nous avons lancé le chronomètre une fois que le participant avait compris la question et qu'il était prêt à explorer la carte. Nous avons arrêté le chronomètre lorsque l'utilisateur avait répondu à la question. Enfin, nous avons collecté le nombre de bonnes réponses aux questions.

Après chaque bloc, les participants ont répondu à un questionnaire NASA-TLX [54] sur la technique qu'ils venaient d'utiliser. À la fin de l'expérience, nous avons demandé aux participants

de classer les techniques par ordre de préférence ainsi que de détailler les points positifs et négatifs de chaque technique. Enfin, nous avons demandé aux utilisateurs quelles stratégies d'exploration ils avaient utilisées.

Nous avons collecté 4 techniques x 3 nombres de régions x 3 répétitions x 12 participants = 432 essais.

3.1.2.6 RESULTATS

Nous avons utilisé un test de Shapiro-Wilk pour déterminer la normalité des distributions des données collectées. Comme les distributions n'étaient pas normales et ne pouvaient pas être normalisées, nous avons utilisé des tests Wilcoxon et Friedman non paramétriques pour deux ou plusieurs comparaisons, respectivement. Nous avons utilisé la correction de Bonferroni au besoin ($p < 0,008$ pour les comparaisons multiples entre les conditions).

3.1.2.6.1 TEMPS D'EXPLORATION

Un test de Friedman a révélé un effet significatif du facteur Technique sur le temps moyen nécessaire pour répondre aux questions ($\chi^2(3) = 30$; $p < 0,01$). Plus précisément, une série de tests de Wilcoxon avec correction a montré une différence significative entre la technique Grille et toutes les autres techniques : Physique ($Z = -5,15$; $p < 0,001$) ; Directe ($Z = -5,23$; $p < 0,001$) ; et Filtre ($Z = -4,57$; $p < 0,001$). Nous avons également trouvé une différence entre Filtre et Directe ($Z = -5,18$; $p < 0,001$). Globalement, Grille était plus rapide que les autres techniques : en moyenne, répondre à une question avec la technique Grille prenait 40 s, avec Filtre 83 s, avec Physique 127 s et avec Directe 172 s (voir Figure 61).

Lorsque nous avons analysé les résultats en fonction du nombre de régions, nous n'avons trouvé aucune différence entre Filtre et Grille. Cependant, Grille était toujours plus rapide que Physique (30 régions : $Z = -2,98$; 45 régions : $Z = -2,82$; 60 régions : $Z = -3,05$; avec $p < 0,01$). Grille était également toujours plus rapide que Directe (30 régions : $Z = -3,05$; 45 régions : $Z = -3,05$; 60

régions : $Z = -3,05$; avec $p < 0,01$). La technique Filtre était plus rapide que Directe pour 30 régions ($Z = -2,90$; $p < 0,01$) et pour 60 régions ($Z = -3,05$; $p < 0,01$), voir Figure 61.

Les temps de réponse étaient plus longs avec Physique et Directe. Ceci est dû au fait que les utilisateurs ont dû explorer la carte en profondeur afin de trouver la région ciblée et les données associées pour répondre à une question. Au contraire, les techniques Filtre et Grille donnent rapidement accès à la réponse.

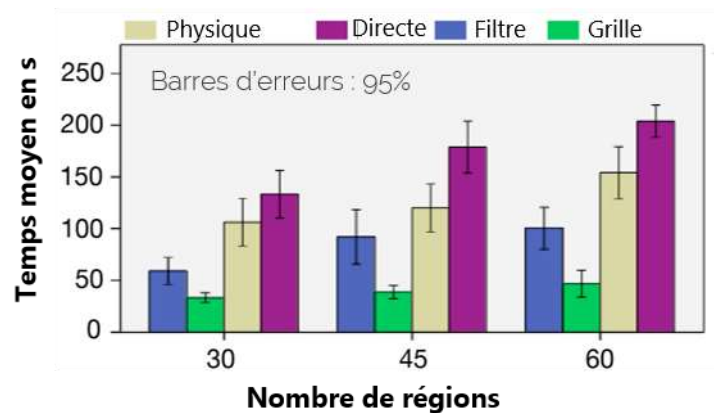


Figure 61. Temps moyen pour répondre à la question pour chaque technique et différents nombres de régions.

3.1.2.6.2 PRECISION

Concernant le taux de réussite, c'est-à-dire le pourcentage de régions trouvées, nos tests révèlent un effet significatif du facteur Technique ($\chi^2(3) = 25$; $p < .01$). Un test de Wilcoxon a confirmé une différence entre Grille et Physique ($Z = -3,29$; $p = 0,02$), Grille et Directe ($Z = -4,62$; $p < 0,01$), et Filtre et Directe ($Z = -4,37$; $p < 0,01$). En moyenne, le taux de réussite était de 93,1 % avec Physique, de 87,8 % avec Directe, de 98,1 % avec Filtre et de 99,7 % avec Grille, voir Figure 62.

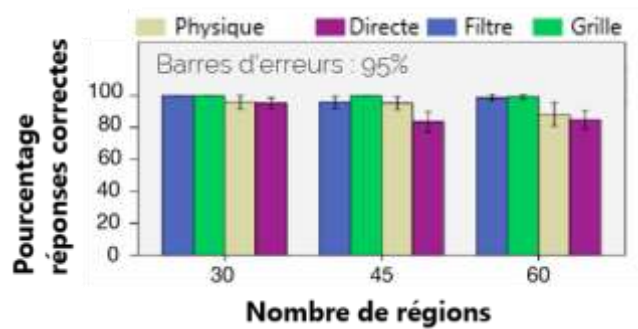


Figure 62. Pourcentage de réponses correctes pour chaque technique et différents nombres de régions.

Pour 30 régions, nous avons seulement trouvé une différence entre Filtre et Directe ($Z = -2,20$; $p = 0,02$). Pour 45 régions, Directe était plus efficace que toutes les autres techniques : Grille ($Z = -3,05$; $p < 0,01$), Physique ($Z = -2,71$; $p = 0,03$), et Filtre ($Z = -2,66$; $p = 0,01$). Pour 60 régions, nous avons trouvé une différence entre Filtre et Directe ($Z = -2,80$; $p < 0,01$) et Directe et Grille ($Z = -2,93$; $p < 0,01$).

En général, la technique Directe était la technique la plus difficile pour effectuer la tâche. Au cours de l'exploration, il était facile de manquer plusieurs régions. Parfois, les utilisateurs devaient parcourir la carte une deuxième fois afin de trouver toutes les régions.

3.1.2.6.3 MOUVEMENTS DE LA MAIN ET STRATEGIES D'EXPLORATION

L'observation des mouvements de la main a révélé des stratégies d'exploration intéressantes. Lors de l'exploration de la carte en relief, 11 participants ont utilisé leurs deux mains. Avec la main principale, ils lisent d'abord la lettre correspondant à la culture céréalière. Si nécessaire, ils lisent le numéro de la région. L'autre main a été utilisée pour trouver les frontières avec les régions voisines afin d'anticiper le mouvement suivant (trouver la région suivante). Avec les trois techniques numériques, la plupart des utilisateurs effectuaient un balayage horizontal ou vertical de la carte, voir Figure 63.

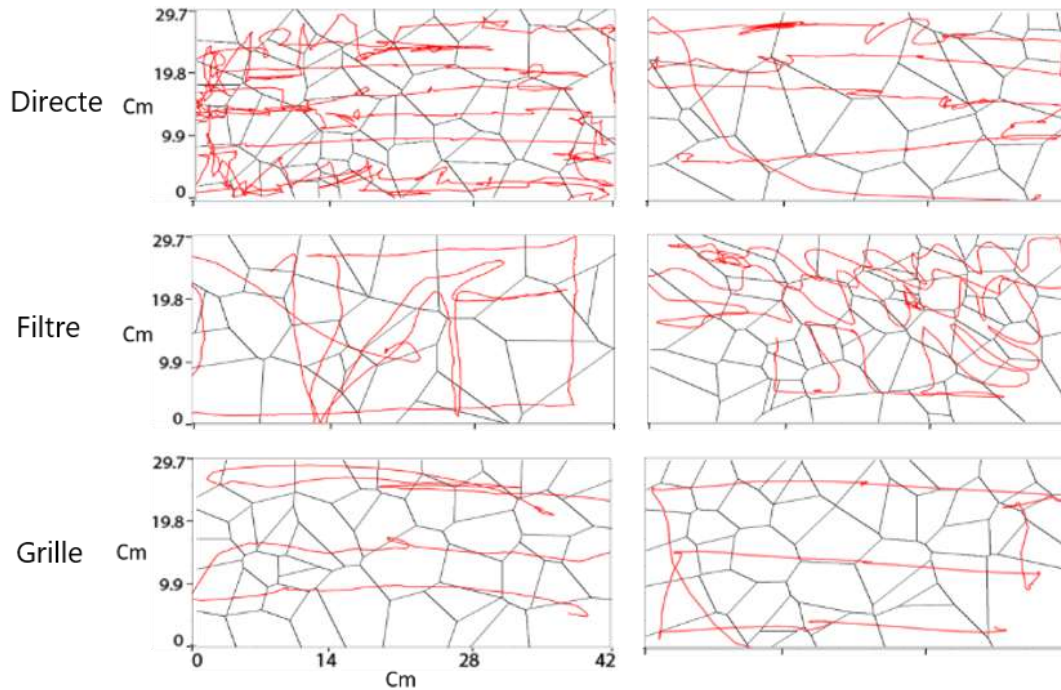


Figure 63. Exemples de différents participants du parcours utilisateurs avec les trois techniques virtuelles.

3.1.2.6.4 DONNEES SUBJECTIVES

Charge cognitive. Nous n'avons trouvé aucune différence significative entre les techniques sur l'une des six propriétés du questionnaire NASA-TLX. Dans l'ensemble, les participants étaient satisfaits de l'utilisation des techniques : en moyenne, sur une échelle de 0 à 100, les participants ont évalué la demande mentale à 24, la demande physique à 26, la demande temporelle à 36, l'effort à 26, la performance à 70 et la frustration à 29.

Préférences utilisateur. Les participants ont évalué les quatre techniques par ordre de préférence selon trois critères : l'efficacité subjective (quelle technique est la plus efficace ?), la satisfaction subjective (laquelle est la plus agréable ?) et la préférence globale (si une seule était disponible, quelle technique utiliseriez-vous ?). La plupart des participants ont classé la technique Filtre en premier sur les trois critères : 7 sur 12 sur l'efficacité, 6 sur 12 sur la satisfaction et 6 sur 12 en général (Figure 64).

Fait intéressant, la technique Grille, qui était la plus efficace en temps d'exploration, n'a été classée au premier rang en efficacité que par un participant et en satisfaction que par deux participants. Elle n'a jamais été classée première selon la préférence globale.

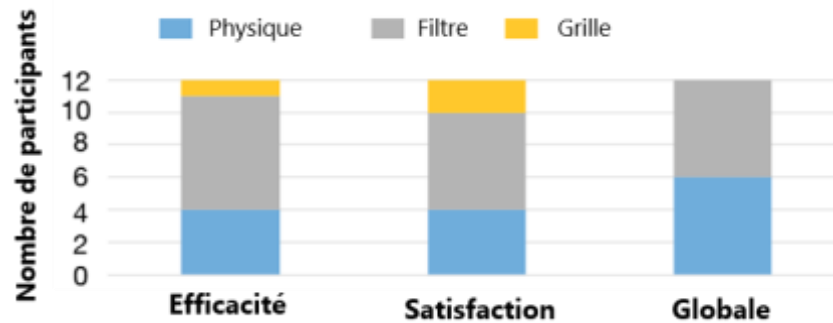


Figure 64. Préférence utilisateur subjective suivant l'efficacité, la satisfaction et une préférence globale.

Commentaire utilisateur. En ce qui concerne l'utilisation d'une montre connectée, P3 a trouvé que la technique Filtre, qui nécessite de sélectionner les données en réalisant des balayages verticaux sur l'écran de la montre était facile à réaliser, mais au contraire P5 pensait que c'était difficile à utiliser. P7 a apprécié « l'exécution d'une exploration mains libres avec la montre ». Dans l'ensemble, 11 participants ont aimé utiliser la montre.

En ce qui concerne les gestes en l'air, pour la technique Grille, un participant a signalé (P2) qu' « il était difficile, en l'air, d'estimer la position de sa propre main par rapport à la carte ci-dessous ». P6 a rapporté que "c'était fatigant de garder la main en l'air". Cependant, d'autres participants ont signalé que « la technique est agréable parce qu'elle permet une exploration rapide » (P5), et parce qu' « elle recueille de l'information » (P6).

3.1.3 ÉTUDE 2 : EXPLORATION DE CARTES NUMERIQUES AVEC DEUX ENSEMBLES DE DONNEES

L'objectif de cette deuxième étude était de valider l'utilisation des meilleures techniques, Filtre et Grille, dans un scénario plus réaliste et complexe : explorer la carte des États-Unis d'Amérique

avec deux types de données (taux de chômage et densité de population). L'exploration avec plusieurs types de données est difficile à réaliser pour les personnes déficientes visuelles : soit elles ont recours à plusieurs cartes en relief (chacune représentant une donnée), soit elles utilisent des tableurs. Trouver des tendances et mettre en corrélation différents types de données est une tâche habituelle dans la visualisation de données spatiales [190].

3.1.3.1 CARTES ET DONNEES

Nous avons utilisé une carte des États-Unis avec 48 états (nous avons enlevé Hawaï et l'Alaska). Nous avons demandé aux participants d'estimer leur connaissance de la carte des états américains. Cette carte n'était pas familière à nos participants (moyenne de 2,3 sur une échelle de 1 à 5). Pour chaque état, l'utilisateur pouvait explorer deux types de données, le taux de chômage et la densité de population. Nous avons utilisé deux ensembles de données différents, un pour chaque technique, de deux années différentes : 1980 et 2010. Nous avons utilisé le taux de chômage américain et la population de densité déclarés par l'US *Bureau of Labor Statistics* et par le recensement des États-Unis, respectivement.

Pour la technique Grille, en mode grille, les cellules de la grille étaient représentées par un numéro (voir Figure 65).



Figure 65. Carte des États-Unis avec une grille 3x3.

3.1.3.2 DESIGN DU FILTRAGE DES DONNEES SUR LA MONTRE

Les données ont été divisées en trois types de valeur : faible, moyenne ou élevée. La synthèse vocale lit le type de valeur, par exemple : "faible". Nous avons utilisé différents termes pour le taux de chômage (faible, moyen, élevé) et la population (petite, moyenne, grande). Nous avons fait ce choix afin de savoir plus facilement quel type de données est filtré. Pour chaque ensemble de données, l'utilisateur pouvait sélectionner une plage de valeurs ou toutes les valeurs.

Sélection des données. Les balayages horizontaux sur la montre connectée sélectionnaient les données. Il y avait quatre sélections possibles : toutes les données, noms des États seulement, taux de chômage et densité de population, voir Figure 66.

Filtrage. Les balayages verticaux sélectionnaient la plage de valeurs pour la donnée choisie.

Retour. La synthèse vocale donnait, dans l'ordre, le nom de l'état, le taux de chômage et la densité de la population de la région parcourue. Les vibrations étaient telles que décrites dans la première étude (100 ms de vibration lors du passage des frontières entre état ou les passages de zone, et 2x100 ms pour le passage d'un niveau d'exploration à l'autre).

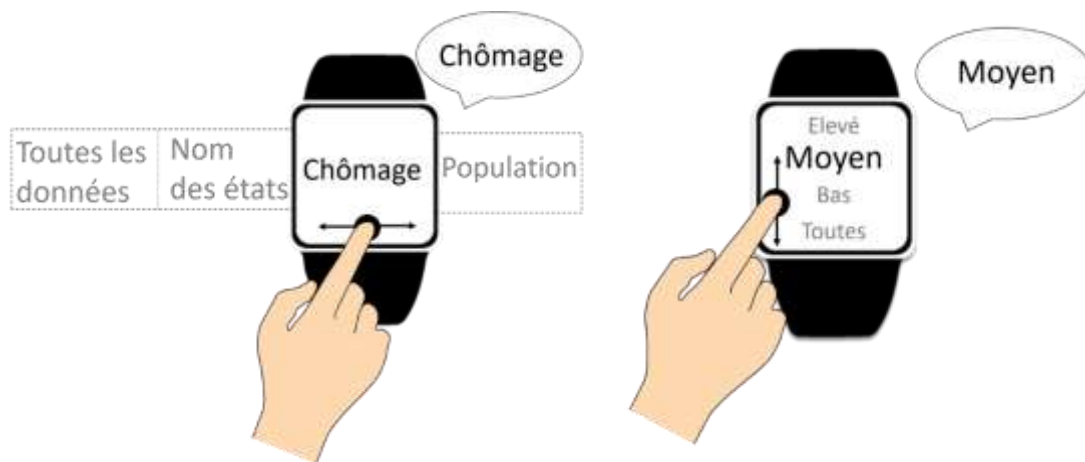


Figure 66. À gauche : Les utilisateurs peuvent effectuer des balayages gauche/droite pour sélectionner des données ; à droite : des balayages haut/bas pour sélectionner des valeurs.

3.1.3.3 TACHES ET INSTRUCTIONS

Nous avons posé cinq questions différentes pour chaque condition, inspirées d'une étude antérieure sur l'exploration de données [190].

