

## **CARTES ET DIAGRAMMES TANGIBLES SUR TABLE POUR DES UTILISATEURS DÉFICIENTS VISUELS (J. DUCASSE, 2017) : RÉSUMÉ DÉTAILLÉ**

Ce résumé reprend les principaux points de la thèse, à savoir le contexte et l'état de l'art (chapitres 1 et 2), les contributions théoriques et empiriques de la thèse (chapitres 3, 4 et 5), et la description d'un certain nombre de perspectives (chapitre 6 et 7). Les sections consacrées aux évaluations donnent un aperçu de la méthodologie et des principaux résultats uniquement. Pour une description complète et des données précises, nous renvoyons le lecteur à la version complète de ce mémoire.

## **CHAPITRES 1 ET 2 – INTRODUCTION ET ÉTAT DE L'ART**

Les travaux présentés dans le chapitre 2 ont fait l'objet de trois publications :

- J. Ducasse, M. Macé, C. Jouffrais. *From open geographical data to tangible maps : improving the accessibility of maps for visually impaired people*. GeoVis'15. Papier long.
- J. Ducasse, A. Brock, C. Jouffrais. *Accessible Interactive Maps for Visually Impaired Users*. In: Pissaloux E., Velazquez R. (eds). *Mobility of Visually Impaired People*. Springer. 2008. Book chapitre.
- J. Ducasse, B. Oriola, M. Macé, C. Jouffrais. *Concevoir des interfaces tangibles et spatiales pour des utilisateurs déficients visuels : pourquoi et comment ?* Papier long.

## **RENDRE ACCESSIBLE LES CARTES ET DIAGRAMMES : POURQUOI ? (CHAPITRE 1, 2 ET CHAPITRE 2, PARTIE A)**

Les représentations graphiques jouent un rôle essentiel dans nos vies personnelles et professionnelles. Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à deux grandes catégories de représentations graphiques : les cartes géographiques et les diagrammes (e.g. histogrammes, schémas, organigrammes, arbres généalogiques, etc.). Ces représentations graphiques peuvent être utilisées pour réaliser un grand nombre de tâches, telles que se repérer, explorer des données statistiques, résoudre des problèmes, présenter des données, etc. Bien que ces représentations soient majoritairement destinées à des personnes voyantes (car elles sont visuelles), de nombreuses études ont démontré que les personnes déficientes visuelles peuvent aussi tirer parti de ces sources d'informations.

## **RENDRE ACCESSIBLE LES CARTES ET DIAGRAMMES : COMMENT ?**

### **SUPPORTS TACTILES NON-INTERACTIFS (CHAPITRE 2, PARTIE B)**

Pour rendre des cartes et des diagrammes visuels accessibles à des personnes déficientes visuelles, plusieurs solutions existent. Parmi les solutions traditionnelles, on peut distinguer deux types de support : les supports tactiles statiques (*Chapitre 2, Partie B, 3.1*), et les supports tactiles reconfigurables (*Chapitre 2, Partie B, 3.2*). Les supports statiques consistent le plus souvent en une feuille de papier spécial sur laquelle un graphique dont le contenu a été adapté (et simplifié) est imprimé. La feuille est ensuite passée dans un four et, sous l'effet de la chaleur, les microcapsules de polystyrène contenues dans le papier gonflent et éclatent, créant ainsi un relief qu'une personne déficiente visuelle peut toucher. D'autres méthodes de production existent (impression 3D par exemple), et résultent elles aussi en un support tactile (i.e. en relief) qui ne peut être édité. Dans les centres d'éducation spécialisés, d'autres techniques sont utilisées,

qui résultent en des graphiques tactiles pouvant être édités : ces graphiques peuvent être construits avec des aimants sur un tableau aimanté (e.g. pour représenter un itinéraire) ou avec des punaises insérées dans un tableau de liège et reliées entre elles par des élastiques (e.g. pour représenter des formes géométriques). Un autre support est couramment utilisé : il s'agit d'une feuille de papier spécialisé (papier « allemand ») que l'on pose sur une planche de dessin et sur laquelle on écrit avec un stylo standard : au contact du stylo, la feuille se plisse et crée un relief que l'utilisateur peut toucher.

Qu'ils soient statiques ou reconfigurables, ces supports tactiles souffrent de deux défauts majeurs (*Chapitre 2, Partie B, 3.3* et *Chapitre 2, Partie B, 4*). D'une part, seul un nombre limité d'informations peut être présenté ; ceci est dû au matériel utilisé, aux contraintes imposées par l'exploration tactile d'un document (le « champ de toucher » est limité par rapport au champ de vision et l'acuité tactile est inférieure à l'acuité visuelle), et à l'utilisation de libellés écrits en Braille, qui prennent beaucoup de place. D'autre part, ces supports ne sont pas interactifs : par conséquent, il n'est pas possible de modifier ou sélectionner les informations associées à un élément du graphique, et, dans le cas des supports reconfigurables, les élèves sont dépendants d'une personne voyante pour placer les objets au bon endroit, ce qui réduit considérablement leur autonomie. Le manque d'interactivité contraint aussi le type de tâches qui peuvent être réalisées avec la carte ou le diagramme : il n'est par exemple pas possible de sélectionner quelles informations afficher, de changer d'échelle, etc.

## DISPOSITIFS INTERACTIFS (*CHAPITRE 2, PARTIE C*)

Une seconde approche, plus récente et encore souvent cantonnée aux laboratoires de recherche, consiste à développer des dispositifs interactifs, principalement basés sur l'utilisation de retours sonores. Dans cette thèse (*Chapitre 2, Partie C, 2*), nous avons proposé une nouvelle classification des dispositifs de cartes et diagrammes interactifs pour les personnes déficientes visuelles (il s'agit d'une extension d'une classification proposée en collaboration avec Anke Brock pour les cartes interactives uniquement). Nous faisons la distinction entre les cartes et diagrammes numériques (*digital*), et les cartes et diagrammes hybrides (*hybrid*). Les premiers peuvent être affichés sur un écran ou projetés sur une surface plane (*Chapitre 2, Partie C, 3*). Ils peuvent être explorés en déplaçant un curseur sur les différents éléments qui les composent : en fonction de ce qui est affiché sous le curseur, des informations, principalement sonores, sont données par le système. Un graphique numérique peut être exploré par : des dispositifs d'entrée classiques (clavier, joystick, objet tangible) ; des dispositifs d'entrée augmentés, qui fournissent un retour de force (souris, manette de jeu, joystick) ou un retour tactile (par exemple une souris sur laquelle deux cellules Braille dynamiques sont fixées) ; un des doigts de l'utilisateur, détecté par une tablette ou une caméra.

Les cartes et diagrammes hybrides sont composés d'une représentation physique et d'une représentation numérique associée (*Chapitre 2, Partie C, 4*). Trois grandes catégories existent : les cartes et diagrammes tactiles interactifs (l'utilisateur peut interagir avec un support tactile classique posé sur une tablette, en effectuant par exemple des « taps » ou des « double-taps ») ; les cartes et diagrammes tangibles (composés de plusieurs objets physiques qui représentent des éléments, tels qu'une ville sur une carte ou un point sur un graphe) ; les cartes et diagrammes tactiles dynamiques (qui consistent généralement en des « tablettes Braille », composées d'une matrice de picots dont la hauteur peut varier).

Nous avons proposé une analyse détaillée de ces catégories de dispositifs, selon quatre dimensions (*Chapitre 2, Partie C, 3.4* et *Chapitre 2, Partie C, 4.4*) : leur coût et leur disponibilité, leurs avantages et inconvénients en terme d'exploration (et de compréhension) ; leur contenu ; leur degré de modification. Le principal défaut des cartes et diagrammes numériques est qu'ils contraignent généralement l'exploration à un seul point de contact (c'est-à-dire que l'utilisateur peut accéder à une seule information à la fois, celle présente sous le curseur). Or, de nombreuses études ont montré que la possibilité d'explorer un graphique avec plusieurs doigts (i.e. avec plusieurs points de contacts) offre de nombreux avantages : cela rend l'exploration moins séquentielle, facilite la recherche d'éléments saillants, mais aussi l'encodage en mémoire des positions des éléments les uns par rapport aux autres et la comparaison de deux éléments (*Chapitre 2, Partie B, 5.2*). A ce titre, les cartes et diagrammes hybrides semblent plus pertinents, car ils peuvent être explorés avec les deux mains. Cependant, leur principal défaut est le fait qu'ils ne peuvent être modifiés (c'est le cas des cartes et diagrammes tactiles), ou bien s'ils peuvent être modifiés, qu'ils nécessitent des technologies dont le coût est prohibitif (une tablette Braille contenant 7000 picots coûte environ 50 000€). Les cartes et diagrammes tangibles offrent un compromis intéressant : non seulement ces graphiques peuvent être explorés à deux mains (car ils reposent sur un ensemble d'objets), mais ils peuvent aussi être modifiés (en manipulant les objets), tout en restant abordables (une caméra, une surface transparente et un ordinateur peuvent suffire). Cependant, à ce jour, peu de travaux ont été réalisés sur la conception, le développement et l'évaluation d'interfaces tangibles pour des personnes déficientes visuelles.

