

# Les nouvelles technologies pour les apprentissages spatiaux chez les personnes déficientes visuelles

M. J.-M. Macé<sup>1,2</sup>, S. Bardot<sup>1,2</sup>, A. Brock<sup>3</sup>, E. Brulé<sup>4</sup>, J. Ducasse<sup>1,2</sup>, S. Giraud<sup>5</sup>, B. Oriola<sup>1,2</sup>, M. Serrano<sup>1,2</sup>, G. Denis<sup>6</sup>, C. Jouffrais<sup>1,2,7,CA</sup>

<sup>1</sup>: CNRS, IRIT, UMR5505, Toulouse, France

<sup>2</sup>: Université de Toulouse 3, IRIT, UMR5505, Toulouse, France

<sup>3</sup>: ENAC- University Toulouse, Toulouse, France

<sup>4</sup>: Télécom ParisTech, CNRS i3, Université Paris-Saclay, Paris, France

<sup>5</sup>: INRIA, Bordeaux, France

<sup>6</sup>: CEDV-IJA, Toulouse, France

<sup>7</sup>: CNRS, IPAL, UMI2955, Singapour, Singapour

Corresponding Author: C. Jouffrais, IRIT, Université P. Sabatier,  
118 route de Narbonne, 31062 Toulouse cedex 9  
[Christophe.Jouffrais@irit.fr](mailto:Christophe.Jouffrais@irit.fr)

## Résumé

Les évolutions rapides des technologies de l'information et de la communication (smartphones, tablettes, imprimantes 3D, microcontrôleurs, données librement partagées, etc.) représentent une opportunité pour améliorer les conditions d'apprentissage des personnes déficientes visuelles. En s'appuyant sur ces innovations, il est possible de proposer des dispositifs adaptés qui permettent de répondre aux besoins des professionnels de la déficience visuelle et de leurs élèves déficients visuels.

## Mots-clefs

Interaction homme-machine, Technologie d'assistance, non-voyant, cognition spatiale, apprentissage, éducation, interaction tangible, interaction multimodale,

## Introduction

Selon les estimations, 253 millions de personnes présentent une déficience visuelle: 36 millions d'entre elles sont aveugles et 217 millions ont une déficience visuelle modérée à sévère (Bourne et al., 2017). En France, ils sont 1,7 million à être affectés d'une déficience visuelle, dont 932000 malvoyants moyens (avec beaucoup de difficultés ou une incapacité totale à lire, écrire ou dessiner) et 270 000 malvoyants profonds et aveugles. Les enseignements spécialisés pour les personnes déficientes visuelles, notamment quand ils portent sur des contenus graphiques (plans, cartes, schémas, graphes mathématiques, etc.) reposent sur des techniques d'illustration contenant du relief. Ces documents en relief sont principalement réalisés par des centres spécialisés en déficience visuelle, et sont généralement réalisés au coup par coup, en fonction des besoins de l'enseignant et de l'élève. Par exemple, pour les besoins d'un Centre d'Éducation Spécialisé pour personnes Déficiantes Visuelles, comme le CESDV-IJA de Toulouse, quatre adaptateurs en documents à temps plein réalisent environ 1200 documents en relief (DER, Figure 1) par an pour les enseignants (mathématiques, géographie, etc.) Plusieurs techniques coexistent, qui consistent à gonfler certaines parties d'un papier spécial, déformer une feuille de plastique, embosser une feuille de papier, coller des bouts de matériaux sur une feuille, etc. Ces techniques sont «artisanales» et ne permettent pas la réutilisation des cartes déjà réalisées. De plus, la quantité d'informations présentes sur un document en relief est extrêmement limitée (4 à 7 figurés maximum). Ils contiennent peu de détails et peu de légendes Braille car elles sont trop encombrantes. Lorsque les détails sont nombreux ou complexes, il est préférable de répartir les informations sur plusieurs documents. Evidemment, le manque de diffusion et d'accessibilité de ces documents en relief a un impact sur l'éducation, l'autonomie, et la qualité de vie des personnes déficientes visuelles. Au-delà de l'impact sur la vie quotidienne, ce manque de confrontation à des représentations graphiques peut aussi porter atteinte à la capacité à conceptualiser et à apprendre à partir de données spatiales ou quantitatives, ce qui peut avoir des conséquences importantes sur la vie professionnelle et contribuer à des niveaux élevés de sous-emploi et de chômage.