1. (*Trouver Max/Min*) Donnez tous les états avec un faible taux de chômage.
2. (*Trouver une donnée spécifique*) Donner la population d'un certain état.
3. (*Comparer les données*) Parmi les états à forte population, lesquels ont un faible taux de chômage ?
4. (*Trouver des voisins*) Parmi les voisins de l'état <nom de l'état>, lesquels ont un taux de chômage élevé ?
5. (*Tendances dans le contexte géographique*) La densité de population augmente-t-elle d'est en ouest ?

3.1.3.4 PARTICIPANTS

Quatre femmes déficientes visuelles, âgées de 47 ans en moyenne, ont participé à cette étude. Aucune d'entre elles n'a participé à l'étude précédente. La participante 1 (P1), âgée de 58 ans, est une enseignante du braille et légalement aveugle. La participante 2 (P2), âgée de 56 ans, est enseignante pour les personnes déficientes visuelles et avait une perception résiduelle de la lumière (elle avait les yeux bandés pour cette étude). La participante 3 (P3), 19 ans, est une étudiante universitaire légalement aveugle. La participante 4 (P4), 55 ans, est une enseignante du braille légalement aveugle. Toutes les participantes possèdent un smartphone, qu'elles utilisent tous les jours, et aucune d'entre elles ne possède une tablette ou une montre connectée.

3.1.3.5 PLAN D'EXPERIENCE ET PROCEDURE

Nous avons contrebalancé les deux techniques et les deux ensembles de données, de sorte que le couple (données, technique d'interaction) était spécifique à chaque utilisateur.

Au cours d'une phase de familiarisation, les participantes ont pratiqué jusqu'à ce qu'elles se sentent à l'aise avec la technique. Les participantes ont eu quelques minutes pour parcourir la carte avec seulement les noms d'état pour se familiariser. Au cours de cette session, nous leur avons montré comment utiliser la technique Filtre et la technique Grille pour extraire des valeurs de données concernant des états spécifiques. Cette phase a duré 7 minutes en moyenne.

Après la phase d'apprentissage, les participantes ont dû répondre aux questions, sans aucun commentaire ou suggestion de l'expérimentateur. Lorsque la stratégie utilisée pour répondre à la question n'était pas optimale, l'expérimentateur a décrit la stratégie optimale. Par stratégie, nous entendons la suite d'interactions à effectuer sur la montre afin de sélectionner les données de manière efficace. Il a ensuite été demandé à l'utilisatrice d'utiliser la stratégie optimale pour répondre à cette question une fois de plus, mais à propos d'un état et de données différentes. La même procédure a été utilisée pour les cinq types de questions mentionnées plus haut. Par conséquent, chaque utilisateur a effectué 5 (si la stratégie utilisée était optimale pour chaque question) à 10 essais (si la stratégie utilisée n'était pas optimale pour chaque question) pour chacune des deux techniques.

3.1.3.6 DONNEES COLLECTEES

Nous avons enregistré les mouvements de la main et nous avons mesuré le temps d'achèvement de chaque essai. Finalement, les participantes ont classé les deux techniques en fonction de l'efficacité, de la satisfaction et de la préférence globale. Elles ont finalement dû mentionner les aspects positifs et négatifs au sujet des techniques. Nous leur avons également demandé ce qu'elles voudraient changer au sujet des deux techniques. En moyenne, l'expérience utilisateur a duré une heure.

3.1.3.7 RESULTATS

3.1.3.7.1 REPONSES AUX QUESTIONS

Toutes les participantes ont pu répondre aux cinq questions. Elles ont effectué respectivement 13, 11, 10 et 11 essais au total, ce qui signifie qu'elles ont pu trouver une bonne stratégie lors du premier essai. En moyenne, elles ont effectué 5,7 essais avec Filtre et 5,5 essais avec Grille pour répondre aux cinq questions. Les seules questions où les participantes ont dû répéter l'essai étaient les questions 1 et 3.

En moyenne, elles ont eu besoin de 208 s (SD = 68) par question avec la technique Filtre, et 148 s (SD = 43) par question avec la technique Grille. Inclus dans ce temps, les gestes de balayages ont pris 39 s en moyenne (SD = 20).

66 % des réponses étaient correctes avec la technique Filtre et 76,2 % avec la technique Grille. Les erreurs concernaient uniquement la question 4 (trouver un voisin) avec Grille, car les utilisatrices donnaient plus d'états que nécessaires.

3.1.3.7.2 CORRELATION DE DONNEES

Une utilisatrice (P3) a déclaré qu'il était pratique d'obtenir les deux valeurs en même temps, sur la même carte : elle a spontanément comparé cette condition aux histogrammes en relief qu'elle explorait, et elle a dit que c'était plus approprié. P1 a signalé qu'il était intéressant de relier deux types différents de données sur la même carte. L'une des enseignantes Braille (P1) pense que le filtrage sur la montre connectée est plus rapide que l'utilisation d'une carte en relief avec plusieurs données représentées.

3.1.3.7.3 STRATEGIES UTILISEES AVEC FILTRE ET GRILLE

Les mouvements de main enregistrés révèlent des différences intéressantes entre les conditions Filtre et Grille. Avec la condition Filtre, les participantes ont parcouru toute la carte et ont dû faire

attention dans les zones où les états étaient petits. De plus, elles ont raté certains états (voir la Figure 67 – gauche). Avec la Grille, les utilisatrices n’ont manqué aucun état, mais ont parfois dû répéter les annonces de la synthèse vocale. Dans ce cas, elles ont rapidement déplacé la main dans la cellule voisine (voir les cellules 4 et 7 de la Figure 67 – droite).

Deux participantes (P1, P3) ont appliqué les stratégies optimales (en utilisant correctement les deux niveaux de filtrage, à savoir le type et la valeur des données) sauf pour la question 4 (« trouver les voisins ») avec Grille : elles ont donné plus d’états que prévu. En général, ces deux participantes ont systématiquement utilisé le niveau grille avec la technique Grille. P2 n’a pas aimé le filtre et a utilisé le niveau grille de la technique Grille pour répondre aux questions 1, 3 et 4. Pour les autres questions, elle a parcouru la carte en utilisant seulement la technique Filtre comme elle connaissait déjà certains états américains. P4 a choisi de n’utiliser que le Filtre avec les deux techniques : elle a trouvé difficile d’utiliser le niveau de la Grille, car elle a estimé qu’elle ne pouvait pas obtenir une représentation mentale de la carte.

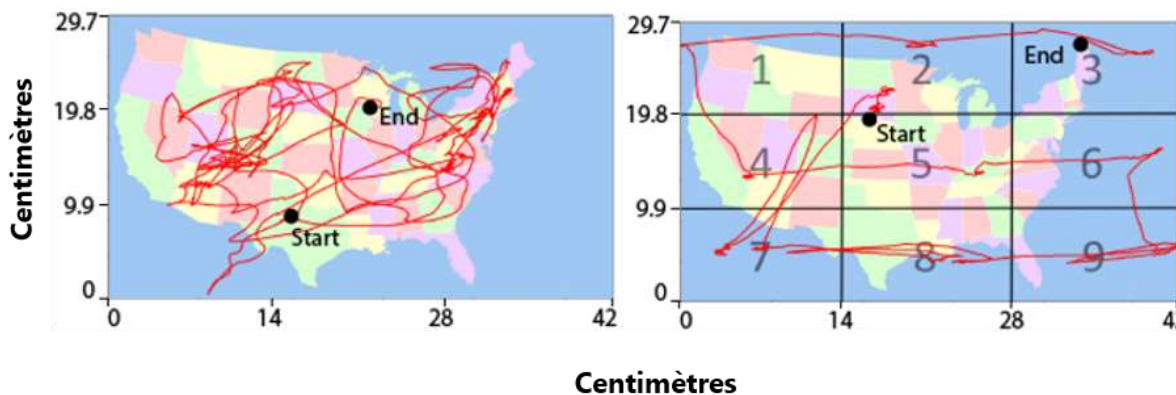


Figure 67. À gauche : Deux exemples d’explorations enregistrées pour la Question 1 (trouver max/min) avec Filtre ; à droite : avec Grille.

3.1.3.7.4 GESTES DE BALAYAGES POUR SELECTIONNER ET FILTRER LES DONNEES

La plupart des utilisatrices pouvaient effectuer des balayages horizontaux et verticaux pour filtrer les données. Cependant, nous avons observé que les participantes avaient plus de difficultés à

effectuer des balayages horizontaux que verticaux, probablement en raison de l'orientation du bras qui a conduit à des balayages en diagonale. Trois participantes (P1, P3 et P4) ont systématiquement utilisé la fonction de filtrage. P2 n'a jamais filtré les données : elle a eu des difficultés à effectuer les gestes et ne l'a donc pas aimé. Elle a signalé qu'elle n'utilise jamais ces gestes sur son propre smartphone.

3.1.3.7.5 UTILISATION DE LA GRILLE

Bien que trois participantes aient utilisé le niveau grille, seul P3 préférait la technique Grille. Les utilisatrices étaient en confiance avec Grille, car elles trouvaient facile et rapide de parcourir toute la carte. Cependant, une participante (P4) a trouvé que la "grille donnait trop d'informations à la fois". En outre, elle n'a pas aimé parce qu'il est difficile d'obtenir une représentation mentale de la taille de chaque état".

3.1.3.7.6 MAIN EN HAUTEUR ET GESTES EN L'AIR

Dans l'ensemble, bien que trois d'entre elles aient souvent utilisé des gestes en l'air, les participantes n'ont pas apprécié l'interaction en hauteur, ce qui confirme les observations faites dans l'étude précédente. Trois d'entre elles ont suggéré de remplacer les gestes en l'air par un autre type de gestuelles (comme le *double-tap* pour passer d'un mode d'exploration à l'autre). Deux participants (P2 et P4) ont dit qu'il était difficile d'estimer avec précision la hauteur de la main et ne se sentaient pas à l'aise. La plupart d'entre elles ont déclaré avoir des difficultés à connaître l'emplacement précis de leur main sur la carte.

3.1.3.7.7 PREFERENCE UTILISATEUR

Les participantes ont évalué les deux techniques selon trois critères subjectifs : l'efficacité, la satisfaction et la préférence générale. Les résultats étaient équivalents pour les trois techniques en termes d'efficacité et de satisfaction. Dans l'ensemble, la plupart des participants (3 sur 4) ont classé la technique Filtre en premier.

3.1.4 BILAN DES ETUDES AVEC UNE MAIN

3.1.4.1 CARTES PHYSIQUES ET CARTES NUMERIQUES

Notre travail s’est concentré sur le design et l’utilisabilité des techniques d’interaction non-visuelles (Directe, Filtre et Grille), en comparaison avec des cartes tactiles en relief. Dans l’ensemble, les résultats montrent que les personnes déficientes visuelles sont capables d’explorer des données spatiales numériques avec ces techniques d’interaction, y compris pour réaliser des tâches complexes de recherche et de comparaison d’informations. Les fonctions de filtrage ajoutées à des cartes numériques fournissent à l’utilisateur un moyen efficace de retrouver et comparer des éléments spécifiques sur la carte, ce qui est impossible à réaliser avec des cartes tactiles.

Plus précisément, les résultats ont montré que Grille est plus efficace que toutes les autres techniques, mais la moins préférée. Les personnes déficientes visuelles ont eu des difficultés à utiliser les gestes en l’air. La technique Filtre apparaît à elle seule comme un compromis satisfaisant et efficace. La deuxième étude a mis en évidence que les techniques Filtre et Grille sont utilisables pour effectuer des tâches plus complexes, telles que la comparaison de deux ensembles de données spatiales sur une carte.

3.1.4.2 GESTES EN L’AIR

Notre travail a exploré une approche novatrice et même provocatrice en proposant aux personnes déficientes visuelles d’utiliser des gestes en l’air. Les gestes en l’air ne sont pas fréquemment utilisés dans les interfaces accessibles. En effet, lors des sessions d’évaluation auprès des personnes déficientes visuelles, il est apparu qu’elles ne sont pas, à première vue, en faveur de ces gestes. Le toucher est la principale modalité sensorielle de perception des objets pour les personnes déficientes visuelles. Lever la main n’est alors pas naturel. Cependant, nos deux études ont révélé que la technique Grille est efficace pour explorer rapidement des données spatiales [28]. Nous avons observé que tous les participants, sauf un, utilisaient activement la technique d’exploration

avec le mode grille lorsqu'ils utilisaient la technique Grille, même s'ils n'étaient pas tenus de le faire. En outre, la technique Grille était la technique la plus efficace pour extraire des informations spécifiques de la carte. Cependant, de nombreux participants ont signalé que c'est fatigant si c'est trop long, et qu'il est difficile de construire une représentation mentale de la carte lorsque leur main se déplace au-dessus de la carte.

3.2 PART B : ETUDES DES TECHNIQUES D'EXPLORATION BIMANUELLES

Dans cette partie, nous présentons deux études concernant l'exploration de cartes numériques à deux mains. Pour rappel, nous souhaitons évaluer les techniques d'interaction issues de l'espace de conception contenant deux critères : la localisation spatiale et la similarité du retour (voir section 2.5). Quatre techniques d'interaction en ont découlé :

- 1) unilatérale avec un retour identique pour les deux mains (U-SF),
- 2) unilatérale avec un retour différent pour chaque main (U-DF),
- 3) bilatéral avec les mêmes retours pour les deux mains (B-SF),
- 4) bilatéral avec des retours différents pour chaque main (B-DF).

3.2.1 DISPOSITIF EXPERIMENTAL POUR LES ETUDES AVEC DEUX MAINS

3.2.1.1 CREATION DE CARTES NUMERIQUES

Nous avons utilisé la même approche pour créer les cartes numériques que lors des études précédentes (adaptation de l'algorithme de Voronoi). Nous avons généré aléatoirement 30 régions de différentes zones en format A3 (29,7 × 42 cm). Le nom des régions utilisé correspondait à des noms de pays. Nous avons fait ce choix afin de faciliter la compréhension des noms.

3.2.1.2 SYSTEME DE SUIVI DE LA MAIN

Pour le suivi des mains, nous avons décidé de changer de système et d'utiliser un système plus réaliste : moins cher et plus facile à mettre en œuvre. Nous avons donc utilisé une caméra sur un support au-dessus de l'espace de travail. En effet, les caméras OptiTrack sont largement utilisées dans le domaine universitaire et dans un contexte expérimental. Nous avons opté pour un système libre et open source en s'appuyant sur la librairie TopCodes [65]. Cette librairie a été développée par l'université de Medford (Massachusetts) et permet de détecter jusqu'à 99 différentes marqueurs. Les marqueurs ont été attachés aux index de chaque main (Figure 68). Une webcam Logitech C270 (1280 × 720px, 50 Hz) située au-dessus de la surface d'exploration permet de suivre les tags TopCodes. Nous avons utilisé deux montres connectées Android SimValley AW-414 (91 grammes, 45 × 44 × 14 mm), connectées à l'ordinateur exécutant l'étude avec des sockets TCP sur un réseau Wi-Fi local.



Figure 68. À gauche : les montres et les TopCodes ; à droite : dispositif expérimental.

3.2.1.3 JUSTIFICATION

L'inclusion de personnes déficientes visuelles dans les études contrôlées n'est pas une tâche simple en raison de la disponibilité limitée [141]. Trois approches sont généralement adoptées : 1) réaliser une première étude sur des personnes voyantes ayant les yeux bandés (assimilées à des utilisateurs déficients visuels novices et/ou tardifs) afin de réduire l'espace de conception, et une seconde étude sur des personnes déficientes visuelles [101,171]; 2) mélanger des personnes voyantes et des

personnes déficientes visuelles dans la même étude pour obtenir un groupe d'utilisateurs plus large [28,77]; et 3) mener les études sur un très petit groupe d'utilisateurs déficients visuels et adopter une analyse qualitative individuelle. Toutes ces approches reflètent un compromis. Ici, nous avons adopté une approche en deux étapes : nous avons testé cinq techniques d'exploration avec 15 participants voyants aux yeux bandés (étude 3). Puis, nous avons fait une autre étude (étude 4) impliquant 12 participants déficients visuels. Nous nous sommes concentrés sur un sous-ensemble de trois conditions distinctes en fonction des facteurs qui ont eu une incidence sur les résultats.

3.2.2 ÉTUDE 3 : EXPLORATION DE L'ESPACE DE CONCEPTION

Les études précédentes (études 1 et 2) ont montré l'utilisabilité de la montre connectée pour explorer des cartes numériques avec une seule main. Or, il a été démontré que la plupart des personnes déficientes visuelles utilisent les deux mains pour l'exploration de cartes en relief (voir section 2.5.2).

3.2.2.1 TACHES ET INSTRUCTIONS

Chaque essai comprenait deux tâches distinctes. La première tâche consistait à explorer une carte numérique et à trouver 4 régions aussi rapidement que possible. Afin de simplifier la tâche, mais en évitant la mémorisation spatiale, les noms des 4 régions étaient les mêmes pour tous les essais, mais leur emplacement était modifié de façon aléatoire. L'instruction était : *Trouvez les 4 régions nommées Chine, Russie, Espagne et Égypte, le plus rapidement possible. Après 2 minutes, si le participant n'avait pas trouvé les 4 régions, nous avons considéré l'essai comme un échec. Pour chaque essai, avant de passer à la deuxième tâche, nous avons montré sur la carte la position des éventuelles régions manquantes au participant.*

La deuxième tâche consistait à comparer la distance entre 3 régions parmi les 4 régions trouvées dans la tâche 1. Pour chaque essai, les trois régions cibles ont été choisies de manière pseudo-aléatoire (les régions ont été choisies de manière à éliminer les comparaisons trop faciles si le cas

se présentait, pour le cas où 2 régions cibles seraient voisines). La question était : *Trouvez, aussi vite que possible, quelles sont les deux régions les plus proches parmi <Région 1>, <Région 2> et <Région 3>.* Après 2 minutes, si le participant n'a pas répondu à la question, nous avons considéré l'essai comme un échec.