## CARTES ET DIAGRAMMES TANGIBLES (CHAPITRE 2, PARTIE D ET CHAPITRE 2, PARTIE E)

Les interfaces tangibles peuvent être définies comme des interfaces qui utilisent des objets physiques pour représenter ou contrôler des informations numériques. Elles sont donc composées d'une représentation physique (les objets), étroitement couplée à une représentation numérique (par exemple, une carte). Dans cette thèse, nous nous sommes plus précisément concentrés sur les Interfaces Tangibles sur Table (ITTs), et sur les ITTs animées, qui sont composées d'un ensemble d'objets dont la hauteur, forme ou position peut être modifiée par le système (il s'agit souvent d'objets motorisés). (Pour une synthèse des principales caractéristiques et modèles théoriques des interfaces tangibles et une présentation des technologies disponibles pour développer des ITTs, voir la partie D du Chapitre 2.)

Une des principales spécificités des ITTs destinées à des personnes déficientes visuelles concerne la nature des représentations. Dans les ITTs visuelles, seule une partie de la représentation numérique est matérialisée (embodied) par la représentation physique, et des images ou des vidéos sont projetées sur la surface pour enrichir l'information présentée de manière tangible. En l'absence de retour visuel, la représentation numérique doit être entièrement matérialisée par des objets et du son, ce qui contraint fortement le type de représentations pouvant être rendues accessibles. Un autre aspect important concerne la conception des objets, qui doivent être stables afin de ne pas être renversés lors de l'exploration du graphique. Nous avons recensé et décrit deux prototypes de cartes tangibles accessibles et six prototypes de diagrammes tangibles accessibles, que nous avons ensuite analysé selon quatre axes : la nature des informations représentées, les propriétés des objets tangibles, l'interactivité des systèmes, leur disponibilité (*Chapitre 2, Partie E, 3* et *Chapitre 2, Partie E, 4*). Cette analyse a montré que très peu de prototypes ont été formellement évalués par des personnes déficientes visuelles, et que peu de prototypes ont été développés. Aussi, les dispositifs permettaient de rendre accessibles uniquement un type précis de représentation graphique (e.g. un itinéraire ou un histogramme), et dont le contenu était très simple. Par

ailleurs, aucune technique d'interaction pour la reconstruction d'une carte ou d'un diagramme n'a été proposée, et les techniques d'interaction proposées pour l'édition ou l'exploration des représentations graphiques n'ont pas toujours été évaluées. De manière générale, cette analyse a mis en évidence un manque de connaissances théoriques et empiriques sur l'utilisation de l'interaction tangible pour rendre accessibles des cartes et des diagrammes.

## ENONCÉ DE THÈSE ET QUESTIONS DE RECHERCHE (CHAPITRE 1, 3 ET CHAPITRE 1, 5)

L'objectif de cette thèse était d'étudier dans quelle mesure les ITTs (animées ou non) peuvent permettre à des personnes déficientes visuelles d'accéder de manière autonome à des représentations graphiques interactives, physiques et reconfigurables. Plus particulièrement, nous avons cherché à répondre aux questions suivantes : 1) quels sont les avantages et inconvénients des ITTs par rapport aux pratiques actuelles et aux projets de recherche existants ? ; 2) comment concevoir et développer des cartes et diagrammes tangibles pour des personnes déficientes visuelles ? ; 3) en prenant en compte les limitations inhérentes aux ITTs et les spécificités des ITTs pour les personnes déficientes visuelles, quelles représentations graphiques peuvent être rendues accessibles, et quelles tâches peuvent être supportées ? Pour répondre à ces questions, nous avons développé deux ITTs non-animées (les Tangible Reels et la Tangible Box), et une ITT animée (BotMap).

## CHAPITRE 3 – TANGIBLE REELS : CONSTRUCTION ET EXPLORATION DE CARTES ET DE DIAGRAMMES TANGIBLES

Les travaux présentés dans ce chapitre ont fait l'objet de deux publications :

- J. Ducasse, M. Macé, M. Serrano, C. Jouffrais. *Tangible Reels: construction and exploration of tangible maps by visually impaired users*. CHI'16, 2186 – 2197. Papier long.
- J. Ducasse, M. Macé, M. Serrano, C. Jouffrais. *Tangible maps for visually impaired users: shape-changing perspectives*. CHI'16. Papier court (workshop).

### MOTIVATIONS (CHAPITRE 3, 1)

L'objectif de ce projet était d'étudier dans quelle mesure l'interaction tangible peut permettre à une personne déficiente visuelle d'accéder de manière autonome à une carte physique et reconfigurable. Etant donné le faible nombre de travaux de recherche concernant les interfaces tangibles pour les non-voyants, nous nous sommes inspirés des pratiques actuelles (et notamment de la technique des aimants), et avons cherché à pallier leurs limitations (manque d'interactivité, représentations très simples, présence d'une personne voyante nécessaire). Le principe général du dispositif que nous avons conçu est le suivant : les utilisateurs sont guidés pour progressivement construire une carte à partir d'un ensemble d'objets tangibles ; une fois la carte reconstruite, ils peuvent l'explorer de manière interactive, et éventuellement l'éditer.

## CONCEPTION DES TANGIBLE REELS (*CHAPITRE 3, 2*)

Nous avons identifié cinq critères à prendre en compte pour la conception des objets tangibles : 1) les objets tangibles doivent permettre de matérialiser des symboles ponctuels (e.g. des villes) et linéaires (e.g. des rivières) ; 2) les objets tangibles doivent être détectables par le système de manière à fournir des retours sonores adéquats ; 3) chaque objet tangible doit être associé à un identifiant unique ; 4) les objets tangibles doivent être stables pendant l'exploration, tout en étant facile à manipuler pendant la phase de construction ; 5) les objets tangibles doivent être aussi petits que possible, de manière à maximiser le nombre d'objets pouvant être utilisés simultanément.

Afin de répondre à ces critères, plusieurs choix de conception ont été arrêtés. Premièrement, nous avons opté pour la bibliothèque TopCodes, qui permet de détecter et d'identifier des marqueurs circulaires de petite taille (environ deux centimètres de diamètre) sur un flux vidéo. Deuxièmement, afin de pouvoir matérialiser des lignes, nous avons choisi d'utiliser des badges rétractables composés d'une bobine et d'un câble de trente centimètres de longueur. Attachés aux objets tangibles, ces badges rétractables permettent à l'utilisateur de construire des lignes de différentes longueurs en reliant deux objets entre eux. Pour assurer la stabilité des objets, de nombreuses solutions ont été testées. Nous avons finalement opté pour deux solutions distinctes : la première consiste à lester des cylindres en PVC avec du plomb ; la deuxième consiste à utiliser des ventouses qui peuvent être fixées à la table et que l'on peut facilement détacher lorsqu'il est nécessaire de déplacer les objets. Nous avons nommé le premier type d'objet les *Weights* (poids), et le second les *Sucker pads* (ventouses). Dans les deux cas, le badge rétractable est solidement fixé sur les objets. Finalement, afin de faciliter la construction des lignes, nous avons attaché à chaque extrémité de câble un aimant et nous avons fixé autour des objets une chaînette métallique. Pour construire une ligne, il suffit donc de rapprocher l'extrémité d'un câble d'un autre objet et ainsi de les « connecter ».

## EVALUATION PRÉLIMINAIRE (*CHAPITRE 3, 3*)

Une première évaluation a été conduite afin d'évaluer l'utilisabilité des *Tangible Reels*. L'objectif était de tester leur stabilité et leur facilité de manipulation, mais aussi d'évaluer si des cartes et des diagrammes construits avec des *Tangible Reels* pouvaient être compris par des personnes déficientes visuelles.

### MATÉRIEL ET MÉTHODES (*CHAPITRE 3, 3.1 ET CHAPITRE 3, 3.2*)

Nous avons recruté quatre personnes déficientes visuelles. L'évaluation était composée de deux sessions (une pour les *Sucker pads*, une pour les *Weights*). Chaque session était composée de deux tâches (exploration et construction). Pour chaque tâche, deux types de carte étaient utilisés : une carte relativement simple, composée de neuf objets tangibles, et une carte plus complexe, composée de douze objets tangibles. Dans un premier temps, les sujets devaient explorer une carte construite par l'expérimentateur, puis la redessiner sur une feuille de papier « allemand » ou à l'aide d'aimants sur un tableau aimanté. Dans un second temps, les sujets devaient mémoriser une carte tactile puis la reconstruire sur la table avec les *Tangible Reels*, aussi précisément que possible.

