



Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : <http://oatao.univ-toulouse.fr/>
Eprints ID : 17229

The contribution was presented at IHM 2016 :
<http://ihm2016.afihm.org/#/>

To cite this version : Ducasse, Julie and Oriola, Bernard and Macé, Marc and Jouffrais, Christophe *Concevoir des interfaces tangibles et spatiales pour les déficients visuels : pourquoi et comment ?* (2016) In: 28ième conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM 2016), 25 October 2016 - 28 October 2016 (Fribourg, Switzerland).

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Concevoir des interfaces tangibles et spatiales pour les déficients visuels : pourquoi et comment ?

Designing spatial tangible interfaces for visually impaired users: why and how?

Julie Ducasse^{1,2}

Bernard Oriola^{1,2}

Marc Macé^{1,2}

Christophe Jouffrais^{1,2}

¹ Université de Toulouse – IRIT. Toulouse, France

² CNRS – IRIT. Toulouse, France

prenom.nom@irit.fr

RESUME

Rendre les cartes géographiques et les représentations graphiques accessibles aux personnes déficientes visuelles est primordial. Pour cela, de nombreuses solutions existent, qu'elles soient artisanales ou technologiques. Parmi ces dernières, les interfaces tangibles, bien que très prometteuses, ont été très peu étudiées. Dans cet article, nous analysons cinq prototypes issus de la littérature afin d'identifier les facteurs à prendre en compte lors de la conception d'interfaces tangibles et spatiales pour les déficients visuels, et nous présentons les solutions proposées pour répondre aux difficultés techniques fréquemment rencontrées. Nous souhaitons ainsi faciliter et encourager le développement et l'évaluation d'interfaces tangibles et spatiales.

Mots Clés

Interaction non-visuelle ; interaction tangible ; graphiques interactifs ; technologie d'assistance.

ABSTRACT

Making geographical maps and graphical representations accessible to visually impaired users is essential. To do so, a variety of approaches exist, whether traditional or technological. Among them, tangible interfaces, although very promising, have not been thoroughly investigated. In this article, we analyze five research prototypes in order to identify the aspects that have to be taken into account when designing spatial tangible interfaces for visually impaired users, and we present the various solutions that have been proposed to address the most commonly encountered problems. In this way we hope to facilitate and support the development and evaluation of spatial tangible interfaces.

Author Keywords

Non-visual interaction; tangible interaction; interactive graphics; visual impairment; assistive technology.

INTRODUCTION

L'essor d'internet dans les années 1990 puis des dispositifs mobiles dans les années 2000 a rendu les cartes interactives et les représentations graphiques de données quantitatives (histogrammes, diagrammes en secteurs, etc.) très populaires et omniprésentes. Mais l'avènement de ces contenus interactifs et visuels a peu profité aux personnes déficientes visuelles (DV). En effet, leur affichage nécessite des surfaces planes (smartphones, écrans d'ordinateur) qui ne présentent pas de relief, ce qui rend leur utilisation par des DV problématique.

Pourtant, l'accès à ces contenus graphiques et spatiaux est crucial. Rendre accessibles les cartes géographiques permettrait par exemple de rendre les DV plus autonomes en terme de navigation, ce qui faciliterait leur vie professionnelle et sociale. Les cartes et les graphes sont aussi nécessaires pendant la scolarité (cours de géographie, de mathématiques, etc.) et dans la vie quotidienne.

Parmi les différents dispositifs qui permettent de rendre ces données visuelles accessibles aux DV, les interfaces tangibles nous semblent particulièrement prometteuses. D'une part, elles rendent physiques et interactives les données visuelles, offrant ainsi aux utilisateurs la possibilité de les toucher et de les manipuler. D'autre part, à la différence des écrans déformables tels que l'HyperBraille¹, les interfaces tangibles s'appuient sur des technologies financièrement abordables.

Cependant, dans le cadre du projet AccessiMap, nous avons observé que la conception d'interfaces tangibles pour les DV soulève de nombreuses difficultés, que l'on retrouve aussi dans la littérature. Ces difficultés pourraient expliquer le faible nombre de prototypes de cartes et graphes tangibles. L'objectif de cet article est de proposer une revue de littérature sur les interfaces tangibles et spatiales pour les DV afin d'encourager et faciliter la conception de telles interfaces.

Les contributions de cet article sont les suivantes : 1) nous mettons en évidence le potentiel des interfaces tangibles pour rendre les cartes et graphes accessibles aux DV ; 2) nous analysons l'ensemble des prototypes existants dans la littérature afin d'identifier les facteurs à prendre en compte lors de la conception de telles interfaces, ainsi que les

¹ <http://www.hyperbraille.com/>

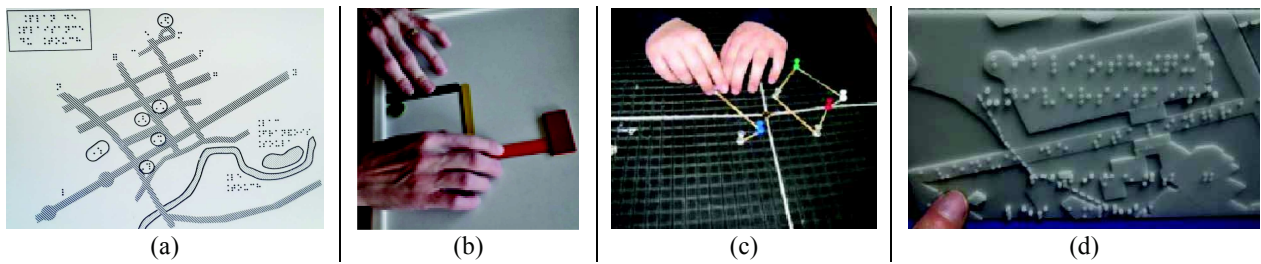


Figure 1. a) Une carte tactile en relief (technique du thermogonflage) avec des abréviations en Braille. b) Pour les cours d'orientation et mobilité, des aimants sont souvent utilisés pour construire un itinéraire. c) Une personne déficiente visuelle construit et explore des formes réalisées à partir de punaises et d'élastiques [21]. d) Une carte imprimée en 3D [14].

difficultés techniques qui en découlent. Ces facteurs sont présentés selon cinq dimensions : interactivité, matérialité, information représentée, affichage dynamique et manipulation, coût.

RENDRE LES CARTES ET LES GRAPHES ACCESSIBLES AUX DEFICIENTS VISUELS

Les DV ont accès à des représentations spatiales à travers des cartes en relief ou des modèles 3D, qui sont relativement rares et en général disponibles uniquement dans des centres spécialisés. Pourtant, ces représentations jouent un rôle crucial, aussi bien à l'école qu'au travail et dans la vie personnelle. Dans cette partie, nous rappelons pourquoi il est essentiel de rendre ces contenus accessibles et décrivons les principales approches existantes.

Motivations

Favoriser le déplacement autonome des DV

Selon un rapport de l'OMS, en France, 58% des DV rencontrent des difficultés à se déplacer en autonomie [31]. Ceci peut en partie s'expliquer par le fait que les DV ont rarement accès à des cartes géographiques. Rendre les cartes accessibles, en s'appuyant par exemple sur des données libres de type OpenStreetMap (voir [8] par exemple), contribuerait très certainement à l'insertion professionnelle des DV, et pourrait aussi impacter positivement leur vie sociale [26].