3.2.2.2 PARTICIPANTS

Nous avons recruté 15 participants voyants (dont 3 femmes) âgés de 19 à 29 ans ($M = 23$, $SD = 3$). Les participants ont eu les yeux bandés pour l'étude. Les participants ont été recrutés à l'université : 12 d'entre eux étaient des étudiants de Licence, 2 étaient des étudiants au doctorat et un était assistant de recherche. 14 participants étaient droitiers et un gaucher. Six participants possédaient une montre connectée. Aucun d'entre eux n'avait des problèmes d'audition.

3.2.2.3 TECHNIQUES D'INTERACTIONS ETUDIEES

Nous avons comparé les quatre techniques bimanuelles issues de notre espace de conception (U-SF, U-DF, B-SF et B-DF) et une technique contrôle consistant à explorer avec une seule main (Contrôle). Cette condition contrôle était similaire à l'exploration d'une carte interactive numérique sur un écran tactile avec un seul doigt.

3.2.2.4 PLAN D'EXPERIENCE ET PROCEDURE

L'expérience a suivi un plan intra-participant avec les techniques d'interaction comme facteur principal (les cinq techniques décrites ci-dessus). Un bloc comprenait tous les essais pour une technique. Nous avons contrebalancé l'ordre des blocs entre les participants. Dans un bloc, les utilisateurs ont effectué 3 essais. Nous avons informé les participants qu'ils pourraient faire une pause entre les blocs. Avant d'utiliser chaque technique, les participants ont effectué un entraînement au cours duquel la technique a été expliquée. Ils ont également réalisé des essais de

chacune des deux tâches, jusqu'à ce qu'ils se sentent à l'aise avec la technique (environ 5 minutes). Chaque participant a pris en moyenne 1 heure 15 minutes pour réaliser l'expérience.

3.2.2.5 DONNEES COLLECTEES

Nous avons enregistré toutes les données de suivi des doigts, les délais d'exécution et les taux de réussite pour les deux tâches. À la fin de chaque bloc, les participants devaient remplir un questionnaire NASA-TLX [54] sur la technique qu'ils venaient d'utiliser. À la fin de l'étude, les utilisateurs devaient classer les 5 techniques par ordre de préférence et d'efficacité. Au total, nous avons recueilli 5 techniques $\times$ 3 répétitions $\times$ 15 participants = 225 essais.

3.2.2.6 IDENTIFICATION DES STRATEGIES

Nous avons codé les stratégies de Simonnet [148] et Guerreiro [51] (voir section 2.5.3). Nous avons d'abord unifié les stratégies équivalentes (c'est-à-dire, la *grille* avec le *parcours linéaire* et le *point-de-référence* avec le *point-à-point*), menant à un ensemble de 8 stratégies : *parcours linéaire*, *périmètre*, *forme libre*, *forme libre symétrique*, *concentré*, *allers-retours*, *point-de-référence*, *cyclique*. Les quatre premières stratégies correspondent à des stratégies de découvertes et les quatre dernières à des stratégies de mémorisation.

Après le premier codage, nous avons décidé d'inclure deux autres stratégies : *asymétrie* (c'est-à-dire une stratégie différente pour chaque main) et la *symétrie de balayage* horizontal ou vertical de la carte (c'est-à-dire un balayage identique avec les deux mains). Pour identifier la stratégie utilisée pour chaque essai, nous avons généré deux types d'images à partir des données de l'essai : une image avec le chemin d'exploration complet et un ensemble d'images correspondant à des périodes successives (durée de 30 s) de la totalité du temps d'exploration (dans le cas où le chemin complet était visuellement trop complexe pour discerner une stratégie). Trois juges indépendants ont utilisé ces images pour identifier les stratégies utilisées lors de chaque essai. Le codage a été divisé en deux étapes : d'abord, les juges ont codé 5 % de l'ensemble des essais. Ils ont comparé leur codage

respectif et se sont mis d'accord sur les codes finaux. Ensuite, ils ont codé l'ensemble entier. En cas de désaccord, les juges devaient s'entendre sur la stratégie utilisée lors de l'essai.

Pour les stratégies (*allers-retours*, *point-de-référence* et *cyclique*), nous avons développé trois algorithmes d'identification spécifiques (car ils étaient difficiles à identifier visuellement). Quand des stratégies de mémorisation (identifiées par les algorithmes) ont été observées dans chaque essai, nous avons noté le nombre moyen d'occurrences. Lorsque les stratégies de mémorisation ont été observées dans certains essais seulement, nous avons donné le pourcentage d'essais au cours desquels ces stratégies ont été observées.

3.2.2.7 RESULTATS

Un test de Shapiro-Wilk a montré que la distribution des données de temps et d'erreur n'était pas normale. Par conséquent, nous avons utilisé un test de Friedman au lieu d'une ANOVA. Des tests post-hoc ont été effectués avec des tests Wilcoxon avec une correction de Bonferroni.

3.2.2.7.1 TACHE DE RECHERCHE

Nous avons trouvé un effet significatif de la technique sur le temps d'exploration pour trouver les 4 régions ($\chi^2(4) = 29, p < .001$) (voir Figure 69). Généralement, les techniques bilatérales étaient plus rapides que les autres techniques. La comparaison a posteriori a montré que la technique bilatérale avec le même retour (B-SF) était significativement plus rapide ($M = 47,6$ s) que la technique Contrôle ($M = 63,4$ s, $p = 0,042$), mais aussi plus rapide qu'en utilisant deux mains avec un retour unilatéral, qu'il soit identique (U-SF, $M = 68,7$ s, $p = 0,006$) ou différent (U-DF, $M = 68,6$ s, $p = 0,020$). De même, la technique bilatérale avec retour différent (B-DF) était également significativement plus rapide ($M = 43,4$ s) que Contrôle ($p = 0,001$), ou deux mains avec retour unilatéral (U-SF, $p = 0,001$; U-DF, $p < 0,001$). Comme la tâche devait être réalisée dans les 2 minutes, 9 essais plus longs ont été considérés comme un échec (4 %). Ces 9 essais correspondaient à 6 U-SF, 2 Contrôle et 1U-DF.

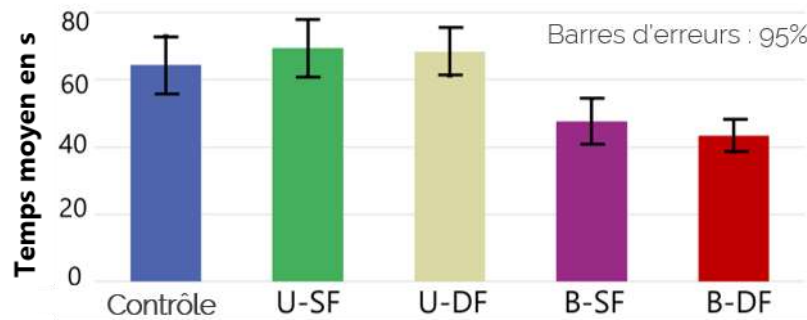


Figure 69. Temps moyen en s pour effectuer la tâche.

3.2.2.7.2 TACHE DE COMPARAISON

Nous n'avons trouvé aucun effet significatif de la Technique sur le temps pour réaliser la tâche. En moyenne, l'exécution de la tâche a pris 24 s (de 20,3 s avec B-SF à 30,4 s avec U-SF). De même, nous n'avons trouvé aucune différence significative entre techniques pour le pourcentage de bonnes réponses. En moyenne, le pourcentage de réponses correctes était de 70 %. Deux essais ont été achevés en plus de 2 minutes et considérés comme un échec (0,9 %).

Nous avons remarqué une variation importante du temps pour réaliser la tâche entre les participants. Ceci est dû au fait que certains participants se sont souvenus de la position des régions identifiées lors de l'exploration (tâche 1), et ont donc répondu directement sans faire de mouvements pour comparer leurs positions. Au contraire, les autres participants ont dû explorer la carte de nouveau avant de répondre à la question.

3.2.2.7.3 STRATEGIES UTILISEES

Au cours de la tâche 1, les stratégies les plus utilisées étaient le *parcours linéaire* (symétrique ou non, 71 %, Figure 70 – gauche) et *forme libre* (15,5 %, Figure 70 – droit). Lors de l'exploration avec des techniques unilatérales (U-SF et U-DF), la stratégie la plus utilisée était le *parcours linéaire* symétrique (45,5 % et 55,5 % respectivement). Lors de l'exploration avec des techniques bilatérales

(B-SF et B-DF), la stratégie la plus utilisée était le *parcours linéaire* symétrique (62,8 % et 75 % respectivement).

Pendant la tâche 2, 46,6 % ont répondu à la question sans explorer la carte. Lorsque les utilisateurs devaient re-parcourir la carte, la stratégie la plus utilisée était *forme libre* (29,2 %). Les participants ont également utilisé des stratégies de mémorisation : des *allers-retours* entre les régions cibles, avec la même main, ont été observés dans 28,8 % des essais avec la technique Contrôle, dans 20 % pour U-SF, dans 26,6 % pour U-DF, dans 22,2 % pour U-SF et dans 28,8 % pour le B-DF. Une stratégie *cyclique* sur 3 régions a été observée dans 4 % des essais avec la technique Contrôle et n'a pas été observée avec les autres techniques. Nous avons constaté que les participants n'utilisaient pas la stratégie de *point-de-référence*.

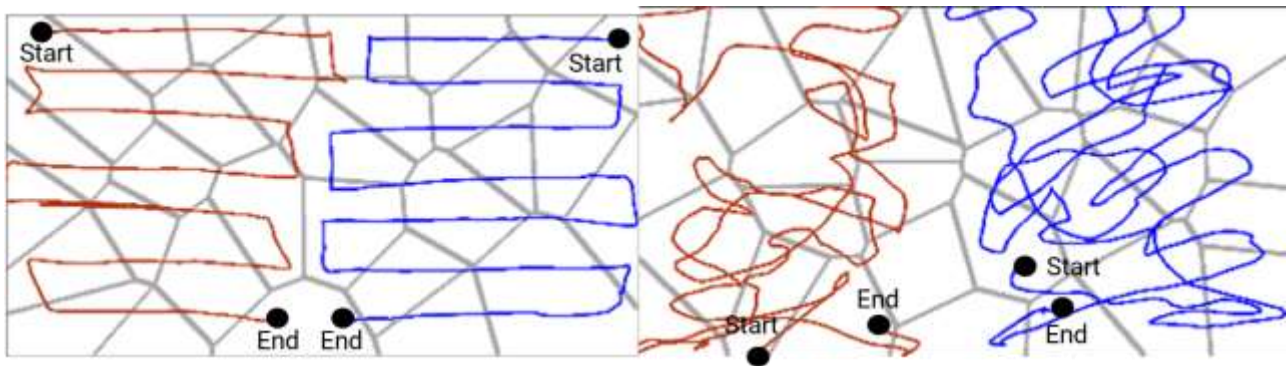


Figure 70. À gauche : Stratégie *parcours linéaire* ; à droite : stratégie *forme libre*.

3.2.2.7.4 MOUVEMENTS PARALLELES DES MAINS

Pour savoir comment les utilisateurs ont réalisé les mouvements des deux mains (en même temps ou séquentiellement), nous avons comparé les mouvements parallèles faits avec les deux mains pour les différentes techniques. En moyenne, les participants ont utilisé des mouvements parallèles dans 15,7 % des essais en utilisant une technique unilatérale avec même retour (U-SF), dans 17,4 % avec une technique unilatérale avec un retour différent (U-DF), dans 72,1 % en utilisant une technique bilatérale avec même retour (B-SF), dans 75,8 % en utilisant une technique bilatérale avec retour différent (B-DF).

3.2.2.7.5 DONNEES QUALITATIVES

Préférence utilisateur. Dans l'ensemble, les participants ont préféré utiliser la technique bilatérale avec retour différent (B-DF). Parmi les 15 participants, 10 ont choisi cette technique comme leur préférée, 3 ont choisi le bilatéral avec le même retour (B-SF) et 2 l'unilatéral avec un retour différent (U-DF).

Préférence en fonction de l'efficacité. Nous avons demandé aux participants de classer les techniques en fonction de l'efficacité subjective pour effectuer les deux tâches. De manière similaire à la préférence générale, les participants ont largement choisi des techniques bilatérales (13/15), avec 10/15 participants déclarant que l'utilisation bilatérale avec un retour différent (B-DF) était plus efficace. Seuls 3 et 2 participants ont respectivement choisi l'U-SF et l'U-DF comme technique préférée.

Charge cognitive. Nous n'avons pas observé de différence significative sur la demande mentale, la demande physique, la demande temporelle ou les propriétés d'effort ; mais nous avons observé un effet significatif des techniques sur la performance rapportée ($\chi^2(4) = 21,27, p < 0,001$). Les participants ont trouvé qu'il était beaucoup plus facile d'accomplir les tâches avec B-SF ($M = 84$) par rapport à Contrôle ($M = 58,7, p < 0,05$), U-SF ($M = 53,3, p < 0,05$) et U-DF ($M = 70,7, p < 0,05$). B-DF était la deuxième meilleure performance ($M = 74,3$).

Commentaires utilisateurs. Tous les participants ont apprécié le fait de bouger les deux mains en même temps et la plupart d'entre eux ont ajouté des commentaires positifs sur le retour bilatéral. P3 a apprécié ne pas « perdre de temps à déterminer quelle main j'utilise ». P5 a trouvé que « le retour est plus fort » avec les techniques bilatérales. En ce qui concerne la technique B-DF, les utilisateurs ont apprécié « écouter des voix différentes, car cela me permet d'identifier facilement quelle main a déclenché le retour » (P11).

3.2.2.8 DISCUSSION

Dans cette première expérience, nous avons découvert que la technique bilatérale permet aux participants d'effectuer la tâche 1 significativement plus rapidement que les autres techniques (contrôle et unilatérale). Ce résultat montre que les techniques bilatérales facilitent la localisation des éléments sur la carte numérique. Le type de retour (identique ou différent) n'a pas affecté de manière significative les performances, car nous n'avons trouvé aucune différence entre B-SF et B-DF en termes de précision ou de temps. Cependant, une grande majorité des participants (10/15) préféraient des retours différents (B-DF) par rapport au même retour (B-SF).

Un résultat plus surprenant est que l'exploration de la carte à deux mains, avec un retour unilatéral (technique U-SF, U-DF) n'était pas plus rapide que l'exploration à une seule main (condition Contrôle). C'est un résultat important, car il montre qu'une technique d'exploration bimanuelle doit fournir un retour bilatéral pour être efficace.

Enfin, bien que nous ayons fait l'hypothèse que l'utilisation de deux mains rendrait la comparaison des éléments plus facile (tâche 2), nous avons observé des performances similaires pour les cinq techniques. Cependant, il est important de noter que la carte était identique dans la tâche 1 et la tâche 2. Par conséquent, la plupart des utilisateurs étaient en mesure de construire une représentation mentale précise de la carte pendant la tâche 1, et qu'il n'était donc pas nécessaire de l'explorer à nouveau dans la tâche 2. Quelques participants n'ont pas mémorisé la configuration des quatre régions, puis ont dû re-explorer la carte lors de la tâche 2 en utilisant principalement des stratégies *forme libre*, ce qui montre qu'ils ne visaient pas à comparer les éléments de la carte, mais seulement trouver l'emplacement des différents éléments. Ces observations expliquent l'importante variance des performances observées dans cette tâche, ainsi que l'absence de différence entre les techniques.

3.2.3 ÉTUDE 4 : IMPACT DU RETOUR SUR LA PERFORMANCE ET SUR LES STRATEGIES D'EXPLORATION

Pour valider ces résultats, nous avons mené une deuxième expérience auprès d'utilisateurs déficients visuels. Nous avons comparé trois techniques seulement : la condition Contrôle avec une seule main, la technique unilatérale avec le même retour pour les deux mains (U-SF) et la technique bilatérale avec retour différent (B-DF). Tout d'abord, nous avons fait ce choix car il n'y avait pas de différence entre U-SF et U-DF d'un côté, et B-SF et B-DF de l'autre. Deuxièmement, comme mentionné précédemment, les conditions Contrôle et U-SF sont similaires à l'exploration d'une carte numérique sur une tablette, avec un ou deux doigts, respectivement. Nous avons sélectionné la condition Contrôle parce qu'il n'y a pas d'ambiguïté dans le retour et que les personnes déficientes visuelles utilisent déjà cette technique sur les téléphones et tablettes classiques. Ainsi, comme indiqué dans son nom, cela représente une bonne condition de contrôle. La technique B-DF a été choisie parce que c'est la meilleure technique identifiée dans la précédente étude.