Nous avons utilisé les mesures suivantes : le déplacement, en centimètres, de chaque objet tangible avant et après l'exploration d'une carte ; le nombre d'objets tangibles déplacés ou renversés lors de la tâche d'exploration ; un questionnaire composé de cinq affirmations que les sujets devaient évaluer sur une

échelle de Likert de 1 à 7 ; le classement des deux types d'objet par ordre de préférence, pour l'exploration et la construction ; une note sur 10 évaluant la qualité des cartes dessinées. Pour cette dernière mesure, nous avons utilisé la méthode des juges : les cartes dessinées par les participants ont été présentées à quatre juges externes, qui devaient comparer leur similarité par rapport à la carte modèle, en leur attribuant une note variant de 0 à 10.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION (*CHAPITRE 3, 3.3 ET CHAPITRE 3, 3.4*)

Les résultats ont montré que les deux types d'objets étaient stables, même si les participants étaient plus enclins à renverser les Weights, notamment à cause de leur hauteur. Plus précisément, les réponses au questionnaire montrent que tous les participants ont trouvé que les Sucker pads étaient agréables à manipuler, alors que deux participants ont trouvé que les Weights étaient faciles à renverser. Pour l'exploration, tous les participants ont préféré les Sucker Pads. Pour la construction, deux participants ont préféré les Sucker Pads, et deux ont préféré les Weights. De manière générale, trois participants ont préféré les Sucker Pads. En ce qui concerne les cartes, les notes moyennes étaient de 8,1 (SD = 1,3) pour les cartes simples (7,6 pour les Weights ; 8,6 pour les Sucker Pads), et de 5,7 (SD = 2,7) pour les cartes plus complexes (6,1 pour les Weights ; 5,3 pour les Sucker Pads). En conclusion, cette évaluation préliminaire a montré que les deux types d'objets étaient stables et faciles à manipuler. Cependant, les participants étaient moins enclins à renverser les Sucker pads, qui ont été préférés par trois participants sur quatre. Pour la suite du projet, nous avons donc décidé de travailler avec les Sucker Pads uniquement.

## TECHNIQUES D'INTERACTION ET FEEDBACK (*CHAPITRE 3, 4*)

### CONSTRUCTION (*CHAPITRE 3, 4.1*)

L'utilisateur est guidé pas à pas pour placer les objets tangibles sur la table et les relier entre eux, afin de reconstruire la carte de manière progressive. Des instructions verbales sont données par le système pour indiquer à l'utilisateur de : 1) placer un nouvel objet sur la table ; 2) attacher un nouvel objet au dernier objet placé ; 3) attacher un nouvel objet à un objet déjà placé sur la table, mais qui n'est pas le dernier placé. Une fois qu'un nouvel objet est détecté par le système, des instructions de guidage sont données : si l'objet est situé loin de sa position finale, le système donne la distance et la direction à cette position (e.g. « 30 centimètres, 10 heures ») ; si l'objet est situé près de la cible, le système donne des indications plus fréquentes et détaillées (e.g. « haut, haut, droite, droite »). Lors de la construction, plusieurs messages sont donnés par le système pour indiquer à l'utilisateur qu'un objet est correctement placé, qu'une ligne a été construite, ou qu'un objet n'est plus détecté par le système (par exemple si l'utilisateur cache une partie du marqueur avec un de ses doigts).

### EXPLORATION (*CHAPITRE 3, 4.2*)

Une fois que la carte est reconstruite, l'utilisateur peut interagir avec les objets tangibles et les lignes pour écouter leur nom. Pour cela, il doit pointer un objet ou une ligne avec un seul doigt, et rester en position pendant deux secondes environ. Le nom de l'objet ou de la ligne est alors donné.

### IMPLÉMENTATION (*CHAPITRE 3, 5*)

Une table en verre a été utilisée, sous laquelle se trouve une caméra reliée à un ordinateur. Les objets tangibles sont placés sur la table. Pour détecter la position des doigts de l'utilisateur (pour l'exploration),

un cadre infrarouge a été placé sur la table, et légèrement surélevé, de façon à ce que le cadre détecte les doigts de l'utilisateur uniquement, et non les objets. L'application a été développée en Java et s'appuie sur la bibliothèque MT4J. Les informations en provenance du cadre infrarouge sont envoyées à l'application cliente MT4J grâce au protocole TUIO.

## **EVALUATION : UTILISABILITÉ DES TECHNIQUES D'INTERACTION (CHAPITRE 3, 6)**

L'objectif de cette évaluation était de mesurer l'utilisabilité des techniques d'interaction proposées (exploration et construction) et d'identifier le degré de complexité des cartes pouvant être reconstruites grâce aux Tangible Reels.

### **MATÉRIEL ET MÉTHODES (CHAPITRE 3, 6.1 ET CHAPITRE 3, 6.2)**

Nous avons recruté huit personnes déficientes visuelles. Après avoir appris à suivre les instructions de construction et la technique d'interaction pour l'exploration, les participants devaient reconstruire quatre cartes de complexité croissante (composées de 6, 8, 10 et 12 Tangible Reels). Une fois que les cartes étaient reconstruites, les participants devaient répondre à trois questions en explorant la carte (e.g. « quel est le nom des points situés aux extrémités de la ligne 2 ? »).

Nous avons utilisé les mesures suivantes : nombre de cartes correctement construites ; nombre de Tangible Reels correctement placés ; temps nécessaire pour construire une carte ; temps nécessaire pour placer un Tangible Reel ; taux de bonnes réponses aux questions ; temps nécessaire pour répondre à une question ; questionnaire SUS (utilisabilité) ; questionnaire NASA-TLX (charge mentale).

### **RÉSULTATS (CHAPITRE 3, 6.3)**

#### **CONSTRUCTION (CHAPITRE 3, 6.3.1)**

5 Tangible Reels sur 288 ont été mal placés, sur cinq cartes différentes. Ainsi, 5 cartes sur 32 ont été incorrectement construites. Les erreurs étaient dues à des mauvaises manipulations des objets ou à une mauvaise interprétation des instructions. Les temps de complétion étaient d'environ 2 minutes pour la carte la plus simple, 3 minutes 30 pour les deux cartes intermédiaires, et 4 minutes 30 pour la carte la plus complexe. Le temps pour placer un Tangible Reel était similaire pour les quatre cartes, autour de 22,5 secondes (IC95 [18,6 ; 27,2]). Les deux étapes les plus longues étaient de suivre les instructions de guidage précises (environ 39% du temps nécessaire pour placer un Tangible Reel), ou les instructions pour attacher ou placer un nouvel objet (environ 49% du temps nécessaire pour placer un Tangible Reel). Il n'y avait pas de différences notables entre les cartes.

#### **EXPLORATION (CHAPITRE 3, 6.3.2)**

En ce qui concerne l'exploration, le taux de bonnes réponses était similaire entre les quatre cartes et variait entre 79% et 92%. Quatre types d'erreurs ont été observés : 1) les participants sélectionnaient une ligne en pointant une intersection, et le nom de l'autre ligne était donné ; 2) les cartes n'étaient pas correctement construites ; 3) les participants avaient des difficultés à réaliser le geste de pointage correctement ; 4) il y avait un décalage entre la représentation physique et la représentation numérique. Le

temps de complétion pour chaque question augmentait avec la complexité des cartes, et variait entre 10 et 30 secondes.

### **QUESTIONNAIRES** (*CHAPITRE 3, 6.3.3*)

Seuls deux participants ont trouvé qu'il était difficile de construire les cartes les plus complexes. Dans tous les autres cas, les participants ont trouvé qu'il était facile ou « ni facile, ni difficile », de construire les cartes. Le score SUS était de 82,2 (IC95 [72,3 ; 90,6]). Le questionnaire NASA-TLX a montré que les participants ont trouvé que la tâche ne nécessitait pas une attention soutenue, et qu'ils étaient globalement très satisfaits de leur performance.