Figure 1 : A gauche : Matrice réalisé pour le thermoformage d'une carte de France. Centre : Carte thermoformée. Droite : Graphique et carte de France réalisés sur papier thermogonflable.

La conception de systèmes informatiques améliorant l'accessibilité des données graphiques permettrait d'améliorer la situation. En effet, aujourd'hui, une quantité de plus en plus importante de données numériques, notamment graphiques, sont disponibles en ligne gratuitement, grâce à des projets collaboratifs mondiaux comme Wikipedia et OpenStreetMap par exemple, ou grâce à des institutions (universités, municipalités, gouvernements, ...) qui diffusent ces données. Elles peuvent être récupérées sur des terminaux comme des ordinateurs personnels, des tablettes ou des

smartphones de plus en plus utilisés par les personnes déficientes visuelles. Le défi concernant l'exploration non-visuelle de ces données repose sur des applications logicielles conçues avec et pour les personnes déficientes visuelles et reposant sur des techniques d'interaction non-visuelles.

Très récemment, Ducasse et collaborateurs (2018) ont dressé un panorama des systèmes interactifs permettant à des personnes déficientes visuelles de parcourir des données numériques graphiques. Ils ont notamment proposé une classification en deux grandes familles de dispositifs appelés hybrides (quand il existe à la fois un support physique et des interactions numériques) ou numériques (sans support physique). Les graphiques purement numériques peuvent être affichés sur un écran plat ou projetés sur une surface. L'avantage des graphiques numériques repose sur le fait qu'ils peuvent être facilement rafraîchis. Cependant leur exploration est en général limitée à un seul point de contact, comme un doigt ou un curseur virtuel, qui déclenche des interactions auditives ou tactiles. Cette limitation rend l'exploration très séquentielle (c'est-à-dire que l'utilisateur ne peut percevoir les informations que l'une après l'autre) et pose la question des processus perceptifs et cognitifs mis en jeu.

Dans la famille des graphiques hybrides, il existe plusieurs types de dispositifs. Les graphiques interactifs en relief sont le type le plus commun de cartes hybrides. Ils consistent à placer un document en relief sur une table tactile qui déclenche des informations vocales ou sonores. Grâce à ce dispositif, les utilisateurs peuvent interagir avec leurs deux mains, ce qui rend l'exploration moins séquentielle et moins exigeante sur le plan cognitif. Cependant, leur contenu ne peut pas être facilement mis à jour en raison de la présence du document en relief sur la table tactile. Il existe un deuxième type de dispositif hybride qui repose sur un affichage en relief dynamique (écran à changement de forme), dont la configuration change en fonction de l'information à afficher (Swaminathan et al., 2016; Zeng, Miao, & Weber, 2014). Le développement de telles interfaces ouvre de nouvelles voies pour la conception de cartes interactives accessibles, cependant ces dispositifs sont aujourd'hui trop chers ou trop lents pour être utilisables (voir Ducasse et al., 2018).

Dans ce chapitre, nous récapitulons plusieurs années de recherche effectuées dans notre équipe sur cette problématique et nous présentons plusieurs dispositifs interactifs permettant à des personnes déficientes visuelles d'explorer des données graphiques. Nous suivons la nomenclature proposée par Ducasse et collaborateurs (2018). Le premier travail avait pour objectif de faciliter l'exploration bimanuelle de cartes purement numériques. Les deux dispositifs suivants appartiennent à la famille des dispositifs hybrides, dans lequel le support physique facilite l'exploration tactile, et est augmenté par des informations sonores ou verbales. Le dernier projet fait état de travaux concernant la conception d'objets interactifs (indépendamment des graphiques) pour répondre aux besoins des enseignants spécialisés.