3.2.3.1 TACHES ET INSTRUCTIONS

Chaque essai comprenait deux tâches comme dans la première étude. La première tâche était la même que dans l'étude précédente, c'est-à-dire trouver 4 régions aussi vite que possible. Mais, pour vérifier sans ambiguïté si le retour bilatéral améliore les performances sur une tâche de comparaison, la carte utilisée dans la tâche 2 était différente de la carte utilisée dans la tâche 1. Les participants devaient trouver quatre régions dans une carte inconnue et comparer leur emplacement relatif afin d'identifier les deux régions les plus proches.

3.2.3.2 PARTICIPANTS

Nous avons recruté 12 personnes déficientes visuelles (5 femmes) âgées de 21 à 73 ans ($M = 52$, $SD = 15$). Le niveau de déficience visuelle variait : 9 d'entre eux étaient totalement aveugles et 3 avaient

une perception de lumière résiduelle. Tous les participants utilisent VoiceOver tous les jours et trois d'entre eux utilisent une application cartographique (Ariadne GPS, par exemple) sur leur smartphone. Sept participants avaient déjà utilisé une montre connectée auparavant et deux participants en possèdent une. Aucun d'entre eux n'avait de problèmes d'audition. Tous étaient habitués à explorer des graphiques en relief.

Participant	Sexe	Âge	Déficience visuelle	Dispositifs utilisés	Applications cartographiques utilisées	Expertise en exploration tactile (1-5)
P1	M	58	Malvoyant	Téléphone Montre connectée	Aucune	2
P2	M	50	Aveugle	Téléphone Montre connectée	Plans Ariadne GPS	3
P3	F	21	Aveugle	Téléphone	Aucune	4
P4	M	58	Malvoyant	Téléphone Tablette	Aucune	2
P5	F	56	Aveugle	Téléphone	Aucune	4
P6	F	47	Aveugle	Téléphone Tablette	BlindSquare Ariadne GPS	3
P7	M	27	Aveugle	Téléphone	Ariadne GPS	3
P8	M	68	Aveugle	Téléphone	Aucune	4
P9	F	45	Aveugle	Téléphone	Aucune	2
P10	F	73	Malvoyant	Téléphone	Aucune	4
P11	M	61	Aveugle	Téléphone	Aucune	3
P12	M	55	Aveugle	Téléphone	Aucune	2

Tableau 4. Profil des participants de l'étude 4

3.2.3.3 PLAN D'EXPERIENCE ET PROCEDURE

L'expérience a suivi un design intra-participant avec la Technique d'Interaction comme facteur principal. Nous avons modifié l'ordre des techniques parmi les participants. Chaque tâche comprenait 3 répétitions. Les participants ont terminé deux blocs d'essais avec la tâche 1 et la tâche 2. Nous avons utilisé le même appareil et recueilli les mêmes données (temps d'achèvement, taux d'erreur et données qualitatives) que dans la première étude. Au total, nous avons recueilli 3 techniques $\times$ 6 répétitions $\times$ 12 participants = 216 essais. Nous avons utilisé la même méthode (3 juges) pour identifier les stratégies.

3.2.3.4 RESULTATS

3.2.3.4.1 TACHE 1 : TEMPS D'EXPLORATION ET PRECISION

Les résultats montrent une nette différence entre les techniques en ce qui concerne le temps requis pour trouver les quatre régions (tâche 1). Les participants ont achevé la tâche plus rapidement avec un retour bilatéral B-DF (50 s, CI [42.9, 58.8]) qu'avec Contrôle (76 s (CI [66.7, 88.3]) ou unilatéral U-SF (93 s, CI [80.7, 107.2]), voir Figure 71. Cette différence est assez importante, puisque B-DF est 31,2 % plus rapide que le Contrôle et 42,9 % que l'U-SF. Onze essais d'une durée supérieure à 2 minutes ont été considérés comme un échec : 7 Contrôle (19,4 %) et 4 U -SF (11,1 %).

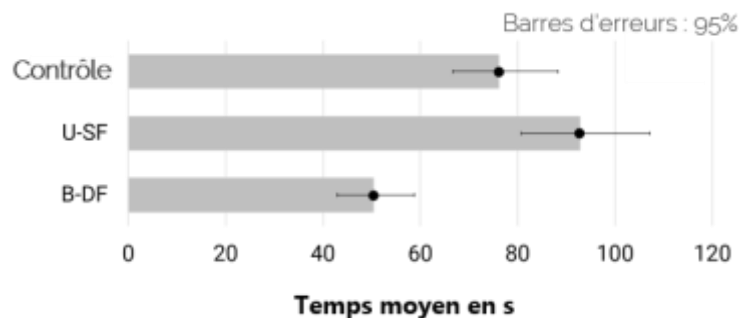


Figure 71. Temps moyen en secondes pour effectuer la tâche 1.

3.2.3.4.2 TACHE 2 : TEMPS D'EXPLORATION ET PRECISION

En moyenne, les participants ont terminé la tâche, c'est-à-dire trouver les quatre régions et répondre à la question, plus rapidement avec la technique bilatérale B-DF (92,8 s, IC [69,7, 118,5]) qu'avec Contrôle (110 s, CI [92,8, 141,3]) ou avec la technique unilatérale U-SF (137 s, CI [113.1, 171]), voir Figure 72.

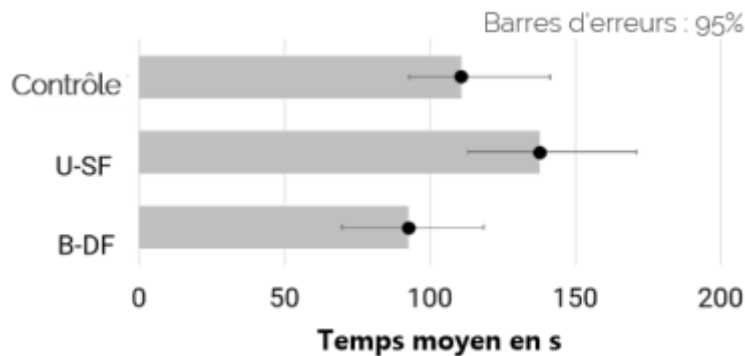


Figure 72. Temps moyen en secondes pour effectuer la tâche 2.

Le temps nécessaire pour trouver les quatre régions pour la première fois était en moyenne de 83 secondes avec B-DF, 94 secondes avec Contrôle et 122 secondes avec U-SF. Ces temps sont supérieurs à ceux observés dans la tâche 1 car les participants ont mélangé stratégies de découverte et de mémorisation dès le début de la tâche 2.

Le pourcentage de réponses correctes était de 77 % (CI [54,5, 99,5]) avec la condition Contrôle, 50 % (CI [27,5, 72,50]) avec U-SF et 77 % (CI [57,25, 96,75]) avec B-DF. Étant donné que la tâche devait être terminée dans les 4 minutes, 2 essais ont été considérés comme un échec, correspondant à 1 Contrôle (0,9 %) et 1 U-SF (0,9 %).

3.2.3.4.3 STRATEGIES UTILISEES

Au cours de la tâche 1, lors de l'exploration avec la technique Contrôle, la stratégie la plus utilisée a été *parcours linéaire* (83,3 % des essais), puis le *périmètre* (8,3 %). Lors de l'exploration à deux mains avec la technique unilatérale (U-SF) la stratégie la plus utilisée a été *parcours linéaire* (66,6 % des essais), puis *forme libre* (16,6 %; voir la Figure 73 – droite). Lors de l'exploration à deux

mains avec la technique bilatérale (B-DF), la stratégie la plus utilisée était *parcours linéaire* (74,9 %), puis *forme libre* (11,1 %). Nous avons également identifié le moment où les mains explorent de manière symétrique (*parcours linéaire symétrique*; Figure 73 – gauche). Cette stratégie est apparue à 41,6 % avec la technique unilatérale (U-SF) et à 72,2 % avec la technique bilatérale (B-DF).

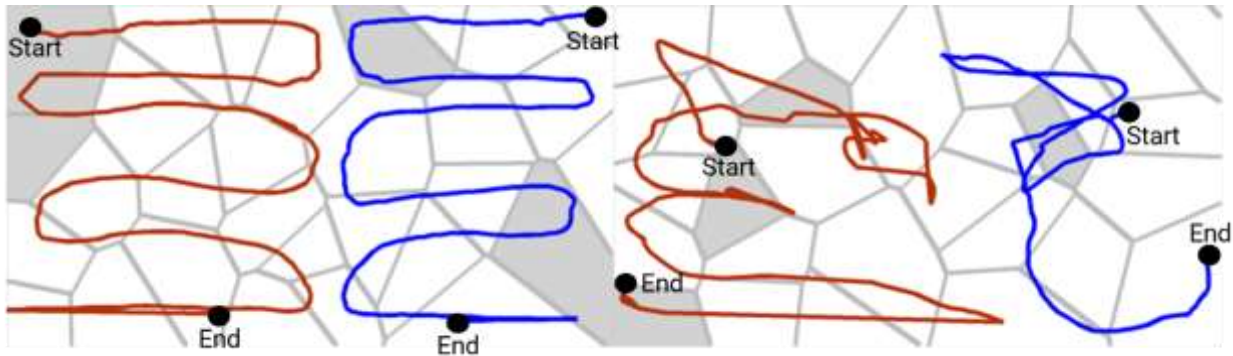


Figure 73. Exemple de stratégies utilisées (la carte numérique sous-jacente est numérique. Elle est affichée à des fins d’illustration uniquement). À gauche : stratégie *parcours linéaire symétrique* (P4 avec B-DF, tâche 1, mouvements simultanés des mains). À droite : *forme libre* (P2 avec U-SF, tâche 2, mouvements séquentiels de la main). Les lignes bordeaux et bleue correspondent respectivement aux mouvements des mains gauche et droite.

Comme les utilisateurs ont été exposés à une nouvelle carte au cours de la tâche 2, des stratégies de découverte ont également été observées. Le *parcours linéaire* a été utilisé dans 88,9 % des essais avec la technique Contrôle, 91,6 % avec la technique unilatérale (U-SF) et 77,7 % avec la technique bilatérale (B-DF).

Dans la tâche 2, nous nous sommes plus spécifiquement concentrés sur les stratégies de mémorisation (*allers-retours*, *cyclique* et *point-de-référence*). Des mouvements de *allers-retours* ont été observés dans tous les essais et le nombre d’occurrences dans chaque essai variait en fonction de la technique utilisée : 5,3 (CI [4,1 ; 6,3]) pour la technique Contrôle, 3,6 (CI [2,8 ; 5,4]) pour la technique unilatérale (U-SF) et 2,4 (CI [1,9 ; 3,8]) pour la technique bilatérale (B-DF).

Contrairement à la stratégie *allers-retours*, des stratégies *cyclique* et *point-de-référence* ont été observées dans certains essais seulement. La stratégie *cyclique* avec la même main sur 3 régions

(c'est-à-dire passant de la région A à la région B, puis à la région C et revenir à la région A) a été observée dans 33,3 % des essais avec la technique Contrôle, dans 38,8 % des essais avec la technique unilatérale U-SF et dans 22,2 % des essais avec la technique bilatérale (B-DF). Une stratégie *cyclique* sur 4 régions a été observée dans 30,5 % des essais avec la technique Contrôle et seulement 5,5 % des essais avec la technique unilatérale (U-SF) et la technique bilatérale (B-DF).

La stratégie du *point-de-référence* avec la même main (allant de la région A à la région B, puis revenir à la région A et aller à la région C) a été observée dans 58,3 % des essais avec la technique Contrôle, dans 41,6 % des essais avec la technique unilatérale (U-SF) et dans 33,3 % des essais avec la technique bilatérale (B-DF).

Enfin, nous avons observé le nombre d'occurrences de stratégies de mémorisation réalisées à deux mains (c'est-à-dire en plaçant une main sur une région cible comme ancre et en utilisant l'autre main pour repositionner d'autres régions cibles) : 2,5 (CI [2,27 ; 3,06]) par essai pour la technique unilatérale (U-SF), et 2,8 (CI [2,27 ; 3,37]) pour la technique bilatérale (B-DF). Ces résultats montrent que les participants ont combiné l'utilisation des deux mains lors d'une exploration à deux mains afin de comparer l'emplacement relatif de deux régions.

3.2.3.4.4 MOUVEMENTS PARALLELES DES MAINS

Avec la technique unilatérale (U-SF), 37 % du temps d'exploration était basé sur des mouvements de mains simultanés. Ce pourcentage a augmenté à 70 % avec la technique bilatérale (B-DF), ce qui met en évidence l'impact du retour sur l'utilisation des deux mains. Même si les deux mains sont impliquées dans la technique unilatérale (U-SF), les utilisateurs effectuent principalement des mouvements séquentiels. Au contraire, ils effectuent sans effort des mouvements simultanés avec les deux mains avec la technique bilatérale (B-DF).

3.2.3.4.5 DONNEES QUALITATIVES

Préférence de l'utilisateur. 9 participants sur 12 ont classé la technique bilatérale (B-DF) comme étant leur préférence, 2 participants ont préféré la technique Contrôle (aucun de ces deux participants n'utilise des applications cartographiques sur leur smartphone ou leur tablette) et 1 participant a préféré un retour unilatéral (U-SF). Les participants préférant la technique bilatérale (B-DF) ont mentionné qu'utiliser les deux mains en parallèle, et donc entendre deux voix simultanées, « ne pose aucun problème cognitif » (P1, P3, P4, P7, P8, P9, P10, P11 et P12). Parmi eux, deux participants (P3, P4) ont déclaré être régulièrement « confrontés à différents stimuli audio au même moment de leur vie quotidienne » (par exemple écouter les bruits de la rue tout en parlant à une personne). Cependant, deux participants (P2, P5) ont indiqué que la technique bilatérale (B-DF) nécessitait « plus de concentration et de charge cognitive » mais que son utilisation pour une tâche aussi courte n'était pas gênante. Tous les participants ont déclaré ressentir la vibration de la montre connectée. 11 des douze participants ont déclaré que le port de deux montres connectées pour la technique bilatérale était pratique car « il est facile de comprendre d'où provient le retour » (P1, P10). Un participant a déclaré que « porter deux montres connectées est inutile » (P6 - le même participant qui a noté la technique unilatérale (U-SF) en premier).

Charge cognitive. Nous n'avons pas observé de différence majeure entre les trois techniques sur les différentes dimensions du questionnaire NASA-TLX (demande mentale, demande physique, demande temporelle, effort et frustration). Les participants ont évalué les performances de la technique bilatérale (B-DF) et de la technique unilatérale (U-SF) ($M = 75$ et $M = 74$ respectivement) mieux que la technique Contrôle ($M = 63$).

3.2.4 BILAN DES ETUDES AVEC DEUX MAINS

Nous avons conçu et évalué quatre techniques d'interaction pour l'exploration bimanuelle de cartes numériques par des utilisateurs déficients visuels. Ces techniques résultaient d'un espace de

conception combinant la localisation spatiale et la similarité. Les résultats, qui étaient comparables pour les utilisateurs ayant les yeux bandés (étude 3) et ceux ayant une déficience visuelle (étude 4), ont montré qu’une technique incluant un retour non ambigu bilatéral est la technique la plus rapide et préférée. De plus, ces deux études ont montré qu’un retour non ambigu bilatéral améliore l’exploration cartographique et plus spécifiquement la localisation puis la comparaison d’éléments spécifiques sur la carte. Au total, ces observations montrent que les techniques bilatérales sont plus efficaces que les techniques unilatérales pour explorer une carte numérique inconnue. Ils révèlent l’importance de fournir un retour bilatéral aux utilisateurs malvoyants pour explorer des interfaces complexes telles que des cartes, mais peuvent également s’appliquer à d’autres graphiques tactiles (dessins, graphiques, etc.)

3.3 DISCUSSION

3.3.1 PAN ET ZOOM

Nous avons montré que les techniques d’exploration basées sur des cartes numériques permettent de comparer plusieurs ensembles de données spatiales. Cette tâche est considérée comme une tâche complexe et utile. L’espace de conception fourni par notre prototype est vaste et permet d’exécuter de nombreuses tâches impossibles avec les cartes en relief, telles que le *pan* et le *zoom*. Le *pan* peut simplement être effectué en utilisant des gestes sur la montre ou des commandes vocales. Des techniques de *zoom* pour les personnes déficientes visuelles ont déjà été proposées [130]. Elles s’appuient sur des niveaux de *zoom* avec un contenu significativement différent, et qui préservent le groupement cognitif de l’information. Une solution simple pourrait être d’associer un geste de la main avec un niveau spécifique pour zoomer ou dézoomer.

3.3.2 IMPLEMENTATION DU RETOUR BILATERAL POUR LES ECRANS TACTILES ACTUELS

Les utilisateurs déficients visuels utilisent déjà des tablettes avec des fonctionnalités d'accessibilité activées. Par conséquent, il leur arrive d'explorer des graphiques visuels (comme des cartes par exemple), mais nous avons noté qu'ils utilisent généralement un seul doigt. Nos résultats montrent qu'un retour bilatéral peut améliorer l'exploration tactile. Cependant, pour mettre en œuvre un retour bilatéral sur les écrans tactiles, il est obligatoire d'identifier et de suivre chaque doigt sans ambiguïté. Certains articles montrent que l'identification des doigts peut être basée sur leur orientation [173], ou sur un matériel externe tel qu'un dispositif portable ou une caméra [53]. Si l'identification des doigts peut être résolue, n'importe quelle tablette pourrait alors générer un retour bilatéral non ambigu.