### **DISCUSSION** (*CHAPITRE 3, 6.4*)

Les résultats montrent que le système permet à des personnes déficientes visuelles de reconstruire des cartes de manière autonome, et en un temps relativement court (moins de 5 minutes pour la carte la plus complexe). Les instructions ont été jugées très faciles à interpréter. Cependant, le temps nécessaire pour suivre les instructions de guidage précises suggère que le guidage pourrait être amélioré, même si la technique de guidage en deux temps s'est avérée satisfaisante. En ce qui concerne l'exploration, les résultats ont montré que bien que le système permettait aux utilisateurs d'écouter le nom des points et des lignes, il était parfois difficile pour les participants de sélectionner une ligne ou un objet en particulier (geste difficile à réaliser, et décalage entre les représentations physique et numérique). Nous avons montré que des cartes relativement complexes pouvaient être construites grâce aux Tangible Reels. Cependant, il ne semble pas souhaitable de construire des cartes davantage complexes : deux participants ont trouvé que la dernière carte était difficile à construire, et plusieurs participants ont indiqué qu'il devenait difficile de placer et manipuler les objets lorsque plusieurs objets étaient déjà placés sur la table. De manière générale, les utilisateurs ont été très satisfaits par le système et plusieurs d'entre eux ont indiqué que ce système serait particulièrement utile dans le cadre d'activités pédagogiques.

### **ATELIER PÉDAGOGIQUE** (*CHAPITRE 3, 7*)

Un atelier pédagogique a été mis en place en collaboration avec deux professeures de l'IJA et trois élèves (un très malvoyant, deux malvoyants). Trois améliorations ont été apportées au système pour cet atelier (*Chapitre 3, 7.1*) : 1) développement d'une fonctionnalité permettant aux utilisateurs d'annoter la carte en associant à chaque ligne ou chaque objet des messages vocaux (un cube tangible doit être placé près de l'élément à annoter, et en fonction de la face présentée, l'enregistrement est lancé ou arrêté); 2) développement d'une fonctionnalité permettant aux utilisateurs de construire une carte ou un diagramme, puis d'enregistrer le graphique ainsi construit de manière à pouvoir le reconstruire ultérieurement grâce à des instructions de guidage ; 3) utilisation d'une homographie pour mieux faire coïncider le repère de la caméra (i.e. les coordonnées des objets) avec le repère du cadre infrarouge (i.e. les coordonnées des doigts de l'utilisateur).

Dans un premier temps, les élèves ont réalisé plusieurs exercices, allant du simple placement d'un objet à la construction de plusieurs lignes. Dans un second temps, les élèves ont réalisé plusieurs exercices portant sur la construction, l'exploration et l'annotation de la carte de France, symbolisée par six objets tangibles reliés entre eux et représentant six villes. Les observations réalisées ont montré le potentiel des Tangible Reels pour la conception d'activités pédagogiques variées et ludiques. La fonctionnalité

permettant d'annoter les villes a particulièrement été appréciée par les professeures et les élèves. Les professeures ont également mentionné le fait que les trois élèves avaient été très engagés et concentrés tout au long de la séance, et ont aussi suggéré que les mouvements des bras liés à la construction de la carte pouvaient être très bénéfiques en termes d'apprentissage et de mémorisation.

## PERSPECTIVES ET DISCUSSION (*CHAPITRE 3, 8*)

Une des principales limitations des Tangible Reels est leur taille. Cependant, l'utilisation de ventouses plus petites permettrait d'augmenter le nombre d'objets pouvant être utilisés simultanément, afin de construire des représentations plus complexes. D'autres solutions pourraient être envisagées, telles que le développement de techniques d'interaction pour rendre les aires de manière auditive, l'utilisation de « doubles badges » pour limiter le nombre d'objets devant être utilisés, et l'utilisation de petits objets qui pourraient dévier le trajet du câble pour construire des courbes. Enfin, le développement de *Cord User Interfaces* suggère que les cartes et diagrammes tangibles pourraient être augmentés par l'utilisation de cordes animées (et notamment vibrantes), par exemple pour représenter différents types de symboles linéaires (fleuves vs rues), ou pour attirer l'attention de l'utilisateur sur un élément linéaire en particulier.

Nous avons développé plusieurs techniques d'interaction pour l'exploration, la (re)construction et l'annotation de cartes tangibles par des utilisateurs déficients visuels, et nous avons formellement évalué les deux premières. Bien que plusieurs améliorations soient envisageables, l'utilisabilité du système est tout à fait satisfaisante et démontre le potentiel des interfaces tangibles pour rendre accessibles à des utilisateurs déficients visuels des cartes tangibles, de manière autonome. De manière générale, les Tangible Reels peuvent être utilisés non seulement pour reconstruire des cartes, mais aussi d'autres types de graphes (formes géométriques, histogrammes, organigrammes, etc.). Le système est adapté à une utilisation autonome, et s'est avéré particulièrement prometteur pour le développement d'activités pédagogiques basées sur la manipulation, la reconstruction et l'annotation de cartes et diagrammes.

## CHAPITRE 4 – LA TANGIBLE BOX : GRAPHIQUES TANGIBLES ET TACTILES POUR DES ÉLÈVES DÉFICIENTS VISUELS

### MOTIVATIONS (*CHAPITRE 4, 1*)

Suite à l'atelier pédagogique réalisé avec les Tangible Reels, nous avons souhaité explorer plus en détail comment les interfaces tangibles pourraient être utilisées au sein d'établissement scolaires spécialisés. Le système utilisé pour les Tangible Reels et les Tangible Reels eux-mêmes sont trop encombrants pour être utilisée de manière régulière dans un établissement spécialisé. Nous avons donc cherché à concevoir une interface peu encombrante qui répondrait aux critères suivants : être bas coût, facile à installer et à calibrer ; être suffisamment compacte pour pouvoir être transportée d'une classe à l'autre et pour pouvoir être stockée quelque part entre deux classes ; être adaptée à des élèves ayant des profils variés (âge, degré de cécité, niveau, etc.) ; pouvoir être utilisée pour plusieurs matières et pour plusieurs activités, de façon à ce que les professeurs n'aient pas besoin d'avoir une interface pour chaque matière qu'ils enseignent.

## CONCEPTION ET FABRICATION DE LA TANGIBLE BOX (*CHAPITRE 4, 2 ET CHAPITRE 4, 3*)

### CONCEPTION DES OBJETS TANGIBLES

Nous avons souhaité mettre à disposition des élèves des objets tangibles stables et de petite taille, dont la détection ne pourrait être empêchée par l'occlusion des objets par les mains de l'élève. Pour cela, les objets tangibles sont composés de deux parties, chaque partie contenant un aimant. La partie supérieure est placée sur la surface ; la partie inférieure est placée sous la surface. Les deux parties sont maintenues l'une contre l'autre grâce au champ magnétique des aimants. Un marqueur est accolé sous la partie inférieure de l'objet, et une caméra est placée sous la surface pour détecter le marqueur. Ainsi, lorsque l'utilisateur déplace la partie supérieure de l'objet, la partie inférieure se déplace de la même manière et la caméra détecte ce déplacement : on peut donc connaître à tout moment les déplacements de l'objet tangible. Afin d'éviter que les parties inférieures des objets tombent si les parties supérieures sont involontairement soulevées, une feuille magnétique est placée sous la surface.

### PRISE EN COMPTE DE DIFFÉRENTES MATIÈRES, ACTIVITÉS ET PROFILS D'ÉLÈVES.

Afin que la Tangible Box puisse être utilisée pour différentes activités et élèves, nous avons choisi d'utiliser des supports tactiles habituellement utilisés par les professeurs et les élèves, et de les rendre interactifs grâce aux objets tangibles décrits précédemment. Ainsi, les supports tactiles peuvent présenter différents types de graphiques (graphes, frises chronologiques, cartes, etc.) et être adaptés au profil de l'élève (bigraphisme, degré de simplification des tracés, etc.). Comme les aimants contenus dans les objets sont relativement puissants, des supports de différentes épaisseurs peuvent être utilisés (un système de fixation permet de maintenir en place des supports de différentes épaisseurs, tailles et orientations). Jusqu'à présent, les supports suivants ont été testés : graphiques tactiles thermoformés et thermogonflés, fins graphiques imprimés en 3D ; graphiques découpés dans du bois ou du plexiglas ; feuilles Dycem et planche de dessin. Ainsi, la Tangible Box s'appuie sur les avantages des graphiques tactiles traditionnels (bigraphisme, quantité d'information présentée, etc.), tout en les rendant interactifs et reconfigurables. Par ailleurs, les objets tangibles ont été conçus de manière à être très génériques. Cependant, il est possible de les personnaliser en imprimant des coques en 3D de différentes formes, tailles, textures, etc. Ainsi, il est possible d'adapter les objets aux différentes activités, mais aussi au profil des élèves (par exemple, il est possible de concevoir un objet de manière à ce qu'il soit facile à manipuler par un élève ayant des problèmes de motricité fine).