## Les graphiques numériques : une solution versatile et bientôt utilisable

Les personnes déficientes visuelles parcourent les documents en relief avec les deux mains, et le plus souvent avec plusieurs doigts de chaque main. La perception haptique (qui combine le traitement d'informations tactiles, proprioceptives et kinesthésiques) repose sur des processus perceptifs et

cognitifs qui permettent de comprendre le document (Jacobson, 1992, 1998; Morash, Connell Pinsky, Alfaro, & McKerracher, 2012). Les recherches montrent que la reconnaissance tactile de dessins en relief est possible et dépend du statut et des compétences du sujet (Hatwell, 2003; Heller, 2002; S Lebaz, Picard, & Jouffrais, 2010; Samuel Lebaz, Jouffrais, & Picard, 2012). Cependant, ces études s'appuyaient principalement sur les taux d'identification des images, et n'ont pas porté sur les mouvements de la main réalisés pendant l'exploration. Il est pourtant nécessaire de comprendre les différentes stratégies d'exploration mises en œuvre par ces différents sujets dans le but de concevoir des techniques d'interaction qui permettent de parcourir des graphiques numériques, sans aucun support en relief pour guider l'exploration. Il paraît aussi évident que les stratégies mises en œuvre vont dépendre du type de graphique exploré (par exemple, un graphique mathématique ou une carte).

### Les stratégies d'exploration des documents en relief

Bardot, Oriola, Serrano et Jouffrais (2017) ont mené une étude préliminaire auprès de six personnes déficientes visuelles et six personnes voyantes avec les yeux bandés. Cette étude portait sur l'exploration de cinq types de graphiques différents (dessins, dessins en perspectives, graphes mathématiques, cartes géographiques et plans) afin de mettre en évidence les différentes stratégies d'exploration utilisées par les deux groupes (Figure 2). Les sujets devaient explorer ces différents types de graphiques et répondre à une question concernant le graphique exploré. Les résultats montrent tout d'abord des différences significatives dans le pourcentage de bonnes réponses aux questions: les personnes déficientes visuelles ont un pourcentage plus élevé avec les cartes géographiques et les plans tandis que les personnes avec les yeux bandés ont de meilleurs résultats avec les dessins. Les résultats montrent aussi des différences dans l'utilisation des deux mains: les personnes déficientes visuelles ont plutôt utilisé leur main gauche tandis que les personnes aux yeux bandés ont plutôt utilisé leur main droite ; ce qui s'explique probablement par le fait que les personnes déficientes visuelles, bien que majoritairement droitrières, utilisent leur main gauche pour lire le Braille. Enfin, ces résultats préliminaires tendent à montrer que les stratégies mises en œuvre dépendent du type de dessin et du groupe d'utilisateurs. Une étude plus approfondie permettrait de caractériser précisément les stratégies utilisées pour les différents types de dessin et les ses différents types d'utilisateurs.

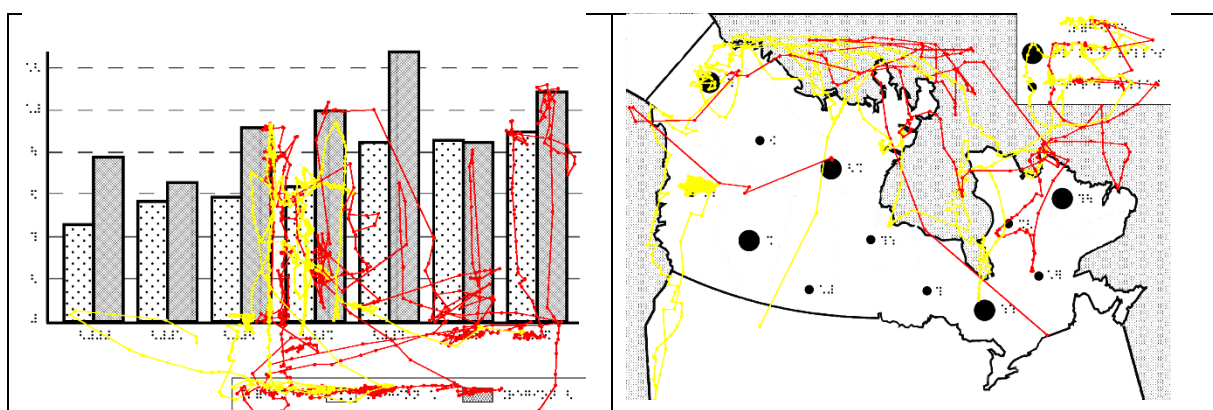


Figure 2. Parcours des index droit (rouge) et gauche (jaune) lors de l'exploration d'un histogramme (gauche) et d'une carte géographique (droite) avec les deux mains.