Garantir un accès équitable à l'information

Outre les cartes géographiques, de très nombreux contenus graphiques sont aujourd'hui utilisés dans les médias. Il est primordial de garantir un accès équitable à ces informations afin que chaque personne, qu'elle soit déficiente visuelle ou non, puisse exploiter ces données géospatiales et/ou quantitatives. Ceci est d'autant plus important qu'il existe de nombreux domaines professionnels où l'utilisation de diagrammes ou graphes est très fréquente.

Mettre en place de nouvelles méthodes pédagogiques

Apprendre à lire une carte ou interpréter des représentations graphiques fait partie des compétences qu'un élève (déficient visuel ou non) doit acquérir durant sa scolarité. Il est donc primordial de mettre à disposition des enseignants et des élèves des supports et des dispositifs adaptés. En ce sens, l'utilisation de nouvelles technologies permet de faciliter la production des supports utilisés, mais aussi de

mettre en place de nouvelles méthodes pédagogiques qui encouragent l'autonomie des élèves et favorisent leur insertion.

Solutions techniques et technologiques

Dans les centres d'éducation spécialisée aussi bien que dans le milieu académique, de nombreuses solutions existent pour rendre les cartes et graphes accessibles aux DV. Pour les présenter, nous faisons la distinction entre les dispositifs non-interactifs (très largement utilisés dans les centres d'éducation spécialisée) et les dispositifs interactifs (pour la plupart issus de projets de recherche).

Dispositifs non-interactifs

Dans le cadre du projet AccessiMap, nous avons réalisé plusieurs observations pour identifier les différents types de cartes et graphes utilisés dans un centre d'éducation spécialisée [5,9]. Ces contenus ne sont pas interactifs et sont généralement fabriqués «à la main», par des professionnels de l'adaptation des documents. Des observations similaires ont été réalisées concernant les graphes mathématiques [21] [22].

Le format le plus répandu est celui des dessins en relief (DER) : imprimés sur un papier spécial qui gonfle lorsqu'il est chauffé (thermogonflage) ou moulés dans une feuille plastique qui prend la forme d'une matrice composée de différentes textures (thermoformage), les DER présentent un relief qui peut être touché et interprété par l'utilisateur (Figure 1.a). Les cartes et les graphes peuvent aussi être fabriqués à partir de papier, cartons, feuilles texturées, bois, etc. Dans le cadre des leçons d'orientation et mobilité, nous avons aussi observé l'usage fréquent d'un tableau magnétique sur lequel des aimants sont progressivement posés (par le professeur et/ou l'élève) afin de reconstruire un itinéraire ou un plan (Figure 1.b). En ce qui concerne les graphes, un tableau de liège peut être utilisé, sur lequel le professeur ou l'élève insère des punaises qui peuvent être reliées par des élastiques afin de représenter des fonctions mathématiques [21] [22] (Figure 1.c).

Récemment, plusieurs projets de recherche se sont intéressés à l'utilisation de l'impression 3D pour faciliter la production de cartes et graphes accessibles. Par exemple, Gotzelman et collaborateurs [14] ont proposé l'adaptation automatique de données géographiques libres pour générer des cartes qui peuvent être imprimées en 3D (Figure 1.d).

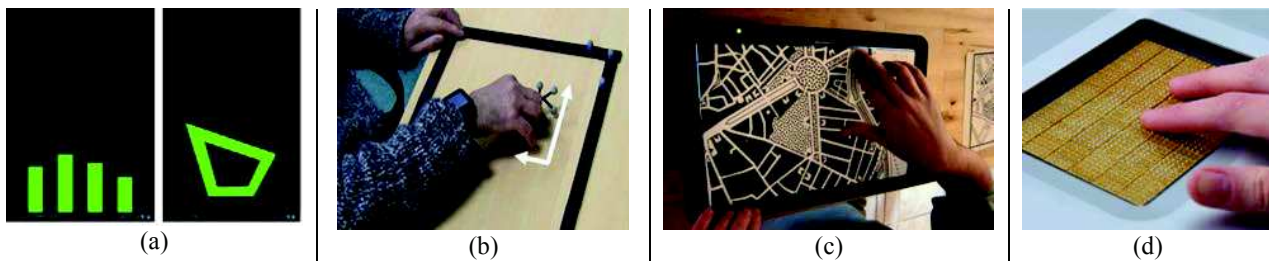


Figure 2. a) Exemples de représentations pouvant être explorées grâce à des feedbacks auditifs et vibratoires, sur un smartphone [13]. b) Une personne déficiente visuelle déplace son doigt sur la table pour explorer une carte virtuelle. L'utilisation d'une smartwatch permet de rajouter des feedbacks vibratoires mais aussi de filtrer les données [1]. c) Exemple d'un Dessin En Relief augmenté [3]. d) Exemple d'un afficheur HyperBraille composé de picots qui peuvent monter ou descendre [38].

Dispositifs interactifs

Brock *et al.* [2] ont montré que la conception de prototypes de cartes interactives diffère sur de nombreux aspects (contenu, dispositifs et techniques d'interaction). Les prototypes de graphes interactifs s'appuient sur des dispositifs et techniques d'interaction très similaires. Nous présentons les principaux types de prototypes de cartes ou graphes interactifs en distinguant ceux qui permettent l'exploration de contenus graphiques *numériques* uniquement, c'est-à-dire virtuels, et ceux qui permettent l'exploration de contenus graphiques *physiques*.

Cartes et graphes virtuels

Ces prototypes s'appuient en entrée sur des dispositifs variés (souris, clavier, joystick, objet tangible, bras à retour de force) ou sur des écrans tactiles. Les feedbacks sont auditifs (messages verbaux, icônes auditives) ou haptiques (vibrations, retour de force).

Les représentations virtuelles peuvent être explorées indirectement via une souris, un joystick ou un clavier. Par exemple, dans Earth+², un son différent est joué en fonction de la région présente sous le curseur de la souris ; dans [27], un joystick et des sons spatialisés permettent aux utilisateurs d'explorer un environnement virtuel ; dans [4], l'utilisateur utilise le clavier pour se déplacer le long de l'axe des abscisses d'un graphe et différentes notes sont jouées en fonction de la valeur de l'ordonnée.

L'exploration de représentations virtuelles peut aussi se faire via un stylet [23] ou un objet tangible [28] que l'utilisateur déplace sur une tablette ou une table. Pour les cartes, l'orientation et la position du stylet et de l'objet tangible définissent l'orientation et la position de l'« avatar » dans la carte, permettant de jouer des sons spatialisés.

Des bras ou joysticks à retour de force ont aussi été utilisés dans plusieurs projets. Par exemple, SeaTouch [36] permet à des marins DV de préparer leur itinéraire en explorant un environnement maritime virtuel. Quant au prototype développé par Yu *et al.* [39], il permet l'exploration de fonctions linéaires et de diagrammes en bâtons.

² <http://prime.jsc.nasa.gov/earthplus/>

Enfin, de nombreux projets cherchent à rendre les cartes et graphes accessibles à moindre coût, en s'appuyant sur des surfaces tactiles uniquement (smartphones, tablettes et tables interactives). Avec TouchOverMap [29] par exemple, une personne déficiente visuelle peut explorer un plan simplifié en déplaçant son doigt sur l'écran : des vibrations et des sons sont émis quand un élément de la carte est touché. Une technique similaire a été utilisée par Giudice *et al.* [13] pour l'exploration, entre autres, de diagrammes en bâtons (Figure 2.a). Récemment, Bardot *et al.* [1] ont combiné l'exploration d'une carte virtuelle avec un doigt à l'utilisation d'une smartwatch, utilisée pour filtrer les données à afficher et donner des feedbacks sonores et vibratoires (Figure 2.b).