### FACILITÉ D'INSTALLATION ET COUT DU DISPOSITIF

Finalement, afin de rendre le système peu cher, facile à transporter et à installer, nous avons opté pour l'utilisation d'un Raspberry Pi, ainsi que pour l'utilisation d'une caméra grand-angle (afin de réduire la hauteur du dispositif). Une guirlande lumineuse est placée à l'intérieur de la boîte pour éclairer le dessous de la surface et assurer un éclairage continu et diffus : ainsi, la calibration de la caméra ne doit être faite qu'une seule fois. Par ailleurs, pour permettre à l'utilisateur d'interagir avec l'interface, un pavé numérique et un haut-parleur ont été intégrés au couvercle de la boîte. Il est aussi possible de brancher une souris, un clavier, un microphone ou un écran pour développer les applications ou diversifier les usages de la Tangible Box.

# CONCEPTION D'APPLICATIONS PÉDAGOGIQUES POUR LA TANGIBLE BOX

## (CHAPITRE 4, 4)

### SÉANCES DE CONCEPTION (CHAPITRE 4, 4.1)

Afin de mieux cerner les usages potentiels de la Tangible Box, nous avons tout d'abord rencontré un professeur de mathématique, puis organisé une séance de brainstorming avec quatre professeurs spécialisés. Au cours de ces deux séances, de nombreuses activités ont été proposées, liées à différentes disciplines (mathématiques, anglais, histoire, géographie, Orientation & Mobilité, biologie, etc.). Nous avons identifié deux principaux types d'activités. Dans le premier cas, un seul objet tangible est utilisé et sert de curseur que l'élève peut déplacer sur la graphique pour obtenir des informations sur l'élément placé sous le curseur (par exemple, le nom des quartiers de New-York est donné quand un objet représentant un taxi est déplacé sur la carte). Dans ce cas, il peut être demandé à l'élève de suivre un chemin en particulier (par exemple, une courbe sur un graphe mathématique), et des instructions sont données pour guider l'élève ou lui indiquer qu'il n'est pas en train d'explorer la bonne partie du graphique. Dans le second cas, plusieurs objets sont utilisés, chacun représentant une information particulière (par exemple une ville, un événement historique, une partie du corps humain, un point dans un repère cartésien), et les élèves doivent replacer les objets au bon endroit (en suivant ou non des instructions de guidage). De manière générale, ces deux sessions ont montré que les professeurs avaient parfois des difficultés à imaginer des activités pédagogiques qui s'appuieraient sur la possibilité de reconfigurer le graphe tactile grâce aux objets tangibles.

### PROPOSITION D'UN CADRE DE CONCEPTION (CHAPITRE 4, 4.2)

Afin de pallier cette difficulté, nous avons proposé un cadre de conception pour la Tangible Box, composé de quatre thèmes : caractéristiques générales, matériel, activités et interactivité. Chaque thème présente un ensemble de leviers permettant de diversifier les applications pour la Tangible Box. Le premier thème concerne principalement les représentations graphiques utilisées : leur contenu peut être augmenté grâce à différents modes, et chaque graphique peut être utilisé pour des activités de complexité croissante, ou de nature différentes (e.g. découverte vs consolidation d'acquis). Le deuxième thème rappelle que différents supports peuvent être utilisés, et que les objets tangibles peuvent jouer différents rôles (ils peuvent par exemple servir de curseur, représenter une information, ou être utilisés pour sélectionner un item dans un menu). Le troisième thème décrit les grands types d'activités qui peuvent être envisagées : activité exploratoire (l'élève est libre d'interagir avec le système comme il le souhaite) ; activité expressive (l'élève construit lui-même une représentation) ; activité de type « essais et erreurs » ; évaluations. Ces activités requièrent une succession de tâches : exploration/manipulation ; édition/annotation ; construction ; reconstruction. Finalement, le dernier thème rappelle que plusieurs techniques d'interaction peuvent être envisagées, qu'elles soient basées sur l'utilisation de commandes vocales, du pavé numérique ou des objets tangibles.

### PERSPECTIVES ET DISCUSSION (CHAPITRE 4, 6)

D'un point de vue matériel et logiciel, plusieurs aspects de la Tangible Box peuvent être améliorés : le système de fixation, la hauteur de la boîte, la puissance des aimants qui peuvent rapidement altérer le

support utilisé et l'algorithme de détection des objets (robustesse, performance et précision des coordonnées calculées).

Le cadre de conception que nous avons proposé pourrait d'une part être complété et détaillé, et d'autre part servir à la conception d'autres interfaces tangibles pour l'apprentissage. En effet, les tâches que nous avons identifiées sont communes à plusieurs interfaces tangibles développées pour des personnes déficientes visuelles. Il serait aussi intéressant de réaliser des évaluations dans le but de mieux comprendre les bénéfices d'un type d'activité (e.g. « essais et erreurs ») en termes d'apprentissage. Par ailleurs, le cadre de conception pourrait être utilisé pour faciliter le développement d'applications par des développeurs, mais éventuellement par les professeurs eux-mêmes. Il serait par exemple envisageable de créer un ensemble de modules (e.g. un module TTS qui permettrait de paramétrer le volume, la langue, la vitesse, etc. ; un module « guidage » qui permettrait de choisir quel type d'instructions donner, à quelle fréquence, etc.).

Finalement, l'utilisation d'un smartphone permettrait de diversifier les usages de la Tangible Box, selon les principes de l'approche BYOD (*Bring Your Own Device*). Nous avons notamment identifié trois perspectives d'améliorations basées sur l'utilisation d'un smartphone : 1) détection des doigts de l'utilisateur et des objets grâce à un téléphone placé au-dessus de la Tangible Box, afin de permettre des interactions gestuelles et de simplifier la mise en place des activités (quand chaque objet doit être associé à une information particulière) ; 2) conception de menus à afficher sur le smartphone, pour faciliter la sélection d'activités ou l'activation de certaines fonctionnalités; 3) identification des élèves grâce à leur smartphone pour proposer des contenus personnalisés ou enregistrer des informations d'une session à l'autre (e.g. score, annotations).

## CHAPITRE 5 – BOTMAP : « PAN & ZOOM » AVEC UNE INTERFACE TANGIBLE ANIMÉE

Les travaux présentés dans ce chapitre ont fait l'objet d'un article, en cours de soumission :

- J. Ducasse, M. Macé, B. Oriola, C. Jouffrais. *BotMap: non-visual panning and zooming for visually impaired users*. Article de journal.

### MOTIVATIONS (CHAPITRE 5, 1)

Les deux projets présentés précédemment tirent profit de la possibilité de reconfigurer les interfaces en permettant aux utilisateurs de déplacer les objets pour (re)construire une carte, manipuler un diagramme, etc. Dans ce projet, nous avons voulu exploiter la possibilité d'utiliser des objets animés pour permettre à un utilisateur déficient visuel d'accéder à une carte dynamique. Dans cette étude, nous avons considéré deux actions essentielles lors de l'exploration d'une carte numérique : « zoomer » (pour changer d'échelle), et « panner » (pour déplacer une fenêtre de visualisation sur la carte – seule la partie de la carte contenue à l'intérieur de la fenêtre de visualisation est affichée à l'écran). Bien que ces deux fonctionnalités aient parfois été développées pour des personnes déficientes visuelles (notamment avec des tablettes braille), ni les techniques d'interaction utilisées ni leur impact sur la compréhension n'ont été formellement évalués.

## DESCRIPTION DU SYSTÈME ET DES DEUX INTERFACES (*CHAPITRE 5, 2*)

Le système, nommé BotMap, se compose d'une table interactive sur laquelle sont disposés des robots, représentant les points d'intérêt, et sur laquelle une carte est affichée. Trois niveaux de zoom ont été définis : au niveau Métropole, seules les métropoles sont affichées (toute la carte est affichée à l'écran) ; au niveau Ville, les métropoles et les villes sont affichées ; au niveau Village, les métropoles, les villes et les villages sont affichés.

Pour obtenir le nom d'un point d'intérêt représenté par un robot, l'utilisateur doit sélectionner ledit robot en le pointant avec son index, sur lequel est fixé un marqueur. Le nom du robot est donné, suivi de son type (e.g. « Paris, métropole »). Des commandes vocales permettent à l'utilisateur d'écouter la liste des lieux affichés, d'obtenir l'échelle actuelle (e.g. « la fenêtre représente 200 km »), de répéter la dernière instruction, ou de placer le dernier lieu sélectionné au centre de l'écran.