### Cartes virtuelles basées sur un dispositif personnel porté

Comme nous l'avons dit, une alternative intéressante à l'utilisation de documents en reliefs repose sur l'utilisation des contenus numériques disponibles et libres d'accès. Cependant, cela implique de

concevoir des techniques d'interaction non-visuelles qui permettent d'explorer ces graphiques numériques sans vision (Poppinga, Magnusson, Pielot, & Rasmus-Gröhn, 2011). Il est intéressant de noter que les personnes déficientes visuelles utilisent de plus en plus les dispositifs mobiles (smartphones et smartwatches par ex), sur lesquels ils configurent de nombreuses applications de façon spécifique et adaptée à leurs besoins (lecteurs d'écran, moteur TTS, application d'assistance à la mobilité, etc.) En se basant sur ce constat, nous avons fait l'hypothèse que la smartwatch serait une solution adaptée comme moyen d'interaction avec les graphiques numériques. En effet, la smartwatch laisse les deux mains libres pour explorer un graphique numérique et permet d'envoyer à l'utilisateur des feedback localisés, c'est-à-dire dépendants de la position de la main dans le graphique numérique. Ces feedback peuvent être sonores et vocaux, ainsi que sous la forme de vibration au poignet.

Bardot, Serrano et Jouffrais (2016) ont conçu quatre techniques d'interaction non-visuelle pour accéder à des contenus numériques avec une montre connectée. La montre était utilisée pour l'interaction en entrée (gestes réalisés sur l'écran) mais également en sortie (retours auditifs et vibratoires localisés). Dans ces techniques, le doigt sert de curseur virtuel pour explorer une carte virtuelle. Sa position sur la carte virtuelle est estimée grâce à un système de capture de mouvement (caméra au-dessus de l'espace de travail par ex). Le doigt déclenche des vibrations et des descriptions vocales (Figure 3) lorsqu'il rencontre des éléments du graphique numérique. Les quatre techniques conçues dans cette étude permettaient de varier la façon de présenter les informations disponibles sur la carte, en incluant notamment un filtre spatial ou catégoriel. Les résultats obtenus auprès de douze personnes déficientes visuelles montrent que ces techniques sont utilisables pour explorer des cartes virtuelles et que les fonctions de filtrage permettent d'en améliorer nettement l'utilisabilité (Figure 3, adaptée de Bardot et al. 2016).

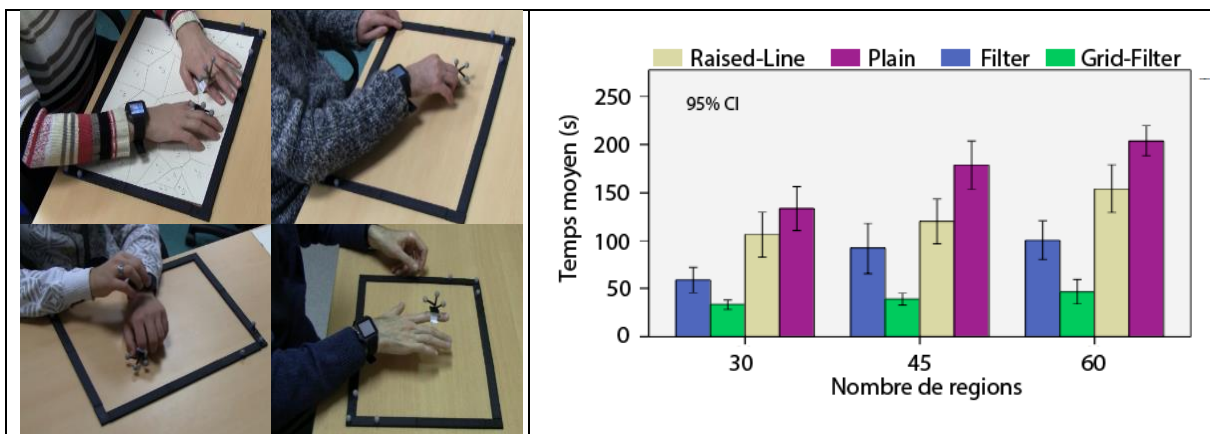


Figure 3 : Gauche : Utilisateurs explorant la carte suivant les 4 techniques d'interaction, Droite : Temps moyen pour effectuer la tâche. Photo adapté et repris de Bardot, Serrano et Jouffrais (2016)