Cartes et graphes physiques

Les représentations physiques reposent sur l'interaction tactile en entrée (et éventuellement tangible). Les feedbacks sont auditifs mais principalement haptiques, car l'utilisateur peut toucher la représentation physique. Trois types de prototypes existent : les dessins en reliefs (DER) augmentés, les écrans déformables et les interfaces tangibles.

Un DER augmenté est un DER qui est posé sur une surface interactive (Figure 2.c). L'utilisateur peut ainsi interagir avec le contenu numérique de la carte ou du graphe tout en l'explorant physiquement avec ses mains (cf. [25] par exemple). Brock *et al.* [3] ont notamment montré que les DER augmentés avec des interactions sont plus utilisables que les cartes tactiles classiques.

Les tablettes Hyperbraille sont constituées d'une matrice de picots dont la hauteur peut varier (Figure 2.d). Elles permettent un affichage dynamique du contenu. Zeng et Weber [40] ont utilisé un tel dispositif pour permettre à des DV d'explorer puis d'annoter une carte.

Enfin, il est possible de rendre accessible des cartes et des graphes grâce à des interfaces tangibles, en « reconstruisant » une partie ou l'ensemble du contenu grâce à des objets. Par exemple, dans le prototype développé par McGookin *et al.* [22], des *tokens* ([16]) permettent de représenter les points d'inflexion d'une fonction ou la valeur supérieure d'un diagramme en bâtons.

Analyse comparative des solutions proposées dans la littérature

Interactivité

Il existe plusieurs limitations liées aux dispositifs non-interactifs. D'une part, ils nécessitent pour la plupart l'utilisation du Braille. Outre le fait qu'un faible pourcentage de DV lit le Braille [24], les caractères écrits en Braille prennent beaucoup de place. Des abréviations et une légende séparée sont donc utilisées, ce qui requiert davantage de matériel et oblige l'utilisateur à passer de la représentation graphique à la légende et vice-versa, et rend l'exploration fastidieuse. De plus, le contenu (informations concernant les points d'intérêt, valeurs numériques, etc.) ne peut être modifié « à la volée » [18] ; il faut de nouveau imprimer la légende et le DER, ce qui est un processus lent et coûteux.

Enfin, l'absence d'interactivité limite les fonctionnalités (le calcul d'itinéraire ou l'utilisation de filtres sur les données sont impossibles par exemple) et rend souvent nécessaire la présence d'une personne voyante. Par exemple, lors de l'utilisation des aimants et du tableau en liège, l'élève ne peut pas placer les aimants s'il ne connaît pas l'itinéraire *a priori*, et il doit faire appel au professeur pour s'assurer que les aimants ou punaises sont correctement placés.

Matérialité

Les cartes et graphes virtuels permettent une grande flexibilité (facilité d'édition, affichage dynamique, etc.), mais l'absence de retour tactile inhérent à l'exploration de représentations uniquement virtuelles reste problématique. De plus, l'exploration est en général limitée à un point de contact seulement, dont la position correspond à celle du curseur, du stylet, de l'objet tangible ou du doigt. Une telle exploration ne permet pas à l'utilisateur de parcourir rapidement la représentation avec les deux mains afin d'en extraire les éléments saillants (nombre de points d'intérêt, estimation de la taille des aires) ou de comparer deux points en même temps [22].

Information représentée

Pour représenter des cartes et des graphes, quatre primitives sont nécessaires : des figurés ponctuels, des figurés linéaires, des aires et des labels (auditifs ou Braille). Pour les cartes et graphes virtuels, les figurés sont encodés sous forme de motifs vibratoires ou haptiques qui peuvent être difficiles à interpréter ou à distinguer les uns des autres. Il est aussi difficile d'afficher des symboles différents sur une tablette HyperBraille (faible résolution) ou de symboliser des aires ou des lignes avec une interface tangible. En revanche, les DER supportent une grande variété de figurés, principalement limitée par la capacité de l'utilisateur à différencier et mémoriser des figurés tactiles (de 4 à 7).

Les dispositifs diffèrent aussi par le nombre d'éléments qui peuvent être affichés simultanément : ce nombre peut être assez élevé pour les DER (cf. figure 1.c), mais il est faible pour les tablettes HyperBrailles (dispositif de petite taille)

et limité par la taille des objets et de la surface de travail pour les dispositifs tangibles.

Affichage dynamique et manipulation

L'affichage dynamique d'informations est nécessaire pour accéder à des contenus complexes (opérations de pan, zoom ou filtres nécessaires), mais aussi pour pouvoir afficher un nouveau contenu rapidement. La manipulation de contenus (édition, reconstruction, annotation) est aussi nécessaire dans le cadre d'activités pédagogiques [21]. Pourtant, les dispositifs actuels ne répondent pas à ces deux critères.

Les cartes et graphes virtuels peuvent être dynamiquement modifiés, mais ils sont difficilement manipulables par l'utilisateur. Bien que les DER augmentés soient à la fois interactifs et physiques, leur contenu ne peut pas être modifié dynamiquement car ils reposent sur l'utilisation d'une carte tactile imprimée. Ainsi, il est impossible de les repositionner ou de les redimensionner (opérations de pan et zoom) mais aussi de sélectionner les informations à afficher. Ce support est, de plus, mal adapté aux graphes, qui sont le plus souvent rendus accessibles via l'utilisation d'un tableau de type Excel. Enfin, ces dispositifs ne permettent pas à l'utilisateur de construire de nouveaux contenus sans l'aide de personne.

Les écrans déformables (comme l'Hyperbraille par ex.) permettent bien évidemment d'afficher dynamiquement des informations, mais se prêtent moins à des tâches de manipulation des données. Quant aux dispositifs tangibles, ils peuvent être utilisés pour afficher dynamiquement des informations (soit en automatisant le placement des objets, soit en permettant à l'utilisateur de reconstruire le contenu à chaque fois qu'il doit être mis à jour). Fitzmaurice *et al.* parlent de *spatial reconfigurability* [11]. Plusieurs projets ont déjà montré qu'ils sont particulièrement adaptés pour les tâches de manipulation (voir [30] par exemple).

Prix

Contrairement aux dispositifs basés sur des contenus virtuels ou aux DER augmentés, les dispositifs tangibles et les écrans déformables permettent à la fois d'explorer (de manière dynamique, en incluant le pan et le zoom) et d'annoter des contenus, ainsi que d'en afficher de nouveaux. Cependant, leur prix diffère. En effet, le coût des écrans déformables reste pour l'instant prohibitif [37]. A titre d'exemple, une matrice de 60 * 120 tiges coûtait 50 000 € en 2012 (plage Hyperbraille de Metec Ag). En revanche, une interface tangible requiert en général peu de matériel : une table, une caméra, des objets imprimés et un projecteur peuvent suffire.