Pour changer la position de la fenêtre ou l'échelle de la carte, l'utilisateur doit activer les modes Pan et Zoom grâce à des commandes vocales, puis interagir avec le clavier (interface Clavier, ou *Keyboard*) ou les curseurs (interface Curseur, ou *Sliders*). Pendant ces actions, le système donne des informations vocales : pour le mode Pan, il indique la position de la fenêtre par rapport à sa position initiale, i.e. au moment de l'activation du mode (e.g. « 3 heures, 200 km ») ; pour le mode Zoom, il indique le niveau de zoom sélectionné ainsi que l'échelle (e.g. « niveau Ville, la fenêtre représente 130 km ») ;

### INTERFACE CLAVIER (CONTROLE DISCRET ET POSITIONNEMENT RELATIF) (*CHAPITRE 5, 2.3.2*)

Un pavé numérique est placé sur la droite de la table. Le cadre est virtuellement découpé en une grille de 3 x 3. Les touches + et - permettent à l'utilisateur de changer de niveau de zoom : lorsque l'utilisateur zoome, la partie de la carte affichée dans la case centrale de la fenêtre est agrandie de manière à occuper toute la fenêtre; lorsque l'utilisateur dézoome, la partie affichée est réduite de manière à occuper la case centrale de la fenêtre uniquement. L'utilisateur peut donc sélectionner une échelle par niveau de zoom uniquement. Les flèches directionnelles permettent à l'utilisateur de déplacer la fenêtre d'une ligne et/ou d'une colonne à la fois.

### INTERFACE CURSEURS (CONTROLE CONTINU ET POSITIONNEMENT ABSOLU) (*CHAPITRE 5, 2.3.3*)

Trois robots (les curseurs) peuvent être déplacés à l'intérieur de rails situés de part et d'autre de la zone d'affichage. Un robot (à droite) permet à l'utilisateur de sélectionner une échelle (e.g. pour passer de 280 km à 60 km), et ainsi de changer de niveau de zoom. Deux robots (à gauche et en bas) permettent à l'utilisateur de contrôler la position verticale et horizontale de la fenêtre de visualisation : en les déplaçant à l'intérieur des rails qui représentent respectivement la hauteur et la largeur de la carte, l'utilisateur peut déplacer la fenêtre et ainsi choisir quelle partie de la carte il souhaite afficher.

## IMPLÉMENTATION (*CHAPITRE 5, 3*)

Un marqueur est fixé sur le haut des robots et sur un doigt de l'utilisateur pour obtenir leur position (les marqueurs sont repérés par une caméra suspendue au-dessus de la table). Les robots sont des Ozobots,

de petits robots commercialisés et initialement destinés à l'apprentissage de la programmation par de jeunes enfants. L'application a été développée en Java, avec la bibliothèque MT4J. Un algorithme a été développé pour gérer le déplacement des robots (attribution des lieux et gestion des collisions).

## **ETUDE 1 : UTILISABILITÉ DES INTERFACES (CHAPITRE 5, 4)**

L'objectif de cette étude était de s'assurer que les deux interfaces développées permettent de réaliser des actions de pan et zoom, sans vision. Nous souhaitions aussi étudier si une interface était plus utilisable qu'une autre. Pour cette étude ainsi que pour l'étude 2, les robots étaient replacés manuellement, par l'expérimentateur, afin de limiter le temps de l'évaluation.

### **MATÉRIEL ET MÉTHODES (CHAPITRE 5, 4.1 ET CHAPITRE 5, 4.2)**

10 personnes voyantes sous bandeau ont pris part à cette étude. La tâche était de trouver un village (nommé « Cible »), le plus rapidement possible. Une commande vocale (Info) permettait aux participants d'obtenir à tout moment la distance et la direction de la cible par rapport au centre de la fenêtre. Nous avons varié trois paramètres : la distance à la cible (petite vs grande), la direction de la cible (sur l'axe vertical ou horizontal vs en diagonale), et le niveau de zoom initial (niveau village, identique à la cible vs niveau métropole, différent de celui de la cible). Pour chaque condition, les sujets devaient trouver trois cibles, soit 24 essais par interface. Nous avons principalement mesuré le temps nécessaire pour trouver la cible et la distance parcourue.

### **RÉSULTATS ET DISCUSSION (CHAPITRE 5, 4.3 ET CHAPITRE 5, 4.4)**

Tous les sujets ont réussi à trouver toutes les cibles, en 25 secondes environ. Deux tendances ont pu être observées : 1) avec les Curseurs, les sujets étaient considérablement plus longs lorsque la direction était Diagonale que lorsqu'elle était Verticale/Horizontale ; 2) les sujets avaient tendance à être plus longs avec les Curseurs qu'avec le Clavier lorsque la distance était petite et la direction diagonale. Des tendances similaires ont été observées en mesurant la distance parcourue : les sujets ont davantage déplacé la fenêtre avec les Curseurs qu'avec le Clavier lorsque la distance était petite, la direction diagonale et le niveau de zoom identique. En termes de satisfaction, le score SUS était proche de 86 pour les deux interfaces. En conclusion, les deux interfaces permettent à des personnes d'effectuer des opérations de pan et de zoom sans vision, et dans un temps relativement court. Les mesures observées tendent à montrer que l'interface Clavier est plus utilisable (temps de complétion plus courts et distances parcourues moins grandes).

## **ETUDE 2 : UTILISABILITÉ ET REPRÉSENTATIONS MENTALES (CHAPITRE 5, 5)**

Avec cette étude, nous souhaitions confirmer les tendances observées précédemment avec des utilisateurs déficients visuels, mais aussi étudier dans quelle mesure des personnes déficientes visuelles étaient capables de comprendre une carte nécessitant des opérations de type « Pan & Zoom ».

### **MATÉRIEL ET MÉTHODES (CHAPITRE 5, 5.1 ET CHAPITRE 5, 5.2)**

Nous avons recruté huit personnes déficientes visuelles (sans ou avec une très faible perception résiduelle). L'étude était composée de deux sessions de 2 h 30 environ, réalisées sur deux jours. La première session était une session d'entraînement (explication des concepts de pan et zoom et exercices avec les deux interfaces) ; la seconde session était une session d'évaluation, composée de deux blocs (un

pour chaque interface). Les sujets devaient trouver des lieux dans une carte (fictive), et mémoriser la position de ces lieux afin de pouvoir répondre à des questions. Chaque bloc était composé de 8 essais : deux essais de type « Zoom » (pour trouver deux villes situées près d'une métropole) ; deux essais de type « Zoom & Pan » (pour trouver un village situé dans un rayon de 50 km autour d'une ville) ; deux essais de type « Pan » (pour trouver une ville située à plus de 150 km d'une autre ville) ; deux essais de type « Dézoom & Pan » (pour trouver deux villes situées près d'une métropole, elle-même située assez loin de la ville de départ). Pour chaque essai, la consigne était donnée (e.g. « trouver les villes A1 et A2 situées aux alentours de la métropole A »), puis les sujets devaient trouver les lieux cibles tout en mémorisant leur position. Une fois les lieux trouvés, ils avaient trente secondes pour explorer la partie de la carte affichée.

A la fin de chaque essai, les participants devaient répondre à quatre questions à choix multiples (une seule bonne réponse sur quatre possibles). Ces questions étaient simples (concernant un lieu par rapport à un autre) ou complexes (concernant un lieu par rapport à plusieurs lieux) ; portaient sur des distances ou des directions ; portaient sur un groupe de lieux (une métropole et ses villes et villages satellites) ou plusieurs groupes de lieux (plusieurs métropoles et leurs villes et villages satellites). A la fin des huit essais, les participants devaient reconstruire la carte grâce à des aimants sur lesquels l'initiale de chaque lieu était inscrite en Braille.

## RÉSULTATS (CHAPITRE 5, 5.3)

### NAVIGATION (CHAPITRE 5, 5.3.1)

115 essais sur 128 ont été correctement réalisés par les participants, sans l'aide de l'expérimentateur. La plupart des essais incorrects étaient des essais de type « Zoom & Pan », lors desquels les sujets se sont sentis désorientés (i.e. ils n'arrivaient pas à savoir où se situait la fenêtre et/ou comment déplacer la fenêtre pour trouver la cible). De même que pour l'étude 2, les temps de complétion et les distances parcourues étaient considérablement plus longs avec les Curseurs qu'avec le Clavier.

### REPRÉSENTATIONS MENTALES (CHAPITRE 5, 5.3.2)

Les cartes reconstruites ont été analysées grâce à une méthode de régression bidimensionnelle : le coefficient de régression indique dans quelle mesure les cartes reconstruites sont similaires à la carte modèle. De manière générale, la plupart des cartes reconstruites étaient (très) similaires au modèle (le coefficient de huit cartes était supérieur à 0,8 et le coefficient de six cartes était compris entre 0,6 et 0,8). Il est possible de distinguer trois groupes de participants : deux ont obtenu de faibles coefficients (< 0,5), six ont obtenu de bons coefficients (entre 0,7 et 0,8) et un participant a obtenu d'excellents résultats (> 0,95). Il n'y avait pas de différences entre les interfaces Clavier et Curseurs.