Ce système comporte néanmoins trois contraintes : 1) les contenus doivent être adaptés de façon dynamique avant d'être explorés. Cela implique de connaître les règles d'adaptation et de les appliquer à la volée ; 2) il doit exister un système de capture de la position de la main qui soit suffisamment précis (de l'ordre de 0,5 cm) ; et 3) dans l'implémentation réalisée dans cette étude, l'exploration était limitée à un seul doigt (un seul point de contact). Une exploration avec plusieurs points de contacts permettrait l'usage des deux mains et la mise en place des stratégies d'exploration plus efficaces (Simonnet, Jacobson, Vieilledent, & Tisseau, 2009). Il est intéressant de noter que de nouveaux dispositifs de capture de la position des dix doigts sont arrivés sur le marché récemment (Kinect,

XperiaTouch, etc.) Ceux-ci peuvent être utilisés conjointement avec la montre, ce qui libère deux contraintes : la capture de la position des doigts et l'utilisation de deux mains pour explorer le graphique numérique (Figure 4). Dans le cas où les algorithmes d'adaptation existent (ref), un tel dispositif serait utilisable dans de nombreux contextes comme l'école, le travail ou à la maison.

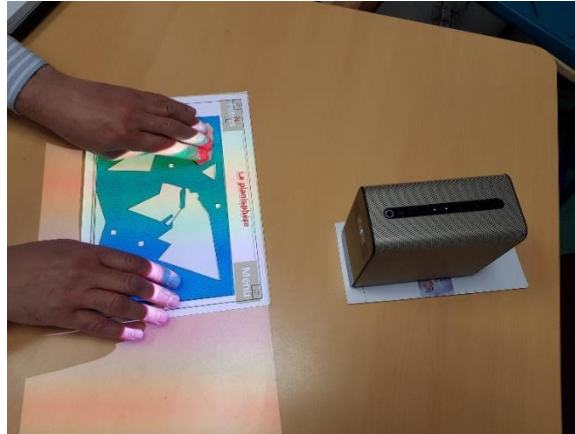


Figure 4 : Document en relief augmenté avec des informations sonores ou vibratoires fournies par une smartwatch (masquée sur la photo). La capture de la position des doigts est réalisée par le dispositif Xperia Touch de Sony.

## Les graphiques en relief interactifs : une solution déjà utilisable

Parkes (1988) avait imaginé un dispositif constitué d'une table tactile sur laquelle reposerait un document en relief ; ce qui permet d'ajouter des descriptions sonores aux éléments tactiles figurant sur le document. Aujourd'hui ce dispositif commence à être utilisé dans les centres spécialisés. L'utilisateur peut explorer le document en relief et le dispositif réagit au clic ou au double-clic sur un point d'intérêt en délivrant les indications sonores adéquates. Une étude réalisée par Brock et collaborateurs (2014) a permis de faire la preuve de l'utilisabilité de ce type de dispositif chez les personnes déficientes visuelles, notamment dans le cadre des apprentissages spatiaux. Plus récemment, Brulé et collaborateurs (2016) ont réalisé un dispositif de carte interactive multi-sensorielle basé sur ce même principe (Figure 5). Une zone réservée sur le côté de l'écran permet de proposer un menu de commande accessible, et donc de choisir le type d'informations affiché sur la carte, le type de description, la verbosité, etc. L'avantage de ce dispositif est qu'il permet de réaliser des cartes complexes, sur lesquelles un même point peut-être décrit de façons multiples. Sur un planisphère, par exemple, le menu permet de choisir entre explorer les océans, les continents, ou encore les différents climats. De plus, il est possible d'y ajouter des fonctions spéciales comme un mode de guidage pour localiser des informations spécifiques, un mode de calcul d'itinéraire entre deux points, etc. Finalement, on peut aussi connecter le dispositif au réseau et donc y rapatrier tout type de données (événement en cours, horaires d'ouverture, etc.)