Synthèse

Bien qu'un dispositif tangible ne permette pas à lui seul de représenter un grand nombre d'éléments et qu'il est difficile de matérialiser certains figurés (lignes et aires), nous soutenons que l'utilisation de dispositifs tangibles est très pertinente pour rendre accessible les cartes et graphes aux DV. En effet, ce sont des dispositifs financièrement

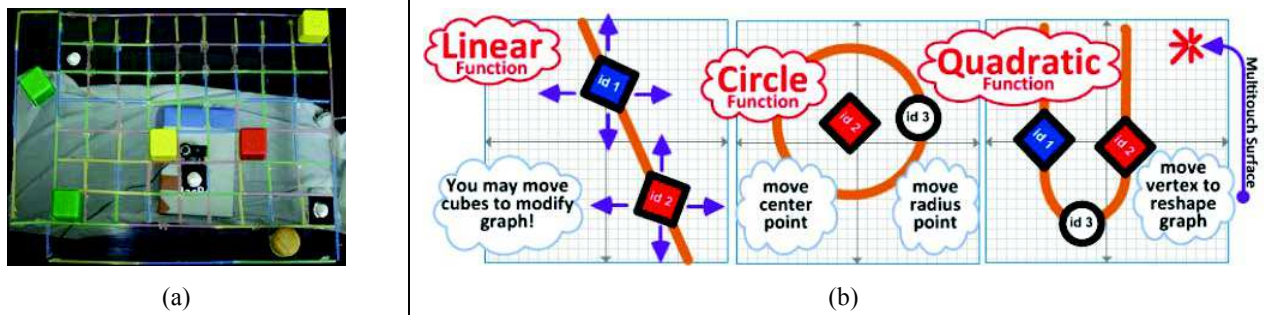


Figure 3. (a) Illustration du système Clutching At Straws qui permet de rendre tangible des fonctions linéaires [22]. Une grille fabriquée à partir de pailles permet de maintenir les objets en place. Deux séries de données sont représentées (cubes et cônes). Le slider en bas de l'image permet d'explorer le graphe (un son est joué en fonction de la valeur de l'ordonnée). (b) Exemples de scénarios pour la représentation de fonctions grâce aux TIMMs [21].

abordables, dans lesquels l'information numérique peut être matérialisée, et permettant l'affichage dynamique et la manipulation des contenus. Par ailleurs, plusieurs études ont montré que les interfaces tangibles permettent de créer de nouvelles situations d'apprentissage et facilitent la collaboration entre les utilisateurs [34].

Cependant, peu de recherches ont été menées sur les interfaces tangibles pour les DV, et la conception de ces dispositifs soulève de nombreuses difficultés. Nous avons analysé les prototypes existants afin d'identifier les facteurs à prendre en compte lors de leur conception et de leur développement, ainsi que les difficultés existantes et les solutions pouvant être apportées. Notre objectif est d'encourager et de faciliter la conception de prototypes de cartes et graphes tangibles pour DV, mais aussi de mieux cerner leurs avantages et limitations.

INTERFACES TANGIBLES POUR LA (RE-) CONSTRUCTION DE GRAPHES ET CARTES : ANALYSE DES TRAVAUX EXISTANTS

Méthodologie

Pour cette analyse, cinq prototypes ont été retenus. Nous avons seulement pris en compte les prototypes dans lesquels toute ou la majeure partie du contenu visuel et numérique de la carte ou du graphe est matérialisée via l'utilisation d'objets tangibles. Les objets sont des *tokens*, au sens de Holmquist *et al.* [16]: « *Tokens are physical objects that resemble the information they represent in some way, and thus are closely tied to the information they represent* ». Les cartes et graphes virtuels qui peuvent être explorés grâce à un avatar que l'on déplace sur une surface plane n'ont pas été pris en compte (par exemple [23]).

Description des prototypes tangibles

Le Tangible Pathfinder (TPath) a été pensé comme un outil d'apprentissage en autonomie pour les cours d'Orientation et de Mobilité [35]. Il permet de construire une carte ou un itinéraire en utilisant des objets qui représentent des

éléments importants pour la navigation (trottoirs, passages piétons, rampes, murs, etc.). Bien que ce système n'ait, à notre connaissance, pas été implémenté, les auteurs indiquent que des sons spatialisés sont émis pour permettre à l'utilisateur de construire la carte. Un avatar est déplacé sur la carte pour l'explorer, et les objets peuvent aussi « parler » pour donner des informations sur le point d'intérêt qu'ils représentent et l'environnement.

Le prototype de Schneider *et al.* [32] (appelé IT pour Itinéraire Tangible) est très similaire. L'objectif est d'encourager la participation active de l'élève en lui permettant de construire un itinéraire de manière autonome, avec l'aide d'un ordinateur. Une caméra détecte la position des objets et d'un doigt de l'utilisateur. Des objets de différentes longueurs sont mis à disposition de l'utilisateur, et le système indique à ce dernier la longueur du prochain segment de route. Une fois le segment posé près du précédent, le système indique dans quel sens l'objet doit être tourné. L'utilisateur peut aussi explorer l'ensemble de la carte (virtuelle) ou la route (tangible) en déplaçant son doigt sur la surface. Un aimant est placé à chaque extrémité des objets pour rendre la construction plus stable ; la forme des objets a aussi été pensée de façon à ce qu'ils puissent être manipulés sans que la main de l'utilisateur obstrue la vue de la caméra. Une évaluation informelle réalisée avec un utilisateur voyant et un utilisateur non-voyant suggère que le système peut être utilisé pour construire un itinéraire composé de cinq segments.

«Clutching at straws» (CStraws) permet l'exploration de fonctions linéaires et de diagrammes en bâtons [22] (Figure 3.a). Pour assurer la stabilité des objets, une grille (9 colonnes, 7 lignes), fabriquée à partir de pailles, est disposée sur la surface. Deux séries de données peuvent être représentées par deux types d'objets différenciables par leur forme. Les objets sont placés dans la grille, aux points d'inflexion de la fonction représentée. Un objet faisant office de *slider* peut être déplacé le long de l'axe des abscisses : le système calcule alors la valeur de l'ordonnée

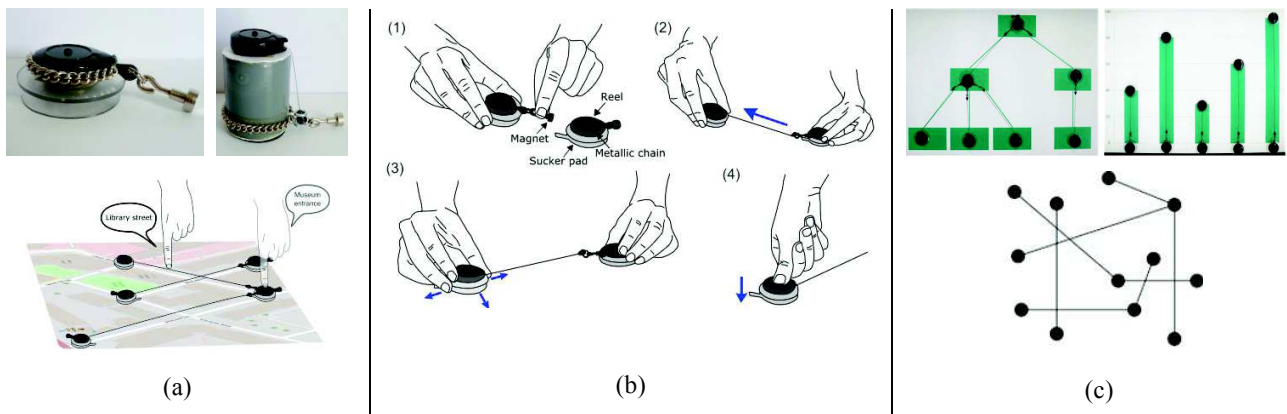


Figure 4. (a) Les Tangible Reels (Ventouses ou Poids) sont utilisés pour matérialiser des cartes composées de points et de lignes. (b) Les étapes permettant de construire une ligne. Le guidage se fait en deux temps (2) et (3). c) Exemple de représentations pouvant être construites avec les Tangible Reels.

correspondant à la position actuelle du *slider*, et traduit cette valeur en un son MIDI (par exemple, plus la note est aigue, plus la valeur est élevée). L'utilisateur peut choisir la série à sonifier en plaçant un objet correspondant à cette série dans une zone particulière. Pour les diagrammes en bâtons, seule une série peut être affichée à la fois : chaque objet placé sur une colonne représente l'extrémité supérieure du bâton. Le système ne permet pas de guider l'utilisateur pour placer les objets : c'est à l'utilisateur de construire le graphique, en s'appuyant par exemple sur un tableau de données. Une évaluation réalisée auprès de 8 sujets voyants et 4 sujets non-voyants a montré que le système permettait de réaliser des tâches d'exploration de graphes. Les auteurs ont aussi observé que les objets, malgré la grille, étaient régulièrement renversés.