Quant aux questions, le taux moyen de bonnes réponses était considérablement supérieur au niveau de chance, qui était de 25% (environ 56% pour les Curseurs et 63% pour le Clavier). Le pourcentage de bonnes réponses était cependant plus faible pour les questions de type Distance, notamment pour l'interface Curseurs. De manière générale, le taux de bonnes réponses étaient plus élevé pour l'interface Clavier que pour l'interface Curseur, quel que soit le type de questions.

### **QUESTIONNAIRES** (*CHAPITRE 5, 5.3.3*)

Le score SUS était d'environ 77 pour le Clavier (IC95% [68, 84]) et de 73 pour les Curseurs (IC95% [61, 82]). L'interface Clavier a été préférée par la plupart des participants (6 l'ont trouvée plus efficace, 5 l'ont trouvée plus agréable à utiliser et 5 l'ont classée première). Les résultats du NASA-TLX ont révélé que la tâche était mentalement exigeante, et nécessitait des efforts assez élevés.

### **DISCUSSION** (*CHAPITRE 5, 5.4*)

Cinq principales remarques peuvent être faites suite à cette étude. Premièrement, les mesures de compréhension ont montré que des personnes déficientes visuelles sont capables de comprendre des cartes nécessitant l'utilisation de « Pan & Zoom », et que, par conséquent, l'expérience visuelle n'est pas nécessaire pour comprendre et manipuler les concepts de pan et de zoom.

Deuxièmement, les résultats de ces deux premières études semblent indiquer que le Clavier est plus utilisable que les Curseurs. Ceci pourrait s'expliquer par le fait qu'il pouvait y avoir un décalage entre les informations données par le système et la position des curseurs (à cause de la nature séquentielle des retours sonores). Par ailleurs, les personnes déficientes visuelles ne sont pas habituées à manipuler des dispositifs de contrôle continu, ce qui pourrait expliquer les préférences rapportées.

Troisièmement, bien que les participants aient réussi à réaliser les actions de pan et zoom nécessaires à la réalisation de la tâche, certains ont rencontré des difficultés et se sont sentis désorientés, notamment pour les essais de type « Zoom & Pan ». Plus précisément, il semblerait que les participants n'aient pas toujours réussi à mettre en œuvre les stratégies de navigation qu'ils avaient planifiées (e.g. certains participants souhaitaient tourner autour d'un point de référence mais n'arrivaient pas à déplacer la fenêtre tout en restant dans un certain rayon). Ces difficultés pourraient s'expliquer par un manque d'entraînement ou par la nature des informations fournies par le système (coordonnées polaires et informations relatives à la position initiale de la fenêtre).

Quatrièmement, nous avons observé des relations entre les performances en termes de navigation et les performances en termes de compréhension : les sujets qui ont obtenu de bons scores de compréhension étaient enclins à naviguer correctement avec les deux interfaces, et ceux qui ont eu des difficultés à manipuler une interface étaient enclins à obtenir de moins bons résultats en termes de compréhension. Ces différences inter-individuelles ne peuvent être expliquées par l'âge ou l'expérience visuelle des sujets (des sujets aveugles tardifs ont obtenu de moins bonnes performances que des aveugles de naissance). En revanche, ces différences pourraient s'expliquer par des stratégies de mémorisation différentes (les deux sujets ayant obtenu les moins bonnes performances étant aussi ceux qui ont adopté des stratégies de mémorisation différentes des autres).

Cinquièmement, il apparaît que l'exploration non-visuelle de cartes de type « Pan & Zoom » est mentalement exigeante. Cette observation pourrait être liée aux conditions de l'évaluation (nouveaux concepts de pan et zoom, nouveau système avec plusieurs commandes vocales à retenir, tâche nécessitant de mémoriser des noms de lieux et des positions géographiques, etc.). Cependant, il est aussi possible de concevoir des aides à la navigation afin de libérer des ressources cognitives pour l'utilisateur.

## ETUDE 3 : SCÉNARIO RÉALISTE ET AIDES A LA NAVIGATION (*CHAPITRE 5, 6*)

Dans cette étude, nous avons souhaité tester le système dans un cadre plus réaliste, i.e. avec des données géographiques réelles et les robots en fonctionnement. La carte utilisée était la carte d'Afrique, avec 6 mégapoles, 27 métropoles et 127 villes. Afin de faciliter la navigation (et éventuellement réduire la charge cognitive induite par la tâche), nous avons aussi développé quatre aides à la navigation.

### AIDES A LA NAVIGATION (*CHAPITRE 5, 6.2.3*)

Toutes les aides à la navigation peuvent être activées par commande vocale. La commande « Départ » réinitialise le niveau de zoom et la position de la fenêtre dans leur configuration initiale (i.e. toute la carte d'Afrique est affichée, au niveau mégapole). La commande « Où suis-je ... » permet à l'utilisateur de se repérer sur la carte. Dans un premier temps, le système indique la position du cadre (en haut à droite, en bas à gauche, etc.). Puis, selon le niveau de zoom actuel, différentes informations sont données (par exemple, au niveau Métropole : « la métropole la plus proche de A est B, située à 6 h et 900 km ; la mégapole la plus proche de A est C, située à 9 h et 2000 km »). La commande « Où est ... » indique à l'utilisateur où se trouve le lieu concerné (distance et direction) par rapport au dernier lieu sélectionné, ou, si le dernier lieu sélectionné n'est plus affiché à l'écran, par rapport au centre de la fenêtre. Enfin, la commande « Aller à ... » permet à l'utilisateur d'afficher n'importe quel lieu au centre de la fenêtre ; le niveau de zoom est modifié en conséquence (niveau Ville si le lieu demandé est une ville).

### MATÉRIEL ET MÉTHODES (*CHAPITRE 5, 6.1 ET CHAPITRE 5, 6.2*)

Trois personnes déficientes visuelles ayant participé à l'étude 2 ou aux pré-tests ont été recrutées, ainsi que trois personnes voyantes (sous bandeau). Les sujets devaient trouver l'itinéraire le plus court reliant trois lieux ; entre deux lieux, ils devaient trouver une métropole et une ville touristique à visiter (le message « tourisme » était joué lors de la sélection du lieu, s'il était touristique). Il n'y avait aucune contrainte de temps : les sujets s'arrêtaient quand ils étaient satisfaits de leur itinéraire. Ils devaient ensuite répondre à trois questions pour chaque aide à la navigation (facilité d'utilisation, utilité, améliorations possibles) et commenter huit caractéristiques des robots (« discriminabilité », hauteur, interactivité, forme, vitesse, stabilité, bruit, nombre).

### RÉSULTATS (*CHAPITRE 5, 6.3*)

#### AIDES A LA NAVIGATION (*CHAPITRE 5, 6.3.1*)

Toutes les aides ont été jugées très faciles à utiliser, et très utiles. La commande « Où est... » a été très fréquemment utilisée, ainsi que la commande « Aller à ... ». En revanche, les deux autres commandes n'ont été que très rarement utilisées (les sujets ne se sont pas sentis désorientés). Plusieurs personnes ont mentionné le fait qu'elles aimeraient une commande permettant de filtrer les informations affichées.

#### ROBOTS (*CHAPITRE 5, 6.3.2*)

Le temps moyen de remplacement des robots était de 9 secondes. Les sujets étaient particulièrement satisfaits de la hauteur et de la forme des robots, ainsi que du bruit émis lorsqu'ils se déplacent (qui permet de savoir que le système fonctionne). En revanche, les commentaires concernant les autres caractéristiques étaient plus mitigés : la vitesse a dans l'ensemble été jugée convenable, mais des sujets auraient aimé que les robots soient un peu plus rapides ; la stabilité des robots est convenable, mais le

système serait plus utilisable si les robots étaient plus stables. Quant au nombre de robots utilisé, certains sujets l'ont jugé satisfaisant (voire idéal), alors que d'autres auraient souhaité pouvoir interagir avec davantage de robots.

## DISCUSSION ET PERSPECTIVES (*CHAPITRE 5, 7*)

Le développement de BotMap nous a permis de mettre en évidence le potentiel des interfaces tangibles animées pour rendre accessibles des cartes géographiques dynamiques. Les trois études réalisées nous ont permis d'évaluer l'utilisabilité du système, et plus particulièrement des deux interfaces que nous avons développées, ainsi que leur impact sur les représentations mentales des participants.