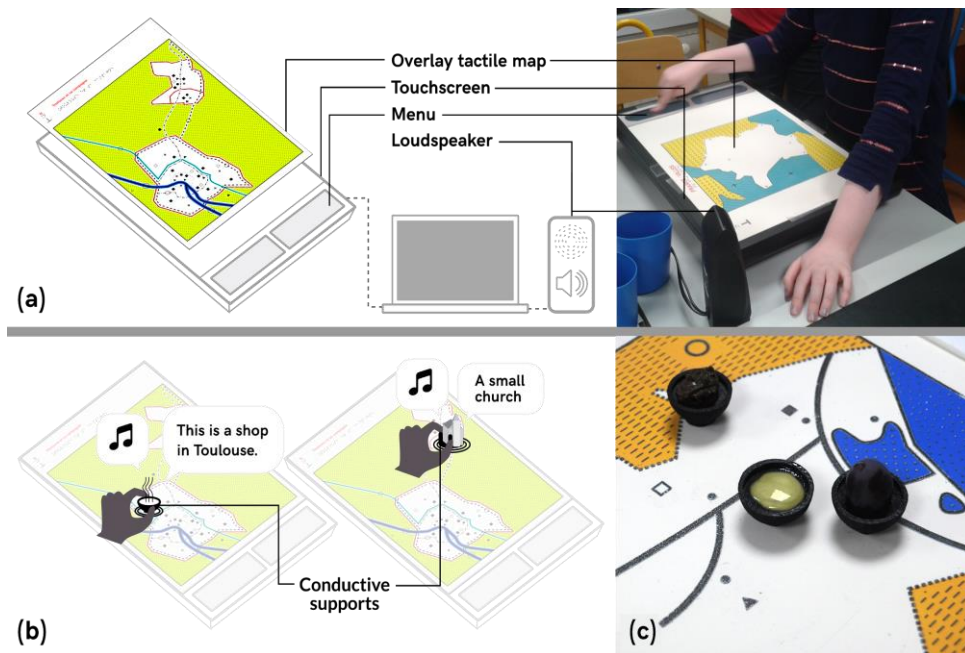


Figure 5. (a) Schéma du dispositif de carte tactile interactive multi-sensorielle, composée d'une carte en relief posée sur un écran tactile; (b) Illustration de l'utilisation d'objets sur le dispositif; (c) photo des supports tactiles contenant de la nourriture ou des composants olfactifs.

Dans leurs travaux, Brulé et collaborateurs (2016) ont même ajouté des interactions tangibles, olfactives et gustatives sur ce dispositif. Après quelques mois d'utilisation, les auteurs ont pu mettre en évidence l'intérêt d'élèves de primaire envers l'utilisation d'indices sonores non-verbaux, qu'ils enregistrent parfois eux-mêmes (Brulé & Bailly, 2018; Brulé, Bailly, & Gentes, 2015). Tout comme le fait de faire appel à l'olfaction et au goût, les indices non-verbaux permettent d'ancrer le cours de géographie dans l'expérience vécue ainsi que de le rendre plus ludique. Le dispositif a présenté d'autres avantages : lorsqu'il est utilisé dans une classe avec un élève déficient visuel en inclusion, il permet une exploration autonome ou collaborative des cartes et, d'après les professeurs spécialisés, de valoriser l'enfant en inclusion auprès de ses pairs. Ce dispositif est aujourd'hui utilisé par des enseignants spécialisés en histoire, géographie, anglais, mathématiques, etc. ainsi que par les instructeurs en locomotion dans un centre d'éducation spécialisée (CESDV-IJA, de Toulouse).

### Graphiques en relief interactifs avec bi-graphisme

Il est important de rappeler que les personnes déficientes visuelles non aveugles ont, par définition, des perceptions visuelles, mais aussi travaillent avec des personnes voyantes. Dans ce contexte, il est évident que la projection d'information sur le graphique en relief permet d'augmenter les contenus, d'améliorer l'accessibilité (avec la méthode de bi-graphisme<sup>1</sup>) ainsi que d'améliorer l'expérience de l'utilisateur. Une étude récente a porté sur la conception et l'évaluation d'un prototype de réalité augmentée pour l'apprentissage de la pensée spatiale chez les enfants déficients visuels (Albouys-Perrois, Laviole, Briant, & Brock, 2018). Ce prototype se basait sur l'utilisation du toolkit PapARt (Laviole & Hachet, 2012), d'une caméra de couleur pour détecter des objets, d'un projecteur pour afficher des informations, et d'une caméra de profondeur pour détecter le mouvement des mains. En

<sup>1</sup> Le bi-graphisme est une méthode qui consiste à représenter les éléments d'un document avec un double codage, à la fois visuel et tactile.