Les TIMM (Trackable Interactive Multimodal Manipulatives) sont des objets interactifs, capables de fournir des feedbacks multimodaux (sons, vibrations), qui permettent à un DV d'afficher, créer et modifier des graphes et des diagrammes [21] (Figure 3.b). Lors de la construction, des instructions audio sont données par le système pour aider l'utilisateur à placer les objets, dont la position est détectée grâce à une caméra placée sous la table. L'utilisateur peut aussi déplacer ses doigts sur la table : dès qu'il touche un élément, un feedback est donné afin qu'il puisse placer un TIMM sur cet élément. Une fois que deux objets sont placés, l'utilisateur peut les relier grâce à un Wikki-Stick³ (un bout de corde qui adhère à la plupart des surfaces). Le graphe peut être édité en déplaçant un TIMM. D'autres techniques sont illustrées et brièvement décrites, mais il n'est pas expliqué comment l'utilisateur peut passer d'un mode à l'autre (édition, création, etc.).

Ducasse *et al.* [9] ont récemment conçu un prototype qui permet à un DV de (re-)construire une représentation graphique grâce à des objets appelés Tangible Reels (TReels), puis de l'explorer grâce à une technique

d'interaction gestuelle. Les TReels sont des objets stables et faciles à manipuler, utilisés pour matérialiser à la fois des points et des lignes, grâce à l'utilisation d'un cordon rétractable. Deux types de TReels existent : les Ventouses et les Poids (Figure 4.a). Un marqueur circulaire est placé sous les objets pour qu'ils puissent être identifiés par le système. Le cordon rétractable est contenu dans une bobine fixée sur les objets (cf. Figure 4.b). Un aimant attaché au bout de chaque cordon, et une chaîne métallique permettent de facilement connecter deux objets entre eux. Une première évaluation réalisée avec 4 DV a montré que les deux types d'objets étaient stables, même si les participants ont trouvé que les Poids étaient plus faciles à renverser accidentellement et que leur hauteur rendait plus difficile l'exploration de la carte.

Pour la construction, une technique de guidage en deux temps (Figure 4.b) permet à l'utilisateur de placer rapidement un nouveau TReel sur la table, ou de l'attacher à un TReel déjà placé, créant ainsi une ligne physique entre ces deux objets. Cette approche permet au système de savoir quels objets sont reliés entre eux mais aussi de connaître la position de la ligne afin de la rendre interactive. De plus, grâce à l'utilisation d'un cadre infrarouge, l'utilisateur peut cliquer sur un TReel ou sur une ligne pour écouter le nom de l'élément qu'ils représentent. Concernant le guidage, quand l'utilisateur est loin de la cible, la direction et la distance à la cible sont indiquées (par exemple, « en haut et à droite, 30 cm »). Ceci permet à l'utilisateur de se déplacer très rapidement vers la cible. Dès que l'objet se rapproche de celle-ci, seule la direction est donnée (haut, bas gauche ou droite), et à une fréquence plus importante.

Une deuxième évaluation réalisée auprès de 8 DV a montré que le système était utilisable et permettait la construction de cartes composées de 12 TReels, avec des lignes de différentes longueurs et directions, en moins de 5 minutes (Figure 4.c). La technique de guidage s'est avérée efficace et efficiente : 283 TReels sur 288 ont été correctement

³ www.wikvistix.com

placés, et le temps moyen passé pour attacher puis placer un TReel était de 24 secondes. Quant à la technique d'exploration, plusieurs utilisateurs ont trouvé que le geste de pointage était difficile à réaliser. Bien qu'ayant été évalués pour la reconstruction de cartes, le prototype peut être utilisé pour d'autres types de représentations (Figure 4.c).

Analyse

Dans cette section, nous caractérisons les prototypes décrits ci-dessus selon les cinq dimensions utilisées précédemment : interactivité, matérialité, information présentée, affichage dynamique et manipulation, coût. Ceci nous permet d'identifier les facteurs à prendre en compte lors de la conception de dispositifs tangibles pour les DV. La plupart des facteurs sont spécifiques aux DV (techniques de guidage, forme et stabilité des objets, bigraphisme, etc.). Nous indiquons aussi si les solutions proposées ont été évaluées.

Interactivité

Certains prototypes reposent sur des techniques d'interaction et des feedback non-visuels qui permettent à un DV de (re-)construire une représentation physique (carte ou graphe) en suivant des instructions de guidage, de l'explorer ou de la manipuler en vue d'en modifier son contenu numérique.

Techniques d'interaction :

- *Construction.* Pour construire des contenus tangibles, plusieurs techniques sont proposées. Dans TIMM, TPath et TReels, l'utilisateur pose un objet sur la surface, puis est guidé grâce à des instructions audio pour placer cet objet au bon endroit. Dans IT, l'utilisateur place le segment de route après le dernier placé, et des sons indiquent dans quel sens l'objet doit être orienté. CStraws ne fournit pas de technique de guidage. Dans TIMM, contrairement à TReels, la matérialisation des lignes n'est pas guidée par le système : c'est à l'utilisateur de savoir quels points doivent être reliés entre eux. Seule la technique de guidage en deux temps proposée dans TReels a été évaluée et s'est avérée efficace et efficiente.

- *Exploration.* Dans TPath et CStraws, l'utilisateur déplace un objet tangible (un avatar ou un *slider*) pour accéder aux informations. Dans TIMM, IT et TReels, l'exploration se fait en déplaçant son doigt sur la surface de travail. Le doigt est détecté par une caméra placée au-dessus de la surface (IT) ou en-dessous (TIMM) ou par un cadre infrarouge (TReels). Les auteurs de IT indiquent que l'utilisateur porte une bague colorée afin d'identifier le doigt. Dans TReels, l'information est donnée quand un geste particulier est réalisé par l'utilisateur. La manière dont l'utilisateur déclenche la lecture d'une information n'est pas précisée dans IT et TIMM.

- *Édition.* Les techniques d'édition ne sont pas détaillées dans les articles, excepté dans TIMM où les auteurs indiquent que dès qu'un objet associé à un élément

de la représentation est déplacé par l'utilisateur, le système identifie les changements et en informe l'utilisateur (par exemple : « pente négative »). La façon dont le système détermine les informations à donner (selon si c'est une fonction ou un diagramme) n'est pas expliquée.

Feedback :

Les feedbacks décrits dans les articles sont principalement utilisés lors de la construction et de l'exploration du contenu. Il peut s'agir d'instructions verbales, de notes de musique ou de sons 3D spatialisés. Une des quatre recommandations de McGookin *et al.* [22] est d'informer l'utilisateur dès qu'un objet n'est plus détecté par le système, par exemple quand il est posé dans une zone en dehors du champ de la caméra, ou qu'il est posé à l'envers (le marqueur ne faisant pas face à la caméra). Dans TReels, un feedback est donné si l'objet manipulé n'est pas détecté pendant plus de 2,5 secondes.