3.3.3 RECOMMANDATION POUR LES APPAREILS TACTILES EXISTANTS (SMARTPHONES ET TABLETTES)

Il est important de noter que deux de nos conditions expérimentales (Contrôle et U-SF) peuvent correspondre à une situation où les utilisateurs déficients visuels explorent des cartes sur une tablette avec la fonction d'accessibilité activée (par exemple VoiceOver sur iOS). Dans une telle situation, ils sont libres d'explorer la carte avec un ou deux doigts, mais avec un seul retour ambigu, puisqu'il ne dépend pas du doigt qui l'a déclenché. Lorsqu'il n'est pas possible d'utiliser un retour bilatéral non ambigu (c'est-à-dire dépendant du doigt qui le déclenche), nos résultats montrent qu'il est plus efficace d'utiliser un seul doigt. Cette observation peut servir de recommandations pour les utilisateurs déficients visuels qui utilisent déjà leurs tablettes ou smartphones pour explorer des graphiques.

3.3.4 CHARGE COGNITIVE DU RETOUR BILATERAL

Un retour bilatéral différent a permis une exploration plus rapide des cartes et n'a soulevé aucun problème cognitif majeur chez les personnes déficientes visuelles. Après les expériences, les

personnes déficientes visuelles ont rapporté que l'écoute de deux voix différentes peut augmenter la charge cognitive, mais est acceptable pour de courtes périodes de temps, d'autant plus qu'elles sont régulièrement exposées à plusieurs voix concurrentes dans leur vie quotidienne.

3.3.5 AUTRES APPLICATIONS POUR RETOUR BILATERAL

Dans la section 2.5.2, les travaux ont montré que les personnes déficientes visuelles utilisaient intuitivement deux mains pour explorer différents types de graphiques en relief, tels que des dessins, des graphiques mathématiques ou des cartes de quartier. Un retour bilatéral pourrait être utilisé pour explorer des versions numériques de ces graphiques sur des surfaces tactiles.

4 CONCLUSION DU CHAPITRE

Dans ce chapitre, nous avons décrit les études portant sur les techniques d'interaction que nous avons conçues, développées et évaluées. Ces techniques s'articulent autour de deux axes : l'exploration de cartes numériques à une main ou à deux mains. A partir des résultats des études portant sur l'exploration de carte numérique à une main, nous avons pu proposer de nouvelles techniques pour une exploration à deux mains. Nous avons montré que les personnes déficientes visuelles peuvent explorer des cartes numériques avec une ou deux mains et mettre en relation des éléments dans ces cartes. Nous avons montré les stratégies utilisées lors de la phase de découverte d'une carte (tâche 1) et lors de la phase de mémorisation (tâche 2). L'association du suivi de la main avec une montre connectée pourrait permettre aux personnes déficientes visuelles d'explorer des cartes numériques dans de nombreux endroits (comme à l'école, à la maison ou au travail).

CHAPITRE 5

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Structure du chapitre

- 1 Discussion générale
- 2 Perspectives

1 DISCUSSION GENERALE

1.1 VERROUS INITIAUX

Dans mes travaux de thèse, nous sommes partis de trois constats initiaux. Le premier constat est que les graphiques en relief sont importants pour accéder aux connaissances. Or la production et l'adaptation de graphiques en relief reposent sur l'intervention d'un transcripneur. Dès lors, les graphiques en relief sont difficilement accessibles en dehors du cursus scolaire [29]. Le deuxième constat repose sur l'émergence de données en libre accès sur internet. Ces données sont variées et disponibles. Cependant, les documents numériques sont par essence visuels, donc inaccessibles en l'état aux personnes déficientes visuelles en l'état. Notre dernier constat est qu'ils utilisent de plus en plus de nouvelles technologies et s'équipent de dispositifs mobiles.

1.2 SOLUTIONS PROPOSEES ET RESULTATS

Ainsi, nous avons étudié comment les utilisateurs explorent des graphiques en relief afin de proposer de nouvelles techniques d'interaction basées sur un dispositif personnel mobile et permettant d'accéder à des contenus numériques.

Dans un premier temps, nous avons réalisé des études permettant de mieux comprendre comment les personnes déficientes visuelles explorent des graphiques en relief. Ainsi, nous avons étudié l'exploration de cinq types de graphiques différents : les dessins, les dessins en perspectives, les graphes mathématiques, les cartes géographiques et les plans. Notre première étude s'est concentrée sur la différence d'exploration entre des personnes voyantes aux yeux bandés et des personnes déficientes visuelles. Cette étude montre des différences d'exploration entre ces deux groupes. Tandis que les personnes voyantes ont obtenu de meilleurs résultats dans l'identification des dessins et des dessins en perspectives, les personnes déficientes visuelles ont, au contraire, obtenu de meilleurs résultats dans les graphes, les cartes et les plans. De plus, les personnes

déficiences visuelles sont plus rapides dans l'exploration des graphiques en relief. Les résultats mettent en avant l'expertise de l'utilisateur lors de l'exploration. Les deux groupes ont exploré avec leurs mains de manière simultanée pour plus de la moitié du temps d'exploration. Ce résultat reflète l'usage des mains et la grande part d'exploration bimanuelle.

Notre deuxième étude s'est concentrée sur l'exploration des graphiques en relief avec des participants déficients visuels uniquement. Nous avons séparé nos participants suivant leur expertise en exploration tactile. Nous avons introduit une nouvelle mesure que nous avons appelé fixation tactile. Les fixations tactiles sont l'arrêt des doigts suivant des paramètres spatiaux et temporels. Les résultats de cette étude ont montré des différences dans l'exploration : les utilisateurs non experts font en moyenne plus de fixations tactiles avec leur index gauche et leur index droit que les utilisateurs experts. L'usage de l'index gauche n'est pas non plus le même : les utilisateurs experts bougent d'avantage ce doigt lors d'une exploration. L'index droit est utilisé en tant que point d'ancrage : les fixations réalisées avec cet index sont plus longues qu'avec l'index gauche. L'analyse des résultats suivant le mouvement des mains reflète le recours à une exploration bimanuelle pour plus de la moitié du temps d'exploration.

Ces deux études nous permettent de dégager les différences suivant l'expertise des utilisateurs lors d'une exploration de graphiques en relief, en particulier sur l'usage des index : les utilisateurs experts reposent leur exploration en très grande partie sur leur index gauche. L'utilisation des deux mains pendant l'exploration est très importante, car les personnes expertes et non expertes explorent la plupart du temps de manière bimanuelle.

L'état de l'art révèle les différentes études réalisées pour comprendre comment les personnes déficientes visuelles explorent des graphiques en relief (voir section 2.5). Nous avons présenté une nouvelle manière d'analyser les parcours utilisateurs via les fixations tactiles. Nous avons également proposé de présenter nos résultats suivant l'expertise en exploration tactile de nos utilisateurs. À partir de ces résultats de ces études, nous pouvons proposer des techniques

d'interaction pour l'exploration de graphiques numériques qui respectent les habitudes des utilisateurs lors d'une exploration de graphiques en relief.

Dans un deuxième temps, nous avons proposé un ensemble de techniques d'interaction reposant sur une exploration à une ou deux mains pour l'exploration de cartes numériques. Dans nos techniques, l'exploration de cartes numériques repose sur l'exploration directe, c'est-à-dire que le doigt de l'utilisateur est considéré comme un curseur. Le mouvement du doigt sur la carte numérique déclenche les retours associés. Les retours se font au travers d'une montre connectée. L'utilisation d'un dispositif mobile et personnel permet à l'utilisateur d'avoir le dispositif sur soi et équipé avec ses préférences en matière de synthèse vocale (comme la voix, la vitesse, etc.).

Dans la première étude, nous nous sommes concentrés sur l'exploration à une main de cartes numériques. Nous avons proposé trois techniques d'interaction afin de pouvoir accéder à plusieurs jeux de données au sein d'une même carte (voir Figure 74). Nous avons proposé des options de filtrage des données et un découpage en grille de la carte pour un accès plus rapide aux éléments de la carte.



Figure 74. Trois techniques d'interactions basées sur une montre connectée : à gauche, la technique Directe; au milieu la technique Filtre; à droite la technique Grille + Filtre.

Cette étude a montré qu'il est possible d'accéder à des données sur une carte numérique, et que l'accès à l'information est également plus rapide en comparaison à une carte physique en relief. Cependant, les utilisateurs n'ont pas apprécié les gestes en l'air de la technique Grille + Filtre, qui a pourtant obtenu de bons résultats en termes de performance (temps nécessaire à l'exploration). Avec les différentes techniques, les utilisateurs ont pu comparer des jeux de données et trouver des

tendances de données. Les utilisateurs ont apprécié utiliser la montre connectée comme interacteur en sortie (synthèse vocale et vibration), mais également en entrée pour le filtrage des données (geste pour la sélection des données). Ces résultats nous ont permis de proposer une amélioration de ce prototype afin de bénéficier d’une exploration à deux mains (étant plus proche de l’exploration des utilisateurs sur des graphiques en relief).

Dans une deuxième étude, nous avons proposé des techniques d’interaction avec un retour unilatéral (impliquant une montre) ou bilatéral (impliquant deux montres, voir Figure 75). L’analyse des parcours réalisés par l’utilisateur nous a montré leurs stratégies d’exploration. Ces stratégies révèlent l’utilisation des deux mains lors de l’exploration de cartes numériques. Nos études ont montré qu’un retour non ambigu bilatéral améliore l’exploration cartographique. De plus, les résultats ont montré que les techniques bilatérales sont plus efficaces que les techniques unilatérales pour explorer une carte numérique.

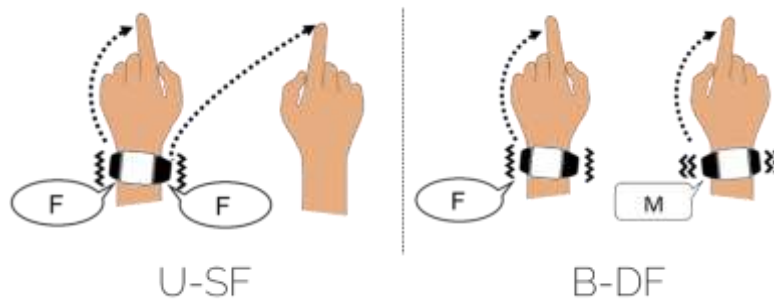


Figure 75. À gauche : retour unilatéral ; à droite : retour bilatéral.

L’état de l’art a révélé le potentiel pour l’exploration de graphique : les graphiques numériques interactifs (voir section 3.2) combinés à une exploration directe (qui associe le doigt à un curseur). Les techniques d’interactions que nous avons proposées à une ou deux mains ont démontré les différentes possibilités d’exploration.

2 PERSPECTIVES

Dans la dernière partie de cette thèse, nous présentons tout d'abord des perspectives à courts et moyens termes avant de présenter nos perspectives à plus longs termes.

2.1 PERSPECTIVES A COURTS ET MOYENS TERMES

2.1.1 SUIVI DE LA MAIN

Les outils technologiques que nous avons utilisés dans nos études pour suivre la main de l'utilisateur ne sont pas appropriés pour une utilisation grand public. En effet, nous souhaitons une utilisation de nos cartes numériques dans toute situation (à la maison, dans un centre commercial ou à l'école par exemple). Les techniques que nous avons proposé repose sur un suivi de la main précis. Améliorer ce suivi par avec des dispositifs mobiles pour permettre une utilisation dans différents endroits. Pour nos études, nous avons utilisé des caméras pour détecter la position des mains mais afin d'avoir une précision et un bon suivi, il faut des conditions de luminosité spécifiques. De plus, notre système en l'état ne permet pas l'affichage de la carte. Cet affichage pourrait s'avérer très utile pour les personnes qui ont une perception lumineuse afin de bénéficier d'un retour visuel et proposer un système qui répond au mieux aux attentes d'utilisateurs. Nos travaux à moyen terme vont aborder cette problématique.

Afin de réaliser le suivi de la main dans des conditions de mobilité, nous pouvons nous appuyer sur les travaux de [1] : ce système de suivi repose sur une caméra de profondeur posée sur un socle réalisé en découpe laser (Figure 76 – gauche). La caméra de profondeur permet de détecter le doigt des utilisateurs. De plus, ce système est équipé d'un mini vidéoprojecteur afin de pouvoir projeter sur n'importe quelle surface. Ce système est ainsi facilement transportable. Ainsi, l'utilisateur peut explorer des cartes physiques et/ou numériques dans différents endroits.

Une autre solution serait d'utiliser un Xperia Touch², voir Figure 76 – droite. Ce système commercialisé, muni d'un vidéoprojecteur, permet de rendre interactive et tactile n'importe quelle surface : le système est capable de détecter les gestes de l'utilisateur comme des touchés ou des balayages afin de déclencher des événements logiciels. De plus, ce système multitouch permet de suivre plusieurs doigts lors de l'exploration. Ce système serait très facilement adaptable dans des écoles ou des musées par exemple. L'utilisateur pourrait alors parcourir avec un doigt le graphique projeté et recevoir les informations sur sa montre connectée. Nos techniques d'interaction seraient alors utilisables dans différents contextes. Nous sommes conscients que pour l'exploration bimanuelle et pour profiter d'un retour bilatéral, il est difficile pour l'utilisateur de posséder deux montres connectées. Pour pallier ce problème, nous pouvons imaginer l'utilisation d'un bracelet vibrant à chaque poignet et d'écouteurs permettant de profiter d'un retour bilatéral.



Figure 76. À gauche : Système proposé par [1] ; à droite : Xperia Touch.

² <https://www.sonymobile.com/fr/products/smart-products/xperia-touch/>

2.1.2 ÉTENDRE NOS TECHNIQUES D'INTERACTION AUX AUTRES TYPES DE GRAPHIQUES

Les techniques d'interaction que nous avons développées et évaluées sont basées sur l'exploration de cartes géographiques numériques. Nous avons vu que ces cartes peuvent être complexes et contenir plusieurs jeux de données. Pour l'exploration de cartes numériques, nous avons proposé la synthèse vocale pour décrire les éléments de la carte (dans notre cas, le nom des différentes régions et leurs données correspondantes) et la vibration pour donner la position des éléments (la frontière entre les différentes régions). Bien que les cartes soient largement utilisées dans les écoles spécialisées dans les cours de géographie ou de locomotion, il existe d'autres types de graphique. Nous suggérons que nos résultats soient généralisables à l'exploration d'autres types de graphiques comme des dessins ou des graphes mathématiques. Pour explorer ces différents graphiques, nous pouvons respecter le même principe que pour les cartes : la synthèse vocale pour la description et la vibration pour les informations de position. D'autres types de graphes permettent de poser des contextes d'interaction plus intéressants. Par exemple, pour l'exploration de graphes mathématiques, la vibration peut représenter les courbes du graphe et la synthèse vocale donner les valeurs du graphe et les positions en abscisses et coordonnées (comme valeur 15, en abscisse 3 et coordonnée 5). En fonction de l'expertise utilisateur, la fonction de filtrage des données peut donner les informations correspondantes à sa recherche (par exemple pour un graphe, être notifié uniquement quand les valeurs dépassent un certain seuil).

Il reste néanmoins difficile de suivre une ligne qui n'a pas de relief : l'utilisateur ne peut pas savoir à l'avance la direction et/ou l'angle de la ligne à suivre par rapport à sa position. Pour lui donner des indications de direction à suivre, nous pourrions nous appuyer sur des patterns de vibrations pour indiquer les directions possibles de la ligne [23]. Par exemple, une vibration signifie aller à gauche, deux vibrations aller à droite, etc. Il serait intéressant de faire une étude sur les patterns de vibrations permettant de suivre une ligne numérique (sans aucun relief) avec le doigt.

2.2 PERSPECTIVES A LONG TERME

2.2.1 EXPLORATION MULTITOUCH

L'exploration de cartes numériques que nous avons proposée repose sur des interactions avec le(s) index uniquement. Une amélioration possible de ce système serait de proposer une interaction avec les autres doigts de la main [96,100,145]. Cette perspective se confronte à des défis techniques et d'utilisabilité. Manshad *et al.* [96] ont proposé un prototype de gant haptique peu coûteux permettant aux personnes déficientes visuelles d'interagir avec des graphes au travers de plusieurs points de contact sur un écran tactile (voir Figure 77 – gauche). Ce gant permet d'appliquer un retour sur plusieurs doigts de la main pour de l'exploration de graphiques en relief. Les résultats ont montré que la visualisation d'un graphique utilisant plusieurs points de contacts avec un retour vibratoire est plus rapide que l'interaction avec un seul point de contact utilisant un retour auditif. Pour permettre des interactions en entrée, le FingerReader [145] (voir Figure 77 – droite) est un système qui permet d'analyser le contenu de la scène visuelle et de le retranscrire en utilisant la synthèse vocale. Le système est doté d'une caméra et analyse le flux vidéo (il peut détecter du texte, des visages, des objets, etc.).

Une possibilité serait de combiner ces deux prototypes et d'y associer nos résultats, afin d'avoir un dispositif incluant un système mobile d'analyse de la scène visuelle en entrée et des interactions en sortie sur chaque doigt. L'utilisateur pourrait alors explorer les graphiques numériques et/ou physiques librement avec ses doigts et recevoir des informations auditives et vibratoires qui viennent augmenter le graphique exploré. Une limitation de ce concept est le fait que l'utilisateur peut avoir autant de retours auditifs que de doigts qui explorent. Guerreiro *et al.* [50] ont mené une étude basée sur le *cocktail party effect*. Ils ont demandé aux participants de rechercher un contenu pertinent en écoutant deux, trois ou quatre voix en simultanée. Ils ont montré que les personnes déficientes visuelles peuvent écouter deux ou trois voix simultanées. Ce sont des

résultats à prendre en compte lors d’une future étude. Il serait intéressant de réaliser une étude visant à évaluer les performances des utilisateurs lors de l’exploration de graphiques en utilisant ces techniques d’interactions.