Cette étude a ouvert de nombreuses perspectives. En termes d'implémentation, il serait intéressant d'utiliser des robots plus stables et plus rapides, voire fournissant des retours haptiques. Le contenu pourrait aussi être enrichi en permettant à l'utilisateur d'utiliser les robots comme dispositif d'entrée ou en concevant un système combinant BotMap avec les Tangible Reels. Concernant l'utilisabilité des techniques, il serait intéressant d'étudier si avec davantage d'entraînement, les participants arriveraient à tirer profit de l'interface Curseurs (contrôle continu), et si cela impacterait leur compréhension de la carte. De manière générale, l'exploration d'une carte de type « Pan & Zoom » semble demander beaucoup d'efforts d'un point de vue cognitif ; il serait ainsi souhaitable d'étudier si d'autres retours (e.g. sonores au lieu de vocaux) ou d'autres techniques d'interaction (e.g. une fenêtre tangible à déplacer sur une carte) pourraient réduire la charge cognitive. Finalement, si de tels systèmes venaient à être plus largement utilisés, il serait nécessaire de réfléchir à l'adaptation automatique de contenu pour répartir les informations sur plusieurs niveaux de zoom et/ou à réfléchir à d'autres façons de représenter l'information grâce à des robots (par exemple, un robot pourrait représenter plusieurs villes).

## CHAPITRES 6 ET 7 – DISCUSSION, PERSPECTIVES ET

## CONCLUSION

### CONTRIBUTIONS (*CHAPITRE 1, 5 ET CHAPITRE 6, 1*)

D'un point de vue théorique, les principales contributions de cette thèse sont la proposition d'une nouvelle classification des cartes et diagrammes interactifs pour les personnes déficientes visuelles, la mise en évidence du potentiel des interfaces tangibles pour les personnes déficientes visuelles, et l'analyse détaillée de plusieurs prototypes de cartes et diagrammes tangibles. Etant donné le faible nombre de travaux de recherches portant sur les interfaces tangibles pour les personnes déficientes visuelles, nous avons cherché à apporter des solutions à plusieurs verrous techniques, notamment concernant la conception d'objets tangibles stables, la conception de techniques d'interaction adaptées et le développement de nouvelles interfaces. Nous avons notamment proposé trois nouvelles approches pour rendre les représentations graphiques tangibles plus expressives et/ou complexes : la matérialisation de symboles linéaires (Tangible Reels), l'utilisation d'objets tangibles au-dessus de supports tactiles traditionnels (Tangible Box), et l'utilisation d'objets tangibles animés (BotMap). Nous avons conçu plusieurs techniques d'interaction pour la reconstruction de représentation graphiques (avec notamment une technique de guidage en deux temps), l'exploration et l'annotation de graphes tangibles, et l'exploration de cartes de type « Pan & Zoom ».

Le développement et l'évaluation de ces trois interfaces nous a aussi permis de démontrer qu'il est possible de rendre des représentations graphiques relativement complexes et expressives grâce à l'interaction tangible. Contrairement aux prototypes existants, les trois interfaces que nous avons développées permettent en effet à des utilisateurs déficients visuels d'accéder à des représentations graphiques variées (cartes dynamiques, histogrammes, organigrammes, horloge, etc.) et reconfigurables. A travers cette thèse, nous avons aussi identifié un certain nombre de tâches pouvant être réalisées avec des cartes et des diagrammes tangibles, et mis en évidence leur potentiel pour des activités pédagogiques, notamment grâce au cadre de conception que nous avons proposé pour la Tangible Box.

## PORTÉE DE LA THESE (*CHAPITRE 6, 2*)

Les interfaces que nous avons conçues l'ont été de manière à ce qu'elles puissent être utilisées par des personnes aveugles. Cependant, il serait intéressant de voir comment les solutions que nous avons proposées en termes de conception pourraient être adaptées à des personnes malvoyantes ou voyantes. Notre approche pourrait ainsi converger avec le concept de *Feelable User Interface*, un type d'interface tangible à destination de personnes voyantes qui ne s'appuie sur aucun retour visuel.

Comme nous l'avons déjà souligné, la plupart des projets de recherche portant sur l'accessibilité des représentations graphiques tendent à porter sur un type de graphe précis (e.g. un histogramme) ou un type de carte précis. Nous avons volontairement choisi de considérer à la fois les cartes et les diagrammes, car ces deux types de représentations graphiques s'appuient sur les mêmes primitives graphiques (points, lignes, aires), et, par conséquent, soulève les mêmes problèmes de conception. Cependant, il serait intéressant d'étudier comment rendre plus utilisable un type de carte ou de diagramme en particulier en proposant des fonctionnalités adaptées. De manière générale, les contributions de cette thèse pourraient servir de base à la conception d'interfaces tangibles destinées à rendre accessibles des tableaux de données (les objets pourraient servir à annoter une cellule par exemple), ou des données qui ne sont pas intrinsèquement spatiales (éléments d'un langage de programmation, d'un jeu, d'un récit, etc.).

## RELATION AVEC D'AUTRES DOMAINES DE RECHERCHE (*CHAPITRE 6, 3*)

Les travaux que nous avons réalisés sont en lien avec cinq domaines de recherche. Premièrement, les théories d'*embodiment* fournissent un cadre d'étude intéressant pour analyser le potentiel des interfaces tangibles pour l'apprentissage (*Chapitre 6, 3.1*). Il serait par exemple intéressant de s'appuyer sur ces théories pour étudier si le fait de reconstruire une carte facilite la mémorisation de ladite carte (e.g. dans le cadre des Tangible Reels).

Deuxièmement, de nombreux travaux ont été conduits sur les *constructive assemblies* – des interfaces tangibles qui s'appuient sur la construction libre de représentations ou de modèles à partir de briques tangibles qui peuvent être connectées l'une à l'autre (*Chapitre 6, 3.2*). Ces travaux, qu'il s'agisse de cadres de conception, de modèles théoriques ou de prototypes, pourraient non seulement servir de base à l'amélioration des Tangible Reels, mais aussi servir au développement de *constructive assemblies* pour des personnes déficientes visuelles.

Les interfaces de type *token+constraint* constituent le troisième domaine de recherche auquel cette thèse est liée (*Chapitre 6, 3.3*). Avec ces interfaces, la fonction ou la signification des objets tangibles est déterminée par des contraintes physiques qui restreignent la façon dont ils peuvent être manipulés (e.g. un curseur dans un rail). Dans le cadre de la Tangible Box, l'utilisation d'objets tangibles en sus de supports tactiles ouvre de nombreuses perspectives pour le développement d'applications pédagogiques basées sur des relations *token+constraint* ; en effet, les éléments tactiles peuvent plus ou moins contraindre la manipulation des éléments tangibles.

Le quatrième domaine de recherche concerne les *Swarm User Interfaces*, des interfaces tangibles sur table composées d'un ensemble de petits objets animés (*Chapitre 6, 3.4*). Bien que BotMap ne réponde pas à tous les critères d'une SUI, le système pourrait être amélioré et/ou complété en s'appuyant sur un cadre de conception récemment proposé. Il serait ainsi envisageable d'utiliser des robots de différentes formes, de proposer des animations tangibles pour faciliter la compréhension de la carte, de permettre à l'utilisateur d'interagir avec un seul robot (par exemple pour sélectionner les informations lues par la voix de synthèse), ou d'utiliser les robots au-dessus d'un support tactile.

Enfin, nos travaux sont très liés à un domaine de recherche émergent, appelé *data physicalization*, et qui a pour objet d'étude les représentations physiques de données, qui peuvent faciliter la communication, l'apprentissage ou encore la prise de décision (*Chapitre 6, 3.5*). Bien que les études sur ce sujet soient limitées, le développement de *data physicalizations* pour des personnes déficientes visuelles pourrait d'une part s'inspirer des prototypes et études existants, mais aussi inspirer le développement de *data physicalizations* pour les personnes voyantes.

## PERSPECTIVES GÉNÉRALES (*CHAPITRE 6, 4*)

La dernière partie du chapitre 6 de la thèse est consacrée à trois grandes perspectives. Dans un premier temps, il serait souhaitable d'améliorer les interfaces proposées (voire de les combiner), en s'appuyant notamment sur la conception de retours sonores courts (afin d'éviter des décalages entre la représentation physique et les messages lus par le système), et sur le développement de techniques d'interaction pour l'exploration de lignes et d'aires sonores et/ou haptiques (afin de rendre les représentations plus expressives). Deux champs d'applications pourraient aussi être considérés : d'une part, les situations collaboratives d'apprentissage (deux projets sont actuellement en cours sur ce sujet – l'un concerne le développement d'un jeu, l'autre le développement d'activités pédagogiques pour accompagner des enfants déficients visuels dans leur apprentissage des concepts spatiaux) ; d'autre part, l'accessibilité des données géo-statistiques grâce au développement d'une interface tangible et animée (*geophysicalization*) – à ce titre, un histogramme motorisé a été développé, qui pourrait être utilisé avec BotMap pour explorer, comprendre et analyser des données géostatistiques.