Matérialité

- *Figurés.* Dans les prototypes présentés, les objets représentent soit des points (points d'intérêt, points dans un repère 2D, nœud d'un graphe), soit des lignes (segments de routes, murs, segments de droites). Les lignes sont matérialisées par des objets de différentes tailles (IT), par des bouts de corde que l'utilisateur peut poser sur la surface (TIMM) ou par des cordons rétractables qui relient deux objets (TReels). Les aires ne sont pas matérialisées.

- *Stabilité.* La stabilité des objets a été identifiée comme un critère essentiel par McGookin *et al.* [22]. Dans leur prototype (CStraws), les objets sont lestés et placés sur une grille tactile. Dans IT, les objets sont reliés entre eux grâce à des aimants, mais il n'est pas indiqué comment l'ensemble de la structure est maintenue en place sur la surface. Dans TReels, les objets sont lestés ou maintenus par une ventouse : les deux solutions se sont avérées utilisables, mais la hauteur des Poids peut contraindre l'exploration. Bien qu'il soit essentiel d'assurer la stabilité des objets pour permettre l'exploration du contenu, cet aspect-là n'est pas mentionné dans les autres prototypes.

- *Forme.* Dans CStraws, il est indiqué que les objets doivent avoir une forme irrégulière pour permettre à l'utilisateur de comprendre dans quel sens ils doivent être posés. Dans IT, la forme des objets assure que l'utilisateur les manipule sans les occulter totalement. Ce facteur n'est pas mentionné dans les autres prototypes.

- *Couplage.* Dans tous les systèmes dont l'implémentation a été décrite, les objets utilisés pour matérialiser des figurés ponctuels sont détectés par le système, soit grâce à la détection d'un marqueur placé sous l'objet, soit grâce à un algorithme de détection de contours. Quant aux lignes, elles sont représentées dans IT par des objets de différentes longueurs, eux-aussi détectés par la caméra. Dans TIMM en revanche, l'utilisateur peut relier deux points entre eux grâce à une corde dont la présence et la position ne sont pas détectées par le système. Dans

TReels, la procédure de construction implique que l'utilisateur rapproche deux TReels l'un de l'autre avant de tracer la ligne, ce qui permet au système d'inférer la position de cette dernière. En revanche, si deux objets sont détachés par inadvertance, le couplage n'est plus garanti (l'utilisateur peut rattacher le cordon à un autre TReel).

- *Actuation*. Excepté dans TIMM, aucun des objets décrits n'est animé, i.e. ils ne fournissent pas de feedback et ne peuvent se déplacer. Les TIMM contiennent un moteur vibrant, un haut-parleur et un moteur permettant de faire tourner un bouton ; cependant, à notre connaissance, ces TIMM n'ont pas été implémentés.

Information représentée

- *Quantité*. La majorité des prototypes permettent de représenter une quantité assez limitée d'information. Dans IT, les itinéraires évalués se composent de cinq segments seulement ; dans CStraws, la grille se compose de 9*7 cases uniquement et seules deux séries de données peuvent être matérialisées pour les graphes et une seule pour les diagrammes en bâtons ; dans TIMM, tous les exemples illustrent l'utilisation de trois objets maximum. Dans TReels, la carte la plus complexe utilisée pour l'évaluation était composée de 12 objets et 8 lignes. Le problème de la quantité d'information pouvant être matérialisée dans une interface tangible a déjà été identifié [34].

- *Bigraphisme*. Les professionnels avec qui nous collaborons sont très attachés à la notion de bigraphisme. Il s'agit de veiller à ce que la représentation graphique soit accessible par un élève non-voyant (i.e. qu'elle soit tactile et/ou auditive), mais aussi par un élève voyant ou malvoyant (i.e. qu'elle soit visuelle, avec des couleurs contrastées). Cela permet d'encourager la collaboration entre les élèves, mais aussi d'habituer les élèves malvoyants qui vont peu à peu perdre la vue à interpréter des stimuli auditifs et tactiles. Cette notion est uniquement mentionnée dans TIMM, où les auteurs soutiennent qu'un TIMM « *maintains a visual component, to enable interaction between blind, visually impaired students and sighted students/instructors* ».

Affichage dynamique et manipulation

- *Division des fonctionnalités*. En s'appuyant sur Challis *et al.* [6], les auteurs de CStraws suggèrent de ne pas matérialiser toutes les données. Celles qui sont « fixes » doivent être matérialisées par des objets qui ne peuvent être déplacés ; celles qui sont manipulées par l'utilisateur doivent être matérialisées par des objets (*tokens*) ; et celles qui sont indirectement modifiées par l'utilisateur doivent être présentées via des sons ou un stimulus tactile. Ainsi, dans CStraws, le repère est matérialisé par une grille, les points d'inflexion de la fonction linéaire par les objets, et les valeurs des ordonnées par un son. Dans IT, l'ensemble de la carte peut être explorée par le toucher et des feedback audio, alors que l'itinéraire est lui matérialisé par des objets tangibles. Cette division des fonctionnalités n'est pas explicite dans les autres prototypes.

- *Facilité d'édition*. Tous les prototypes visent à permettre l'édition et la manipulation des données, mais les articles n'indiquent pas à quel point le contenu est dynamique et peut être modifié « à la volée ». Par exemple, dans TPath, les auteurs indiquent que l'utilisateur pourrait télécharger une carte en ligne, puis construire une partie de cette carte. Cependant, le temps nécessaire à la reconstruction de la carte ainsi que l'utilisabilité du système n'ont pas été évalués. Dans TReels, le temps nécessaire pour placer un objet (24 secondes en moyenne) et pour reconstruire une carte a été mesuré. La difficulté à mettre à jour une représentation tangible a déjà été identifiée comme une des limitations des interfaces tangibles. Shaer *et al.* [34] parlent d'un problème de *scalability* alors que Edge *et al.* [10] emploient le terme de *bulkiness*.

Coût

Le coût des prototypes dépend de leur implémentation. Pour la détection des objets, trois prototypes utilisent une caméra placée sous une table transparente pour détecter les marqueurs placés sur les objets (TIMM, CStraws, TReels). Les marqueurs sont issus de bibliothèques standard (ReacTIVision [19], ARToolkit [20], TopCodes [17]). Dans IT, une caméra placée au-dessus de la surface de travail est utilisée pour détecter le contour des objets (ce qui peut poser des problèmes d'occlusion lors de la manipulation). Pour l'interaction tactile, TIMM utilise une bibliothèque permettant de détecter les appuis tactiles sur une surface (CCV) mais qui ne permet pas de distinguer chaque doigt ; IT utilise la détection d'une bague colorée portée par l'utilisateur ; TReels utilise un cadre infrarouge. Excepté les objets de TIMM qui peuvent être animés, les objets utilisés ne requièrent pas de matériel coûteux. Dans l'ensemble, les dispositifs sont donc très abordables, même si l'utilisation d'un cadre infrarouge dans TReels rend le système plus coûteux.

Synthèse

Cette analyse met en évidence les facteurs à prendre en compte lors de la conception d'une interface tangible pour les DV, mais permet aussi d'identifier des problèmes récurrents.

Concernant l'interactivité des dispositifs, différentes techniques d'interaction ont été proposées. La technique de guidage proposée dans IT s'applique à un cas particulier (construction d'itinéraires où chaque nouveau segment de route se place à la suite du précédent) et semble difficilement généralisable pour la construction de contenus plus complexes. Pour les contenus plus complexes, TReels propose une technique de guidage en deux temps qui permet à l'utilisateur de rapidement positionner un objet. Plusieurs techniques d'exploration ont été proposées et seulement deux ont été évaluées : l'utilisation d'un *slider* dans CStraws semble difficilement utilisable pour l'exploration de cartes par exemple, alors que l'utilisation d'un cadre infrarouge dans TReels soulève quelques problèmes d'utilisabilité.