Figure 77. À gauche : le gant vibratoire de [96] ; à droite : FingerReader de [145].

2.2.2 EXPLORATION TANGIBLE DYNAMIQUE

Dans la section 3.1.2, nous avons vu que les graphiques tangibles avaient des avantages pour l’exploration numérique. Ils permettent une exploration directe et utilisent des objets physiques. Ces objets offrent un repère lors de l’exploration de graphiques numériques. Ils peuvent être immobiles [31] ou mobiles [52]. Néanmoins, ils ne proposent pas d’interactions auditives. Ce manque peut être comblé en combinant nos techniques d’interaction pour l’exploration de graphiques tangibles. L’utilisateur peut explorer la carte numérique avec les différents objets qui représentent des points d’intérêt. Il serait intéressant d’observer comment les utilisateurs peuvent explorer un graphique de façon haptique, et recevoir un retour auditif et/ou vibratoire. Des conflits perceptuels peuvent avoir lieu. Ces questions de recherche devront être abordées dans le futur.

BIBLIOGRAPHIE

1. Jérémy Albouys-Perrois, Jérémy Laviole, Carine Briant, Anke Brock, and Anke M Brock. 2018. *Towards a multisensory augmented reality map for blind and low vision people: A participatory design approach*. ACM. Retrieved March 3, 2019 from <https://hal-enac.archives-ouvertes.fr/hal-01801116>
2. Damien Appert, Damien Camors, Jean-Baptiste Durand, and Christophe Jouffrais. 2015. Assistance tactile    la localisation de cibles périphériques pour des personnes    vision tubulaire. 1–10. Retrieved March 3, 2019 from <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01282065/>
3. Mauro Avila Sota, Alexandra Voit, Ahmed Shereen Hassan, Albrecht Schmidt, and Tonja Machulla. 2018. Self-Identifying Tactile Overlays. In *Proceedings of the 20th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility - ASSETS '18*, 423–425. <https://doi.org/10.1145/3234695.3241021>
4. Shiri Azenkot, Richard E Ladner, and Jacob O Wobbrock. *Smartphone Haptic Feedback for Nonvisual Wayfinding*. Retrieved March 11, 2019 from [http://delivery.acm.org/10.1145/2050000/2049607/p281-azenkot.pdf?ip=195.220.58.237&id=2049607&acc=ACTIVE SERVICE&key=7EBF6E77E86B478F.DD49F42520D8214D.4D4702B0C3E38B35.4D4702B0C3E38B35&__acm__=1552299018_1b356e44a15e62b9a727aef30d18d912](http://delivery.acm.org/10.1145/2050000/2049607/p281-azenkot.pdf?ip=195.220.58.237&id=2049607&acc=ACTIVE%20SERVICE&key=7EBF6E77E86B478F.DD49F42520D8214D.4D4702B0C3E38B35.4D4702B0C3E38B35&__acm__=1552299018_1b356e44a15e62b9a727aef30d18d912)
5. PAUL BACH-Y-RITA, CARTER C. COLLINS, FRANK A. SAUNDERS, BENJAMIN WHITE, and LAWRENCE SCADDEN. 1969. Vision Substitution by Tactile Image Projection. *Nature* 221, 5184: 963–964. <https://doi.org/10.1038/221963a0>
6. Sina Bahram. 2013. Multimodal eyes-free exploration of maps: TIKISI for maps. *ACM SIGACCESS Accessibility and Computing* 106: 3–11. <https://doi.org/10.1145/2505401.2505402>
7. Sally M. Bailes and Robert M. Lambert. 1986. Cognitive aspects of haptic form recognition by blind and sighted subjects. *British Journal of Psychology* 77, 4: 451–458. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1986.tb02210.x>
8. Marlene Behrmann and Catherine Ewell. 2003. Expertise in Tactile Pattern Recognition. *Psychological Science* 14, 5: 480–492. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.02458>
9. B L Bentzen. 1983. Tactile specifications of route configurations. In *Proceedings of the First International Symposium on Maps and Graphics for the Visually Handicapped*. Washington, DC: Association of American Geographers.
10. Paul Bertelson, Philippe Mousty, and Graziella D’Alimonte. 1985. A Study of Braille Reading: 2. Patterns of Hand Activity in One-Handed and Two-Handed Reading. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A* 37, 2: 235–256. <https://doi.org/10.1080/14640748508400932>
11. Jacques Bertin. 1983. Semiology of Graphics: Diagrams, Networks, Maps [orig. Semilogie Graphique].
12. Nadine Besse, Juan J. Zarate, Samuel Rosset, and Herbert R. Shea. 2017. Flexible haptic display with 768 independently controllable shape memory polymers taxels. In *2017 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)*, 323–326.

- <https://doi.org/10.1109/TRANSDUCERS.2017.7994054>
13. Meera Blattner, Denise Sumikawa, and Robert Greenberg. 1989. Earcons and Icons: Their Structure and Common Design Principles. *Human-Computer Interaction* 4, 1: 11–44. https://doi.org/10.1207/s15327051hci0401_1
 14. Luca Brayda, Fabrizio Leo, Caterina Baccelliere, Elisabetta Ferrari, Claudia Vignini, Luca Brayda, Fabrizio Leo, Caterina Baccelliere, Elisabetta Ferrari, and Claudia Vignini. 2018. Updated Tactile Feedback with a Pin Array Matrix Helps Blind People to Reduce Self-Location Errors. *Micromachines* 9, 7: 351. <https://doi.org/10.3390/mi9070351>
 15. Stephen Brewster and Lorna M. Brown. 2004. Tactons: structured tactile messages for non-visual information display. In *AUIC'04 Proceedings of the fifth conference on Australasian user interface*, 15–23. Retrieved September 11, 2013 from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=976310.976313>
 16. Anke Brock, Samuel Lebaz, Bernard Oriola, Delphine Picard, Christophe Jouffrais, and Philippe Truillet. 2012. Kin'touch: understanding how visually impaired people explore tactile maps. In *Proceedings of the 2012 ACM annual conference extended abstracts on Human Factors in Computing Systems Extended Abstracts - CHI EA '12*, 2471. <https://doi.org/10.1145/2212776.2223821>
 17. Anke M Brock. 2013. Interactive Maps for Visually Impaired People: Design, Usability and Spatial Cognition. Université Toulouse 3 Paul Sabatier. Retrieved from <http://bit.ly/ThesisBrock2014>
 18. Anke M. Brock, Philippe Truillet, Bernard Oriola, Delphine Picard, and Christophe Jouffrais. 2015. Interactivity Improves Usability of Geographic Maps for Visually Impaired People. *Human-Computer Interaction* 30: 156–194.
 19. Anke Brock, Philippe Truillet, Bernard Oriola, and Christophe Jouffrais. 2010. Usage of multimodal maps for blind people: why and how. In *ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces - ITS '10*, 247. <https://doi.org/10.1145/1936652.1936699>
 20. Emeline Brulé, Gilles Bailly, Anke Brock, Frédéric Valentin, Grégoire Denis, and Christophe Jouffrais. 2016. MapSense: Multi-Sensory Interactive Maps for Children Living with Visual Impairments. In *International Conference for Human-Computer Interaction (CHI 2016)*, 445–457.
 21. Erin Buehler, Shaun K. Kane, and Amy Hurst. 2014. ABC and 3D: opportunities and obstacles to 3D printing in special education environments. In *Proceedings of the 16th international ACM SIGACCESS conference on Computers & accessibility - ASSETS '14*, 107–114. <https://doi.org/10.1145/2661334.2661365>
 22. Benjamin Campin, William McCurdy, Louis Brunet, and Eva Siekierska. 2003. SVG Maps for People with Visual Impairment. In *SVG OPEN Conference*. Retrieved May 7, 2010 from <http://www.svgopen.org/2003/papers/svgmappingforpeoplewithvisualimpairments/>
 23. Marta G Carcedo, Soon Hau Chua, Simon Perrault, Paweł Woźniak, Raj Joshi, Mohammad Obaid, Morten Fjeld, and Shengdong Zhao. 2016. HapticColor: Interpolating Color Information as Haptic Feedback to Assist the Colorblind. *CHI*. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858220>
 24. Jessica R Cauchard, Janette L Cheng, Thomas Pietrzak, and James A Landay. ActiVibe: Design and Evaluation of Vibrations for Progress Monitoring. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858046>
 25. Qin Chen, Simon T Perrault, Quentin Roy, and Lonce Wyse. 2018. Effect of Temporality, Physical Activity and Cognitive Load on Spatiotemporal Vibrotactile Pattern Recognition.

- <https://doi.org/10.1145/3206505.3206511>
26. Ádám Csapó and György Wersényi. 2013. Overview of auditory representations in human-machine interfaces. *ACM Computing Surveys* 46, 2: 1–23. <https://doi.org/10.1145/2543581.2543586>
 27. PW Davidson. 1972. Haptic judgments of curvature by blind and sighted humans. *Journal of experimental*. Retrieved March 3, 2019 from <https://psycnet.apa.org/record/1972-27569-001>
 28. Franco Delogu, Massimiliano Palmiero, Stefano Federici, Catherine Plaisant, Haixia Zhao, and Olivetti Belardinelli. 2010. Non-visual exploration of geographic maps: Does sonification help? *Disability & Rehabilitation: Assistive Technology* 5, 3: 164–174. <https://doi.org/10.3109/17483100903100277>
 29. Julie Ducasse. 2017. Tabletop tangible maps and diagrams for visually impaired users. Université de Toulouse.
 30. Julie Ducasse, Anke M Brock, and Christophe Jouffrais. 2018. Accessible Interactive Maps for Visually Impaired Users. In *Mobility in Visually Impaired People - Fundamentals and ICT Assistive Technologies*, Edwige Pissaloux and Ramiro Velasquez (eds.). Springer, 537–584. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54446-5_17
 31. Julie Ducasse, Marc J-M Macé, Marcos Serrano, and Christophe Jouffrais. 2016. Tangible Reels: Construction and Exploration of Tangible Maps by Visually Impaired Users. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '16*, 2186–2197. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858058>
 32. Julie Ducasse, Marc J M Mace, Bernard Oriola, and Christophe. Jouffrais. 2018. BotMap: Non-Visual Panning and Zooming with an Actuated Tabletop Tangible Interface. *Tochi* in press.
 33. P Edman. 1992. Tactile graphics. Retrieved January 14, 2019 from https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=C7vq4-Th71AC&oi=fnd&pg=PR11&dq=tactile+graphics&ots=prggs1oyEW&sig=K_pscxDQpwlrMxpy0fpYcf2xtt4
 34. Y Eriksson, G Jansson, and M Strucel. 2003. Tactile maps: guidelines for the production of maps for the visually impaired.
 35. Y Eriksson and M Strucel. 1995. Production of tactile graphics on swellpaper.
 36. Steven Fortune. 1987. A sweepline algorithm for Voronoi diagrams. *Algorithmica* 2, 1–4: 153–174. <https://doi.org/10.1007/BF01840357>
 37. Giovanni Fusco and VS Valerie S Morash. 2015. The Tactile Graphics Helper: Providing Audio Clarification for Tactile Graphics Using Machine Vision. In *Proceedings of the 17th International ACM SIGACCESS Conference on Computers & Accessibility (ASSETS '15)*, 97–106. <https://doi.org/10.1145/2700648.2809868>
 38. F Gaunet and Thinus-Blanc C. 1996. Early-blind subjects' spatial abilities in the locomotor space: Exploratory strategies and reaction-to-change performance. *Perception*.
 39. Florence Gaunet, Jean-Luc Martinez, and Catherine Thinus-Blanc. 1997. Early-Blind Subjects' Spatial Representation of Manipulatory Space: Exploratory Strategies and Reaction to Change. *Perception* 26, 3: 345–366. <https://doi.org/10.1068/p260345>
 40. William Gaver. 1989. The SonicFinder: An Interface That Uses Auditory Icons. *Human-Computer*

- Interaction* 4, 1: 67–94. https://doi.org/10.1207/s15327051hci0401_3
41. E Gentaz, Y Hatwell, and A Streri. 2003. Touching for Knowing: Cognitive Psychology of Haptic Manual Perception. Retrieved January 14, 2019 from <https://scholar.google.com/scholar?cluster=2140669587688231046&hl=en&oi=scholar>
 42. Stéphanie Giraud, Anke M. Brock, Marc J.M. Macé, and Christophe Jouffrais. 2017. Map learning with a 3D printed interactive small-scale model: Improvement of space and text memorization in visually impaired students. *Frontiers in Psychology* 8: 10. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00930>
 43. Stéphanie Giraud and Christophe Jouffrais. 2016. Empowering Low-Vision Rehabilitation Professionals with “Do-It-Yourself” Methods. . Springer, Cham, 61–68. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41267-2_9
 44. Nicholas A. Giudice, Hari Prasath Palani, Eric Brenner, and Kevin M. Kramer. 2012. Learning non-visual graphical information using a touch-based vibro-audio interface. In *Proceedings of the 14th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility - ASSETS '12*, 103–110. <https://doi.org/10.1145/2384916.2384935>
 45. Mathieu Le Goc, Lawrence H. Kim, Ali Parsaei, Jean-Daniel Fekete, Pierre Dragicevic, and Sean Follmer. 2016. Zooids: Building Blocks for Swarm User Interfaces. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '16*, 97–109. <https://doi.org/10.1145/2984511.2984547>
 46. Cagatay Goncu, Anuradha Madugalla, Simone Marinai, and Kim Marriott. 2015. Accessible On-Line Floor Plans. In *World Wide Web Conference Committee (IW3C2)*, 388–398.
 47. T. Götzelmann. 2018. Visually Augmented Audio-Tactile Graphics for Visually Impaired People. *ACM Transactions on Accessible Computing* 11, 2: 1–31. <https://doi.org/10.1145/3186894>
 48. Timo Götzelmann and Aleksander Pavkovic. 2014. Towards automatically generated tactile detail maps by 3D Printers for Blind Persons. In *Proceedings of ICCHP 2014, LNCS Vol 8548*, 1–7. Retrieved October 12, 2015 from http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-08599-9_1
 49. William Grussenmeyer, Jesel Garcia, and Fang Jiang. 2016. Feasibility of using haptic directions through maps with a tablet and smart watch for people who are blind and visually impaired. In *Proceedings of the 18th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services - MobileHCI '16*, 83–89. <https://doi.org/10.1145/2935334.2935367>
 50. João Guerreiro and Daniel Gonçalves. 2014. Text-to-Speeches: Evaluating the Perception of Concurrent Speech by Blind People. *ASSETS*. <https://doi.org/10.1145/2661334.2661367>
 51. Tiago Guerreiro, Kyle Montague, João Guerreiro, Rafael Nunes, Hugo Nicolau, and Daniel Gonçalves. 2015. Blind People Interacting with Large Touch Surfaces : Strategies for One-handed and Two-handed Exploration. In *Proceedings of the 2015 International Conference on Interactive Tabletops & Surfaces*, 25–34. Retrieved from <http://www.lasige.di.fc.ul.pt/sites/default/files/article/attachments/BlindPeopleInteracting...l.pdf>
 52. Darren Guinness, Annika Muehlbradt, Daniel Szafir, and Shaun K. Kane. 2018. The Haptic Video Player. In *Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces - ISS '18*, 203–211. <https://doi.org/10.1145/3279778.3279805>
 53. Aakar Gupta and Ravin Balakrishnan. 2016. DualKey: Miniature Screen Text Entry via Finger

- Identification. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '16*, 59–70. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858052>
54. Sandra G. Hart and Lowell E. Staveland. 1988. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In *Human Mental Workload*, Peter A. Hancock and Najmedin Meshkati (eds.). Elsevier, 139–183. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
 55. MA Heller, M McCarthy, and A Clark. 2005. Pattern perception and pictures for the blind. *Psicologica* 58: 310–323. Retrieved March 3, 2019 from <https://www.redalyc.org/html/169/16926112/>
 56. Morton A Heller. 1989. Picture and Pattern Perception in the Sighted and the Blind: The Advantage of the Late Blind. *Perception* 18, 3: 379–389. <https://doi.org/10.1068/p180379>
 57. Morton A Heller. 2002. Tactile picture perception in sighted and blind people. *Behavioural Brain Research* 135, 1–2: 65–68. <https://doi.org/Pm:12356435>
 58. Morton A. Heller, Jeffrey A. Calcaterra, Lynnetta L. Burson, and Lisa A. Tyler. 1996. Tactual picture identification by blind and sighted people: Effects of providing categorical information. *Perception & Psychophysics* 58, 2: 310–323. <https://doi.org/10.3758/BF03211884>
 59. Morton A Heller, Deneen D Brackett, Eric Scroggs, Heather Steffen, Kim Heatherly, and Shana Salik. 2002. Tangible Pictures: Viewpoint Effects and Linear Perspective in Visually Impaired People. *Perception* 31, 6: 747–769. <https://doi.org/10.1068/p3253>
 60. Morton A Heller, Deneen D Brackett, Kathy Wilson, Keiko Yoneyama, Amanda Boyer, and Heather Steffen. 2002. The Haptic Müller-Lyer Illusion in Sighted and Blind People. *Perception* 31, 10: 1263–1274. <https://doi.org/10.1068/p3340>
 61. EW Hill and P Ponder. 1976. Orientation and mobility techniques: A guide for the practitioner. *American Foundation for the Blind*. Retrieved January 14, 2019 from https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=I8-ju1d_WFEC&oi=fnd&pg=PT12&dq=orientation+and+mobility+techniques&ots=jbM9deNeUT&sig=vhRoyFfnmceb7p9OjEpLEZD8j5k
 62. EW Hill, JJ Rieser, MM Hill, and Hill M. 1993. How persons with visual impairments explore novel spaces: Strategies of good and poor performers. *Journal of visual impairment*. Retrieved January 14, 2019 from <http://psycnet.apa.org/record/1994-18302-001>
 63. Leona Holloway, Kim Marriott, and Matthew Butler. 2018. Accessible Maps for the Blind. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '18*, 1–13. <https://doi.org/10.1145/3173574.3173772>
 64. K Holmqvist, M Nyström, R Andersson, and R Dewhurst. 2011. Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures. Retrieved January 29, 2019 from https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=5rIDPV1EoLUC&oi=fnd&pg=PR12&dq=Eye+Tracking:+A+Comprehensive+Guide+to+Methods+and+Measures&ots=_w2GV-wLsN&sig=jFLqzYkxY6gknnXVm_aeen73hE
 65. M. T Horn. TopCode: Tangible Object Placement Codes. Retrieved from <http://hci.cs.tufts.edu/topcodes/>
 66. Mihail Ivanchev, Francis Zinke, and Ulrike Lucke. 2014. Pre-journey Visualization of Travel Routes for the Blind on Refreshable Interactive Tactile Displays. In *Proceedings of ICCHP 2014, LNCS Vol 8548*

- (Lecture Notes in Computer Science). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08599-9>
67. Gunnar Jansson, Imre Juhasz, and Arina Cammilton. 2006. Reading virtual maps with a haptic mouse: Effects of some modifications of the tactile and audio-tactile information. *British Journal of Visual Impairment* 24, 2: 60–66. <https://doi.org/10.1177/0264619606064206>
 68. Gunnar Jansson, Imre Juhasz, and Arina Cammilton. 2006. Reading virtual maps with a haptic mouse: Effects of some modifications of the tactile and audio-tactile information. *British Journal of Visual Impairment* 24, 2: 60–66. <https://doi.org/10.1177/0264619606064206>
 69. Gunnar Jansson and Patrik Pedersen. *OBTAINING GEOGRAPHICAL INFORMATION FROM A VIRTUAL MAP WITH A HAPTIC MOUSE 1*. Retrieved March 11, 2019 from <http://www.virtouch2.com>
 70. Hans-Christian Jetter, Svenja Leifert, Jens Gerken, Sören Schubert, and Harald Reiterer. 2012. Does (multi-)touch aid users' spatial memory and navigation in “panning” and in “zooming & panning” UIs? In *Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces - AVI '12*, 83–90. <https://doi.org/10.1145/2254556.2254575>
 71. Sergi Jordà, Günter Geiger, Marcos Alonso, and Martin Kaltenbrunner. 2007. The reacTable: exploring the synergy between live music performance and tabletop tangible interfaces. In *Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction - TEI '07*, 139. <https://doi.org/10.1145/1226969.1226998>
 72. Nikolaos Kaklanis, Konstantinos Votis, and Dimitrios Tzovaras. 2013. Open Touch/Sound Maps: A system to convey street data through haptic and auditory feedback. *Computers & Geosciences* 57: 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.03.005>
 73. Shaun K. Kane, Jeffrey P. Bigham, and Jacob O. Wobbrock. 2008. Slide Rule: making mobile touch screens accessible to blind people using multi-touch interaction techniques. In *Proceedings of the 10th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility - Assets '08*, 73–80. <https://doi.org/10.1145/1414471.1414487>
 74. Shaun K. Kane, Meredith Ringel Morris, and Jacob O. Wobbrock. 2013. Touchplates: low-cost tactile overlays for visually impaired touch screen users. In *Proceedings of the 15th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility - ASSETS '13*, 1–8. <https://doi.org/10.1145/2513383.2513442>
 75. Shaun K. Kane, Meredith Ringel Morris, Annuska Z. Perkins, Daniel Wigdor, Richard E. Ladner, Jacob O. Wobbrock, Meredith Ringel Morris, Annuska Z. Perkins, Daniel Wigdor, Richard E. Ladner, Jacob O. Wobbrock, and Meredith Ringel Morris. 2011. Access Overlays: Improving Non-Visual Access to Large Touch Screens for Blind Users. In *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '11*, 273–282. <https://doi.org/10.1145/2047196.2047232>
 76. Shaun K Kane and Jeffrey P Bigham. Tracking @stemxcomet: Teaching Programming to Blind Students via 3D Printing, Crisis Management, and Twitter. <https://doi.org/10.1145/2538862.2538975>
 77. SK Kane, JO Wobbrock, and RE Ladner. 2011. Usable gestures for blind people: understanding preference and performance. *CHI '11*: 413–422. Retrieved July 28, 2014 from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1979001>
 78. John M Kennedy and Juan Bai. 2002. Haptic Pictures: Fit Judgments Predict Identification, Recognition Memory, and Confidence. *Perception* 31, 8: 1013–1026. <https://doi.org/10.1068/p3259>

BIBLIOGRAPHIE

79. Roberta L. Klatzky. 1999. Path completion after haptic exploration without vision: Implications for haptic spatial representations. *Perception & Psychophysics* 61, 2: 220–235. <https://doi.org/10.3758/BF03206884>
80. Roberta L. Klatzky and Susan J. Lederman. 1988. The Intelligent Hand. In *Psychology of Learning and Motivation*. 121–151. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(08\)60027-4](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60027-4)
81. Roberta L. Klatzky, Jack M. Loomis, Susan J. Lederman, Hiromi Wake, and Naofumi Fujita. 1993. Haptic identification of objects and their depictions. *Perception & Psychophysics* 54, 2: 170–178. <https://doi.org/10.3758/BF03211752>
82. M.W. Krueger and Deborah Gilden. 1997. KnowWhere™: an Audio/Spatial Interface for Blind People. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Auditory Display (ICAD)* '97.
83. Megan M. Lawrence, Nicholas Martinelli, and Rachel Nehmer. 2009. A Haptic Soundscape Map of the University of Oregon. *Journal of Maps* 5, 1: 19–29. <https://doi.org/10.4113/jom.2009.1028>
84. Samuel Lebaz, Christophe Jouffrais, and Delphine Picard. 2012. Haptic identification of raised-line drawings: high visuospatial imagers outperform low visuospatial imagers. *Psychological research* 76, 5: 667–675. <https://doi.org/10.1007/s00426-011-0351-6>
85. S. J. Lederman and R. L. Klatzky. 2009. Haptic perception: A tutorial. *Attention, Perception & Psychophysics* 71, 7: 1439–1459. <https://doi.org/10.3758/APP.71.7.1439>
86. Susan J. Lederman and Roberta L. Klatzky. 1993. Extracting object properties through haptic exploration. *Acta Psychologica* 84, 1: 29–40. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(93\)90070-8](https://doi.org/10.1016/0001-6918(93)90070-8)
87. Susan J. Lederman, Roberta L. Klatzky, Cynthia Chataway, and Craig D. Summers. 1990. Visual mediation and the haptic recognition of two-dimensional pictures of common objects. *Perception & Psychophysics* 47, 1: 54–64. <https://doi.org/10.3758/BF03208164>
88. Susan J Lederman and Roberta L Klatzky. 1987. Exploring Environments by Hand or Foot: Time-Based Heuristics for Encoding Distance in Movement Space OCT Guidance for Microsurgery View project FingerSight View project. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.13.4.606>
89. Wanyu Liu, Rafael Lucas D'Oliveira, Michel Beaudouin-Lafon, and Olivier Rioul. 2017. BIGnav: Bayesian Information Gain for Guiding Multiscale Navigation. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '17*, 5869–5880. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025524>
90. AK Lobben. 2005. Identifying the needs of tactile map makers. In *Proceedings of XXII International Cartographic Conference A Coruna 2005 proceedings*. Retrieved April 30, 2015 from http://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2005/htm/pdf/oral/TEMA22/Session_1/AMY_LOBBEN2.pdf
91. Amy K Lobben. 2005. Identifying the needs of tactile map makers. In *Proceedings of XXII International Cartographic Conference*, 9–16. Retrieved March 4, 2019 from www.afb.org
92. María-Jesús Lobo, Emmanuel Pietriga, and Caroline Appert. 2015. An Evaluation of Interactive Map Comparison Techniques. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '15*, 3573–3582. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702130>
93. Gerald L. Lohse, Kevin Biolsi, Neff Walker, and Henry H. Rueter. 1994. A classification of visual

- representations. *Communications of the ACM* 37, 12: 36–49. <https://doi.org/10.1145/198366.198376>
94. Jerry Lohse, Henry Rueter, Kevin Biolsi, Neff Walker, and Ann Arbor. 1990. Classifying Visual Knowledge Representations: A Foundation for Visualization Research. *Ieee*, 131–138. <https://doi.org/10.1109/VISUAL.1990.146374>
 95. J.M. Loomis, R.L. Klatzky, and Susan J. Lederman. 1991. Similarity of tactual and visual picture recognition with limited field of view. *Perception* 20, 2: 167–177. Retrieved February 3, 2012 from http://www.psych.ucsb.edu/~loomis/loomis_91.pdf
 96. Muhanad S. Manshad and Ahmad S. Manshad. 2008. Multimodal vision glove for touchscreens. In *Proceedings of the 10th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility - Assets '08*, 251. <https://doi.org/10.1145/1414471.1414523>
 97. Muhanad S. Manshad, Enrico Pontelli, and Shakir J. Manshad. 2012. Trackable Interactive Multimodal Manipulatives: Towards a Tangible User Environment for the Blind. . Springer, Berlin, Heidelberg, 664–671. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31534-3_97
 98. Giulio Marin, Fabio Dominio, and Pietro Zanuttigh. 2014. Hand gesture recognition with leap motion and kinect devices. In *2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 1565–1569. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2014.7025313>
 99. Benoît Martin, Robin Vivian, and Isabelle Pecci. *Haptic Feedback to Help Geometry Learning for Visually Impaired Child MICOLE View project eGlasses View project Haptic Feedback to Help Geometry Learning for Visually Impaired Child*. Retrieved March 11, 2019 from <https://www.researchgate.net/publication/268362447>
 100. Fabrice Maurel. 2015. La TactiNET. *27ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine*. Retrieved August 24, 2019 from <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01219968/>
 101. David McGookin, Stephen A. Brewster, and WeiWei Jiang. 2008. Investigating touchscreen accessibility for people with visual impairments. In *Proceedings of the 5th Nordic conference on Human-computer interaction building bridges - NordiCHI '08*, 298–307. <https://doi.org/10.1145/1463160.1463193>
 102. David K. McGookin and Stephen A. Brewster. 2007. Graph builder: Constructing non-visual visualizations. *People and Computers XX—Engage*: 263–278.
 103. David McGookin, Euan Robertson, and Stephen S.a. Brewster. 2010. Clutching at Straws: Using Tangible Interaction to Provide Non-Visual Access to Graphs. In *Proceedings of the 28th international conference on Human factors in computing systems - CHI '10*, 1715–1724. <https://doi.org/10.1145/1753326.1753583>
 104. Susanna Millar. 1994. *Understanding and Representing Space Theory and Evidence from Studies with Blind and Sighted Children*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198521426.001.0001>
 105. Susanna Millar and Zainab Al-Attar. 2001. Illusions in reading maps by touch: Reducing distance errors. *British Journal of Psychology* 92, 4: 643–657. <https://doi.org/10.1348/000712601162392>
 106. Andrew P. Milne, Alissa N. Antle, and Bernhard E. Riecke. 2011. Tangible and body-based interaction with auditory maps. In *CHI EA '11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 2329. <https://doi.org/10.1145/1979742.1979874>

BIBLIOGRAPHIE

107. Valerie S Morash, Allison E Connell Pensky, Steven T W Tseng, and Joshua A Miele. 2014. Effects of using multiple hands and fingers on haptic performance in individuals who are blind. *Perception* 43, 6: 569–588.
108. Neville Moray. 1959. Attention in Dichotic Listening: Affective Cues and the Influence of Instructions. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 11, 1: 56–60. <https://doi.org/10.1080/17470215908416289>
109. National Federation of the Blind. 2009. *The Braille Literacy Crisis in America: Facing the Truth, Reversing the Trend, Empowering the Blind*.
110. Carson Y. Nolan and June E. Morris. 1971. Improvement of Tactual Symbols for Blind Children. Final Report. 88. Retrieved from <http://eric.ed.gov/?id=ED070228>
111. Sile O'Modhrain, Nicholas A. Giudice, John A. Gardner, and Gordon E. Legge. 2015. Designing Media for Visually-Impaired Users of Refreshable Touch Displays: Possibilities and Pitfalls. *IEEE Transactions on Haptics* 8, 3: 248–257. <https://doi.org/10.1109/TOH.2015.2466231>
112. Ayberk Özgür, Séverin Lemaignan, Wafa Johal, Maria Beltran, Manon Briod, Léa Pereyre, Francesco Mondada, and Pierre Dillenbourg. 2017. Cellulo: Versatile Handheld Robots for Education. In *Proceedings of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction - HRI '17*, 119–127. <https://doi.org/10.1145/2909824.3020247>
113. Hariprasath Palani, Uro Giudice, and Nicholas A. Giudice. 2016. Evaluation of Non-visual Zooming Operations on Touchscreen Devices. . Springer, Cham, 162–174. https://doi.org/10.1007/978-3-319-40244-4_16
114. Sabrina Panéels and Jonathan C. Roberts. 2010. Review of designs for haptic data visualization. *IEEE Transactions on Haptics* 3, 2: 119–137. <https://doi.org/10.1109/TOH.2009.44>
115. Peter Parente and Gary Bishop. 2003. BATS : The Blind Audio Tactile Mapping System. In *Proceedings of ACM South Eastern Conference*.
116. Don Parkes. 1988. “NOMAD”: An audio-tactile tool for the acquisition, use and management of spatially distributed information by partially sighted and blind persons. In *Proceedings of Second International Conference on Maps and Graphics for Visually Disabled People*, 24–29.
117. Huaishu Peng, Jennifer Mankoff, Scott E. Hudson, and James McCann. 2015. A Layered Fabric 3D Printer for Soft Interactive Objects. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '15*, 1789–1798. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702327>
118. Lorenzo Picinali, Amandine Afonso, Michel Denis, and Brian F.G. Katz. 2014. Exploration of architectural spaces by blind people using auditory virtual reality for the construction of spatial knowledge. *International Journal of Human-Computer Studies* 72, 4: 393–407. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2013.12.008>
119. Martin Pielot, Niels Henze, Wilko Heuten, and Susanne Boll. 2007. Tangible User Interface for the Exploration of Auditory City Map. In *Haptic and Audio Interaction Design, LNCS 4813* (Lecture Notes in Computer Science), 86–97. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-76702-2>
120. Martin Pielot, Benjamin Poppinga, and Susanne Boll. 2010. PocketNavigator: Vibro-tactile waypoint navigation for everyday mobile devices. In *MobileHCI 2010*, 423–426. Retrieved September 19, 2011 from <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1851696>