Il faut aussi veiller à ce que les objets soient très stables afin qu'il n'y ait pas d'incohérence entre la représentation numérique et la représentation tangible. Pour cela, trois solutions ont été proposées : l'utilisation d'une grille tangible pour maintenir des objets, des objets lestés, et des ventouses. La première solution ne s'est pas avérée entièrement fonctionnelle, alors que la stabilité des objets lestés et des ventouses a été démontrée. La forme des objets doit aussi être prise en compte. McGookin *et al.* [22] suggèrent par exemple qu'elle soit irrégulière de façon à détecter l'identité mais aussi l'orientation de chaque objet. De plus, il est souhaitable que chaque objet soit couplé définitivement à une information numérique, afin d'éviter des incohérences. Pour rendre les lignes interactives, TReels repose sur l'utilisation de cordons rétractables, qui permettent au système de savoir si une ligne a été tracée, et si oui, de déterminer sa position. Pour matérialiser les lignes, l'utilisation d'objets de différentes longueurs s'est avérée efficace pour la construction d'un itinéraire, mais pourrait s'avérer fastidieuse pour la construction de contenus plus complexes. Quant à l'utilisation de bouts de corde, elle ne permet pas de garantir un couplage entre ces objets et le contenu numérique.

Concernant la quantité d'information présentée, elle est pour l'instant assez limitée, allant de trois éléments pour les TIMM à douze pour les TReels. Les dispositifs ont cependant été conçus pour représenter des graphes ou des cartes. Les auteurs de TIMM souhaitaient aussi généraliser l'usage du prototype à des graphes autres que mathématiques (diagrammes UML, molécules, etc.) Par ailleurs, aucune interface ne permet de créer une représentation réellement bigraphique (à la fois visuelle et tactile).

Enfin, bien que chaque prototype ait pour but la manipulation de données, les fonctionnalités étudiées étaient davantage des fonctionnalités de construction et d'exploration que d'édition ou de manipulation, et il n'est pas expliqué comment l'utilisateur peut rapidement modifier le contenu, par exemple lorsque toutes les valeurs d'un graphe sont changées ou lorsqu'une carte est déplacée, ou sélectionner un nouveau contenu à afficher. Seul CStraws exploite le principe de division des fonctionnalités, en combinant une grille fixe et des éléments qui peuvent être manipulés (*tokens*).

Il faut aussi noter que bien que trois des cinq prototypes aient été spécifiquement conçus pour être utilisés dans le cadre d'activités pédagogiques, et plus particulièrement pour les leçons d'orientation et mobilité et de mathématiques (TIMM, TPath et IT), aucun n'a été évalué *in situ*. Par ailleurs, les prototypes étudiés ne proposent pas de fonctionnalités qui permettraient aux utilisateurs de choisir le contenu à afficher, ce qui limite leur autonomie. Enfin, seuls les auteurs de TIMM suggèrent une utilisation collaborative de leur dispositif (plusieurs élèves non-

voyants et éventuellement un professeur voyant), à distance ou non.

Enfin, l'utilisation d'objets animés (*actuated*) est uniquement mentionnée par les auteurs de TIMM. Cependant, la littérature sur les *shape-changing interfaces* ouvre de nombreuses perspectives concernant l'utilisation d'objets animés (changement de forme [12], de hauteur [15], etc.). Il serait intéressant de voir comment de tels objets pourraient être intégrés dans une interface tangible pour les DV, par exemple pour rendre son contenu plus dynamique.

DISCUSSION

En nous appuyant sur une analyse de la littérature, nous avons identifié plusieurs facteurs à prendre en compte lors de la conception d'interfaces tangibles spatiales pour les DV. Bien que ces facteurs permettent de guider la conception, nous ne garantissons pas que la liste soit exhaustive. Il est évident qu'en fonction du contexte d'utilisation, des utilisateurs (élèves ou professionnels, non-voyants ou malvoyants) et des tâches demandées, de nouveaux facteurs puissent être identifiés.

Parmi les facteurs identifiés, quatre sont issus des recommandations proposées par McGookin *et al.* [22]: division des fonctionnalités, forme des objets, stabilité des objets, feedback lorsqu'un objet n'est plus détecté. Notre analyse reprend et complète ces recommandations.

Pour répondre aux problèmes soulevés par la prise en compte de ces facteurs lors de la conception du système, nous avons listé les différentes solutions existantes. Lorsque ces solutions ont fait l'objet d'une évaluation formelle auprès d'utilisateurs non-voyants, nous avons rapporté les résultats (stabilité des TReels, matérialisation des lignes, techniques de guidage et d'exploration, etc.) Cependant, peu de prototypes ont été formellement évalués. Aussi, nous avons présenté des solutions conçues pour des DV uniquement, bien que d'autres travaux issus de la littérature sur les interfaces tangibles présentent un intérêt certain. Par exemple, l'utilisation de lignes tangibles (pour représenter ou agir sur des données) a été proposée dans plusieurs projets [7,33]. Cependant, ces solutions nécessitent d'être adaptées afin qu'elles puissent être utilisées par des DV pour la reconstruction de contenus spatiaux.

Enfin, certaines problématiques importantes demeurent : comment rendre tangible des aires et des courbes ? Comment permettre à l'utilisateur de facilement enlever/rajouter des *tokens* en fonction des informations à afficher ? Comment augmenter la quantité d'information affichée ?

CONCLUSION

Différentes techniques existent pour rendre les représentations spatiales accessibles aux déficients visuels. Parmi les dispositifs interactifs, les interfaces tangibles présentent un intérêt certain, aussi bien en raison de leur matérialité que de leur prix et de leur capacité à être

reconfigurées par l'utilisateur ou le système. Cependant, la conception d'interfaces tangibles pour les DV doit prendre en compte plusieurs facteurs que nous avons identifiés grâce à une analyse de cinq prototypes, et qui s'articulent autour de cinq dimensions : interactivité, matérialité, information représentée, affichage dynamique et manipulation, coût. La prise en compte de ces facteurs peut s'avérer difficile, et c'est pourquoi nous avons présenté puis comparé des solutions qui ont été conçues pour des interfaces tangibles pour des DV. Nous souhaitons ainsi faciliter le développement de nouvelles interfaces tangibles et spatiales pour les DV.