BIBLIOGRAPHIE

121. Martin Pielot, Benjamin Poppinga, Wilko Heuten, and Susanne Boll. 2011. *A Tactile Compass for Eyes-Free Pedestrian Navigation*. Retrieved March 3, 2019 from <http://www.smh.com.au/digital-life/mp3s/pedestrian-death-rise->
122. Thomas Pietrzak, Andrew Crossan, Stephen A. Brewster, Benoît Martin, and Isabelle Pecci. 2009. Creating usable pin array tactons for non-visual information. *IEEE Transactions on Haptics* 2, 2: 61–72. Retrieved from <http://eprints.gla.ac.uk/43828/>
123. Thomas Pietrzak, Andrew Crossan, Stephen A. Brewster, Benoît Martin, and Isabelle Pecci. 2009. Exploration de formes géométriques par le toucher. In *Proceedings of the 21st International Conference on Association Francophone d'Interaction Homme-Machine - IHM '09*, 251. <https://doi.org/10.1145/1629826.1629866>
124. Thomas Pietrzak, Benoît Martin, and Isabelle Pecci. 2005. Affichage d'informations par des impulsions haptiques. In *Proceedings of the 17th conference on 17ème Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine - IHM 2005*, 223–226. <https://doi.org/10.1145/1148550.1148582>
125. Thomas Pietrzak, Benoît Martin, Isabelle Pecci, Rami Saarinen, Roope Raisamo, and Janne Järvi. 2007. The micole architecture: multimodal support for inclusion of visually impaired children. In *Proceedings of the ninth international conference on Multimodal interfaces - ICMI '07*, 193. <https://doi.org/10.1145/1322192.1322227>
126. Thomas Pietrzak, Isabelle Pecci, and Benoît Martin. 2006. Static and dynamic tactile directional cues experiments with VTPlayer mouse. 63–68. Retrieved March 11, 2019 from <https://hal.inria.fr/hal-00671517/>
127. Benjamin Poppinga, Charlotte Magnusson, Martin Pielot, and Kirsten Rasmus-Gröhn. 2011. TouchOver map: Audio-Tactile Exploration of Interactive Maps. In *Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services - MobileHCI '11*, 545–550. <https://doi.org/10.1145/2037373.2037458>
128. Halley P. Profita, James Clawson, Scott Gilliland, Clint Zeagler, Thad Starner, Jim Budd, and Ellen Yi-Luen Do. 2013. Don't mind me touching my wrist. In *Proceedings of the 17th annual international symposium on International symposium on wearable computers - ISWC '13*, 89. <https://doi.org/10.1145/2493988.2494331>
129. Helen C. Purchase. 2014. Twelve years of diagrams research. *Journal of Visual Languages and Computing* 25, 2: 57–75. <https://doi.org/10.1016/j.jvlc.2013.11.004>
130. Ravi Rastogi and Dianne T.V. Pawluk. 2010. Automatic, intuitive zooming for people who are blind or visually impaired. In *Proceedings of the 12th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility - ASSETS '10*, 239–240. <https://doi.org/10.1145/1878803.1878850>
131. Ravi Rastogi, Dianne T Pawluk, and Jessica M Ketchum. 2010. Issues of Using Tactile Mice by Individuals Who Are Blind and Visually Impaired. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 18, 3: 311–318. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2010.2045008>
132. Ravi Rastogi, T. V. Dianne Pawluk, and Jessica Ketchum. 2013. Intuitive Tactile Zooming for Graphics Accessed by Individuals Who are Blind and Visually Impaired. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 21, 4: 655–663. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2013.2250520>
133. G Révész. 1950. Psychology and art of the blind. Retrieved January 14, 2019 from <http://psycnet.apa.org/record/1951-03367-000>

BIBLIOGRAPHIE

134. Matthew T. Rice, R. Daniel Jacobson, Reinald G. Golledge, and David Jones. 2005. Design considerations for haptic and auditory map interfaces. *Cartography and Geographic Information Science* 32, 4: 381–391. Retrieved from <http://www.ingentaconnect.com/content/acsm/cagis/2005/00000032/00000004/art00014>
135. Anne Roudaut, Stéphane Huot, and Eric Lecolinet. 2008. TapTap and MagStick: Improving One-Handed Target Acquisition on Small Touch-screens. In *Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces - A VI '08*, 146. <https://doi.org/10.1145/1385569.1385594>
136. Jonathan Rowell and Simon Ungar. 2003. The world of touch: an international survey of tactile maps. Part 1: production. *British Journal of Visual Impairment* 21, 3: 98–104. <https://doi.org/10.1177/026461960302100303>
137. Sonja Rümelin, Enrico Rukzio, and Robert Hardy. 2011. NaviRadar: a novel tactile information display for pedestrian navigation. In *Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '11*, 293. <https://doi.org/10.1145/2047196.2047234>
138. Dario D. Salvucci and Joseph H. Goldberg. 2000. Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols. In *Proceedings of the symposium on Eye tracking research & applications - ETRA '00*, 71–78. <https://doi.org/10.1145/355017.355028>
139. Jochen Schneider and Thomas Strothotte. 1999. Virtual Tactile Maps. In *Proceedings of HCI International*, 531–535. Retrieved August 16, 2013 from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=647943.742651>
140. Jochen Schneider and Thomas Strothotte. 2000. Constructive exploration of spatial information by blind users. In *Proceedings of the fourth international ACM conference on Assistive technologies - Assets '00*, 188–192. <https://doi.org/10.1145/354324.354375>
141. Andrew Sears and Vicki L Hanson. 2011. *Representing Users in Accessibility Research*. Retrieved March 13, 2019 from http://delivery.acm.org/10.1145/1980000/1979268/p2235-sears.pdf?ip=195.220.58.237&id=1979268&acc=ACTIVE_SERVICE&key=7EBF6E77E86B478F.DD49F42520D8214D.4D4702B0C3E38B35.4D4702B0C3E38B35&__acm__=1552486224_e00e01f82341eacb784d23efd852c691
142. G. Seisenbacher, P. Mayer, P. Panek, and W.L. Zagler. 2005. 3D-Finger – System for Auditory Support of Haptic Exploration in the Education of Blind and Visually Impaired Students – Idea and Feasibility Study. In *8th European conference for the advancement of assistive technology in europe - AAATE*, 73–77.
143. Caterina Senette, Maria Claudia Buzzi, Marina Buzzi, Barbara Leporini, and Loredana Martusciello. 2013. Enriching Graphic Maps to Enable Multimodal Interaction by Blind People. . Springer, Berlin, Heidelberg, 576–583. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39188-0_62
144. Lei Shi, Yuhang Zhao, and Shiri Azenkot. 2017. Designing Interactions for 3D Printed Models with Blind People. In *Proceedings of the 19th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility - ASSETS '17*, 200–209. <https://doi.org/10.1145/3132525.3132549>
145. Roy Shilkrot, Jochen Huber, Wong Meng Ee, Pattie Maes, and Suranga Chandima Nanayakkara. 2015. FingerReader: A Wearable Device to Explore Printed Text on the Go. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '15*, 2363–2372. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702421>

BIBLIOGRAPHIE

146. Mathieu Simonnet, Cécile Bothorel, Luiz Felipe Maximiano, and André Thepaut. 2012. GeoTablet, une application cartographique pour les personnes déficientes visuelles. In *Handicap 2012*, 8–13. Retrieved November 15, 2012 from <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00732475>
147. Mathieu Simonnet, Dan Jacobson, Stephane Vieilledent, and Jacques Tisseau. 2009. SeaTouch: a haptic and auditory maritime environment for non visual cognitive mapping of blind sailors. In *COSIT 2009, LNCS 5756*, 212–226. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03832-7_13
148. Mathieu Simonnet and Stéphane Vieilledent. 2012. Accuracy and Coordination of Spatial Frames of Reference during the Exploration of Virtual Maps: Interest for Orientation and Mobility of Blind People? *Advances in Human-Computer Interaction 2012*: 1–14. <https://doi.org/10.1155/2012/835246>
149. SM Casey. 1978. Cognitive mapping by the blind. *Journal of Visual Impairment & Blindness*: 297–301. Retrieved March 1, 2019 from <https://psycnet.apa.org/record/1980-05744-001>
150. JG Snodgrass and M Vanderwart. 1980. A standardized set of 260 pictures: norms for name agreement, image agreement, familiarity, and visual complexity. *Journal of experimental psychology: Human learning and memory* 6, 2: 174–215. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7373248>
151. Abigale Stangl, Jeeun Kim, and Tom Yeh. 2014. 3D printed tactile picture books for children with visual impairments. In *Proceedings of the 2014 conference on Interaction design and children - IDC '14*, 321–324. <https://doi.org/10.1145/2593968.2610482>
152. Amanda Stent, Ann Syrdal, and Taniya Mishra. 2011. On the intelligibility of fast synthesized speech for individuals with early-onset blindness. In *The proceedings of the 13th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility - ASSETS '11*, 211–218. <https://doi.org/10.1145/2049536.2049574>
153. Evan Strasnick, Jessica R Cauchard, Jcauchard@acm Org, and James A Landay. BrushTouch: Exploring an Alternative Tactile Method for Wearable Haptics. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025759>
154. Jing Su, Alyssa Rosenzweig, Ashvin Goel, Eyal de Lara, and Khai N. Truong. 2010. Timbremap: Enabling the Visually-Impaired to Use Maps on Touch-Enabled Devices. In *Proceedings of the 12th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services - MobileHCI '10*, 17–26. <https://doi.org/10.1145/1851600.1851606>
155. M Symmons and B Richardson. 2000. Raised line drawings are spontaneously explored with a single finger. *Perception* 29, 5: 621–626. Retrieved from <http://www.perceptionweb.com/abstract.cgi?id=p2964>
156. Tellevik JM. 1992. Influence of spatial exploration patterns on cognitive mapping by blindfolded sighted persons. *Journal of Visual Impairment & Blindness*. Retrieved January 14, 2019 from <http://psycnet.apa.org/record/1992-39925-001>
157. The Braille Authority of North America. 2010. Guidelines and Standards for Tactile Graphics. Retrieved from <http://brailleauthority.org/tg/web-manual/>
158. Lauren Thevin and Anke M. Brock. 2018. Augmented Reality for People with Visual Impairments: Designing and Creating Audio-Tactile Content from Existing Objects. . Springer, Cham, 193–200. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94274-2_26
159. Leanne Thompson and Edward Chronicle. 2006. Beyond visual conventions: Rethinking the design of tactile diagrams. *British Journal of Visual Impairment* 24, 2: 76–82.

- <https://doi.org/10.1177/0264619606063400>
160. Leanne J. Thompson, Edward P. Chronicle, and Alan F. Collins. 2006. Enhancing 2-D Tactile Picture Design from Knowledge of 3-D Haptic Object Recognition. *European Psychologist* 11, 2: 110–118. <https://doi.org/10.1027/1016-9040.11.2.110>
 161. Leanne J Thompson, Edward P Chronicle, and Alan F Collins. 2003. The Role of Pictorial Convention in Haptic Picture Perception. *Perception* 32, 7: 887–893. <https://doi.org/10.1068/p5020>
 162. Bertrand Tornil and Nadine Baptiste-Jessel. 2004. Use of Force Feedback Pointing Devices for Blind Users. In *8th ERCIM Workshop on User Interfaces for All, User-Centered Interaction Paradigms for Universal Access in the Information Society, LNCS Vol 3196* (Lecture Notes in Computer Science), 479–485. <https://doi.org/10.1007/b95185>
 163. Koji Tsukada and Michiaki Yasumura. 2004. ActiveBelt: Belt-Type Wearable Tactile Display for Directional Navigation. . Springer, Berlin, Heidelberg, 384–399. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30119-6_23
 164. Marlon Twyman, Joe Mullenbach, Craig Shultz, J. Edward Colgate, and Anne Marie Piper. 2015. Designing Wearable Haptic Information Displays for People with Vision Impairments. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction - TEI '14*, 341–344. <https://doi.org/10.1145/2677199.2680578>
 165. B. Ullmer and H. Ishii. 2000. Emerging frameworks for tangible user interfaces. *IBM Systems Journal* 39, 3.4: 915–931. <https://doi.org/10.1147/sj.393.0915>
 166. Brygg Ullmer, Hiroshi Ishii, and Robert J. K. Jacob. 2005. Token+constraint systems for tangible interaction with digital information. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* 12, 1: 81–118. <https://doi.org/10.1145/1057237.1057242>
 167. Simon Ungar. 2000. Cognitive Mapping without Visual Experience. In *Cognitive Mapping: Past, Present and Future*, R. Kitchin and S. Freundschuh (eds.). Routledge.
 168. R. Velazquez, E.E. Pissaloux, M. Hafez, and J. Szweczyk. 2008. Tactile Rendering With Shape-Memory-Alloy Pin-Matrix. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 57, 5: 1051–1057. <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.913768>
 169. R. Velazquez, E.E. Pissaloux, and M. Wiertlewski. A compact tactile display for the blind with shape memory alloys. In *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, 3905–3910. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2006.1642300>
 170. Thorsten Völkel, Gerhard Weber, and Ulrich Baumann. 2008. Tactile Graphics Revised: The Novel BrailleDis 9000 Pin-Matrix Device with Multitouch Input. In *Computers Helping People with Special Needs*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 835–842. https://doi.org/10.1007/978-3-540-70540-6_124
 171. Steven A Wall and Stephen A Brewster. 2005. Providing external memory aids in haptic visualisations for blind computer users. *International Journal on Disability and Human Development* 4, 4: 331–338. <https://doi.org/10.1515/IJDHD.2005.4.4.331>
 172. Steven Wall and Stephen Brewster. 2006. Feeling what you hear: tactile feedback for navigation of audio graphs. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1123–1132. <https://doi.org/10.1145/1124772.1124941>

173. Feng Wang, Xiang Cao, Xiangshi Ren, and Pourang Irani. 2009. Detecting and leveraging finger orientation for interaction with direct-touch surfaces. In *Proceedings of the 22nd annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '09*, 23. <https://doi.org/10.1145/1622176.1622182>
174. Feng Wang and Xiangshi Ren. 2009. Empirical evaluation for finger input properties in multi-touch interaction. In *Proceedings of the 27th international conference on Human factors in computing systems - CHI 09*, 1063. <https://doi.org/10.1145/1518701.1518864>
175. Zheshen Wang, Baoxin Li, Terri Hedgpeth, and Teresa Haven. 2009. Instant Tactile-Audio Map: Enabling Access to Digital Maps for People with Visual Impairment. In *Assets '09 Proceedings of the 11th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility*, 43–50. <https://doi.org/10.1145/1639642.1639652>
176. Zheshen Wang, Nan Li, and Baoxin Li. 2012. Fast and independent access to map directions for people who are blind. *Interacting with Computers* 24, 2: 91–106. <https://doi.org/10.1016/j.intcom.2012.02.002>
177. T.P. Way and K.E. Barner. 1997. Automatic visual to tactile translation. II. Evaluation of the TACTile image creation system. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering* 5, 1: 95–105. <https://doi.org/10.1109/86.559354>
178. T.P. Way and K.E. Barner. 1997. Automatic visual to tactile translation. I. Human factors, access methods and image manipulation. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering* 5, 1: 81–94. <https://doi.org/10.1109/86.559353>
179. R. Weir, B. Sizemore, H. Henderson, S. Chakraborty, and J. Lazar. 2012. Development and Evaluation of Sonified Weather Maps for Blind Users. In *Proceedings of CWUAAT*, 75–84.
180. WHO. 2014. *Visual Impairment and blindness Fact Sheet N° 282*. World Health Organization.
181. Maarten W.A. Wijntjes, Thijs van Lienen, Ilse M. Verstijnen, and Astrid M.L. Kappers. 2008. Look what I have felt: Unidentified haptic line drawings are identified after sketching. *Acta Psychologica* 128, 2: 255–263. <https://doi.org/10.1016/J.ACTPSY.2008.01.006>
182. Maarten W A Wijntjes, Lienen T Van, Ilse M Verstijnen, Astrid M L Kappers, Thijs van Lienen, Ilse M Verstijnen, and Astrid M L Kappers. 2008. The influence of picture size on recognition and exploratory behaviour in raised-line drawings. *Perception* 37, 4: 602–614. <https://doi.org/10.1068/p5714>
183. Christopher Williamson and Ben Shneiderman. 1992. The dynamic HomeFinder. In *Proceedings of the 15th annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval - SIGIR '92*, 338–346. <https://doi.org/10.1145/133160.133216>
184. Ikuko Eguchi Yairi and Takuya Takeda. 2012. A music application for visually impaired people using daily goods and stationeries on the table. *Proceedings of the 14th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility - ASSETS '12*: 271. <https://doi.org/10.1145/2384916.2384988>
185. Koji Yatani, Nikola Banovic, and Khai Truong. 2012. SpaceSense: representing geographical information to visually impaired people using spatial tactile feedback. In *Proceedings of the 2012 ACM annual conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '12*, 415–424. <https://doi.org/10.1145/2207676.2207734>
186. Hanlu Ye, Meethu Malu, Uran Oh, Leah Findlater, Hanlu Ye, Meethu Malu, Uran Oh, and Leah Findlater. 2014. Current and future mobile and wearable device use by people with visual impairments.

BIBLIOGRAPHIE

- In *Proceedings of the 32nd annual ACM conference on Human factors in computing systems - CHI '14*, 3123–3132. <https://doi.org/10.1145/2556288.2557085>
187. Limin Zeng and Gerhard Weber. 2010. Audio-Haptic Browser for a Geographical Information System. In *ICCHP 2010. LNCS, vol. 6180* (Lecture Notes in Computer Science), 466–473. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14100-3_70
 188. Limin Zeng and Gerhard Weber. 2012. ATMap: Annotated Tactile Maps for the Visually Impaired. . Springer, Berlin, Heidelberg, 290–298. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34584-5_25
 189. Haixia Zhao, Catherine Plaisant, Ben Shneiderman, and Jonathan Lazar. 2008. Data Sonification for Users with Visual Impairment. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* 15, 1: 1–28. <https://doi.org/10.1145/1352782.1352786>
 190. Haixia Zhao, Catherine Plaisant, Ben Shneiderman, and Jonathan Lazar. 2008. Data Sonification for Users with Visual Impairment. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* 15, 1: 1–28. <https://doi.org/10.1145/1352782.1352786>
 191. V. P. Zinchenko and B. F. Lomov. 1960. The functions of hand and eye movements in the process of perception. *Problems of Psychology*: 12–25.
 192. WebAIM: Survey of Users with Low Vision #2 Results. Retrieved March 4, 2019 from <https://webaim.org/projects/lowvisionsurvey2/>
 193. iSonic. Retrieved January 14, 2019 from <http://www.cs.umd.edu/hcil/audiomap/>
 194. Bee-Bot. Retrieved January 14, 2019 from <https://www.bee-bot.us/beebot.html>
 195. Ozobot. Retrieved January 14, 2019 from <https://ozobot.com/>
 196. WebAIM: Screen Reader User Survey #7 Results. Retrieved January 15, 2019 from <https://webaim.org/projects/screenreadersurvey7/>