BIBLIOGRAPHIE

1. Sandra Bardot, Marcos Serrano, and Christophe Jouffrais. 2016. From Tactile to Virtual: Using a Smartwatch to Improve Spatial Map Exploration for Visually Impaired Users. *International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI 2016)*.
2. Anke M Brock. 2013. Interactive maps for visually impaired people: design, usability and spatial cognition.
3. 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.
4. Lorna M Brown and Stephen A Brewster. 2003. Drawing by ear: Interpreting sonified line graphs. *Proceedings of the 9th International Conference on Auditory Display (ICAD), Boston, MA*.
5. Emeline Brule, Gilles Bailly, Anke Brock, Frédéric Valentin, Grégoire Denis, and Christophe Jouffrais. 2016. MapSense: Multi-Sensory Interactive Maps for Children Living with Visual Impairments. *International Conference for Human-Computer Interaction (CHI 2016)*, ACM, 445–457.
6. Ben P Challis and Alistair D N Edwards. 2001. Haptic Human-Computer Interaction: First International Workshop Glasgow, UK, August 31 -- September 1, 2000 Proceedings. In Stephen Brewster and Roderick Murray-Smith (eds.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 17–24. http://doi.org/10.1007/3-540-44589-7_2
7. Nadine Couture, Guillaume Rivière, and Patrick Reuter. 2008. GeoTUI: a tangible user interface for geoscience. *Proceedings of the 2nd international conference on Tangible and embedded interaction*, 89–96.
8. J Ducasse, M Macé, and C Jouffrais. 2015. From Open Geographical Data To Tangible Maps: Improving the Accessibility of Maps for Visually Impaired People. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL*, 3: 517–523. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchive-s-XL-3-W3-517-2015>
9. Julie Ducasse, Marc J-M Macé, Marcos Serrano, and Christophe Jouffrais. 2016. Tangible Reels : construction and exploration of tangible maps by visually impaired users. *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '16*, ACM Press, 2186–2197. <http://doi.org/10.1145/2858036.2858058>
10. Darren Edge and Alan Blackwell. 2006. Correlates of the cognitive dimensions for tangible user interface. *Journal of Visual Languages & Computing* 17, 4: 366–394. <http://doi.org/10.1016/j.jvlc.2006.04.005>
11. G.W. Fitzmaurice. 1996. Graspable User Interfaces.
12. Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, Akimitsu Hogge, and Hiroshi Ishii. 2013. inFORM: dynamic physical affordances and constraints through shape and object actuation. *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology - UIST '13*, ACM Press, 417–426. <http://doi.org/10.1145/2501988.2502032>
13. 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. *Proceedings of the 14th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility - ASSETS '12*, ACM Press, 103. Retrieved October 31, 2013 from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2384916.2384935>
14. Timo Götzelmann and Aleksander Pavkovic. 2014. Towards automatically generated tactile detail maps by 3D Printers for Blind Persons. *Proceedings of ICCHP 2014, LNCS Vol 8548*, 1–7.
15. John Hardy, Christian Weichel, Faisal Taher, John Vidler, and Jason Alexander. 2015. ShapeClip : Towards Rapid Prototyping with Shape- Changing Displays for Designers. 19–28.
16. Lars Erik Holmquist, Johan Redström, and Peter Ljungstrand. 1999. Handheld and Ubiquitous Computing: First International Symposium, HUC'99 Karlsruhe, Germany, September 27--29, 1999 Proceedings. In Hans-W. Gellersen (ed.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 234–245. http://doi.org/10.1007/3-540-48157-5_22
17. M. T Horn. TopCode: Tangible Object Placement Codes. Retrieved from <http://hci.cs.tufts.edu/topcodes/>
18. R.D. Jacobson. 1998. Navigating maps with little or no sight: An audio-tactile approach. *Proceedings of*

- Content Visualization and Intermedia Representations*, 95–102. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.21.2860>
19. Martin Kaltenbrunner and Ross Bencina. 2007. reactIVision: a computer-vision framework for table-based tangible interaction. *Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction - TEI '07*, ACM Press, 69. <http://doi.org/10.1145/1226969.1226983>
 20. H. Kato and M. Billinghurst. Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system. *Proceedings 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality (IWAR'99)*, IEEE Comput. Soc, 85–94. <http://doi.org/10.1109/IWAR.1999.803809>
 21. Muhanad S Manshad, Enrico Pontelli, and Shakir J. Manshad. 2012. Trackable Interactive Multimodal Manipulatives: Towards a Tangible User Environment for the Blind. *ICCHP 2012*, Springer Berlin Heidelberg, 664–671. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-14097-6>
 22. David McGookin, Euan Robertson, and Stephen Brewster. 2010. Clutching at Straws: Using Tangible Interaction to Provide Non-Visual Access to Graphs. *Proceedings of the 28th international conference on Human factors in computing systems - CHI '10*, ACM Press, 1715–1724. <http://doi.org/10.1145/1753326.1753583>
 23. Andrew P. Milne, Alissa N. Antle, and Bernhard E. Riecke. 2011. Tangible and body-based interaction with auditory maps. *CHI EA '11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, ACM Press, 2329. <http://doi.org/10.1145/1979742.1979874>
 24. National Federation of the Blind. 2009. *The Braille Literacy Crisis in America: Facing the Truth, Reversing the Trend, Empowering the Blind*.
 25. Don Parkes. 1988. “NOMAD”: An audio-tactile tool for the acquisition, use and management of spatially distributed information by partially sighted and blind persons. *Proceedings of Second International Conference on Maps and Graphics for Visually Disabled People*, 24–29.
 26. Romedi Passini and Guyltne Proulx. 1988. Wayfinding without vision: An experiment with congenitally, totally blind people. *Environment And Behavior* 20, 2: 227–252. <http://doi.org/10.1177/0013916588202006>
 27. 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. <http://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2013.12.008>
 28. 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* (LNCS), Ian Oakley and Stephen Brewster (eds.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 86–97. <http://doi.org/10.1007/978-3-540-76702-2>
 29. Benjamin Poppinga, Charlotte Magnusson, Martin Pielot, and Kirsten Rassmus-Gröhn. 2011. TouchOver map: Audio-Tactile Exploration of Interactive Maps. *Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services - MobileHCI '11*, ACM Press, 545–550. <http://doi.org/10.1145/2037373.2037458>
 30. Hayes Solos Raffle, Amanda J. Parkes, and Hiroshi Ishii. 2004. Topobo: a constructive assembly system with kinetic memory. *Proceedings of the 2004 conference on Human factors in computing systems - CHI '04*, ACM Press, 647–654. <http://doi.org/10.1145/985692.985774>
 31. Marie-Sylvie Sander, Marie-christine Bournot, Françoise Lelièvre, and Anne Tallec. 2005. Les personnes ayant un handicap visuel - Les apports de l'enquête Handicaps - Incapacités - Dépendance. *Études et Résultats*, 416: 12.
 32. Jochen Schneider and Thomas Strothotte. 2000. Constructive exploration of spatial information by blind users. *Proceedings of the fourth international ACM conference on Assistive technologies - Assets '00*, ACM Press, 188–192. <http://doi.org/10.1145/354324.354375>
 33. Philipp Schoessler and Sang-won Leigh. 2015. Cord UIs: Controlling Devices with Augmented Cables. *TEI '15*: 395–398. Retrieved February 18, 2015 from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2680601>
 34. Orit Shaer and E Hornecker. 2009. Tangible User Interfaces: Past, Present, and Future Directions. *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction* 3, 1-2: 1–137. <http://doi.org/10.1561/11000000026>
 35. Ehud Sharlin, Benjamin Watson, Yoshifumi Kitamura, et al. 2004. The Tangible Pathfinder Design of a Wayfinding Trainer for the Visually Impaired. *Proc. Graphics Interface*: 2–3.
 36. 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. *COSIT 2009, LNCS 5756*, Springer-Verlag, 212–226. http://doi.org/10.1007/978-3-642-03832-7_13
37. Fernando Vidal-Verdú and Moustapha Hafez. 2007. Graphical Tactile Displays for Visually-Impaired People. *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on* 15, 1: 119–130.
 38. T. Völkel, G. Weber, and U Baumann. 2008. Tactile graphics revised: the novel brailledis 9000 pin-matrix device with multitouch input. *Springer Berlin Heidelberg*: pp. 835–842.
 39. Wai Yu and Stephen Brewster. 2003. Evaluation of multimodal graphs for blind people. *Universal Access in the Information Society* 2, 2: 105–124. <http://doi.org/10.1007/s10209-002-0042-6>
 40. Limin Zeng and Gerhard Weber. 2012. ATMap: Annotated Tactile Maps for the Visually Impaired. *COST 2102 International Training School, Cognitive Behavioural Systems, LNCS Volume 7403, 2012*, Springer Berlin Heidelberg, 290–298. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-34584-5>