associant une projection vidéo avec des retours audio-tactiles, ce dispositif permettait d'inclure des utilisateurs non-voyants et malvoyants. Deux modes d'utilisation de ce prototype ont été proposés. Le mode d'exploration permettait de parcourir des documents existants et de recevoir des feedbacks tactiles et sonores. Le mode de construction permettait aux utilisateurs déficients visuels de construire eux-mêmes des cartes ou des itinéraires en combinant des plaques aimantées et des Wikki Stix (

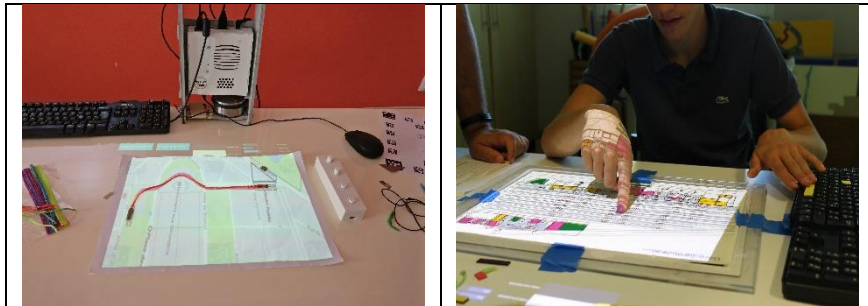


Figure 6).

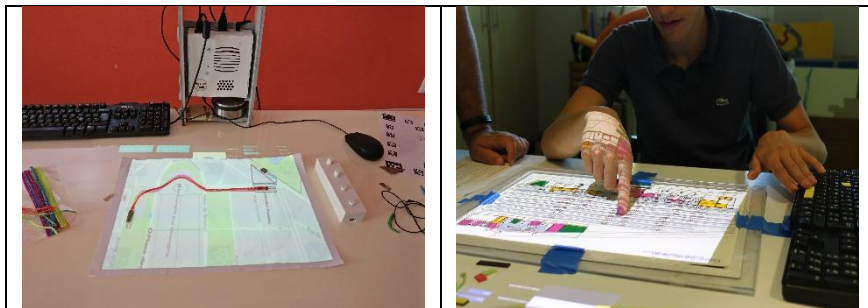


Figure 6. Gauche : prototype de carte interactive basé sur la réalité augmentée. Droite : un utilisateur explore un plan en relief. En pointant vers un élément sur la carte et en appuyant sur le clavier, il peut obtenir des informations vocales concernant les éléments de la carte.

Ce système a été évalué dans une étude avec 8 élèves déficients visuels (2 non-voyants et 6 malvoyants âgés de 14 à 21 ans). Les résultats montrent que tous les étudiants, indépendamment de leurs capacités visuelles réussissaient à utiliser le prototype avec une satisfaction élevée. Les auteurs soulignent cependant une limite de ce prototype concernant la création de contenus audio-tactiles qui doit être réalisée par une personne experte voyante. Une des pistes explorée par la suite consistait à utiliser PapARt pour créer des supports audio-tactiles pour des objets physiques existants (Thévin & Brock, 2018).

### Editeur de contenu interactif en relief

Comme cela a été noté dans toutes les études citées, la question de la création des contenus interactifs se pose, que ce soit dans un dispositif hybride ou purement numérique. Un éditeur open source est en voie de développement (projet Accessimap<sup>2</sup>). Il permet d'importer n'importe quel dessin vectoriel afin d'y rajouter des zones interactives qui déclencheront soit une synthèse vocale, soit un fichier audio existant ou enregistré par les utilisateurs eux-mêmes. Il est alors possible d'imprimer le document en relief le cas échéant, et de générer le fichier d'interactions qui lui correspond. Ce fichier peut être lu

<sup>2</sup> <https://www.irit.fr/accessimap>



par n'importe quel navigateur web. Il suffit alors de placer le document en relief sur une table tactile avec un navigateur web pour commencer à l'utiliser (voir les outils AccessiMap<sup>3</sup>).

## Les graphiques tangibles : un avenir probable

Comme nous l'avons vu dans la section précédente, les objets manipulés par les enfants sur la table interactive améliorent leur expérience et peuvent favoriser les apprentissages (Brulé et al., 2016). On distingue principalement deux types de graphiques tangibles interactifs, selon que les objets sont passifs ou mobiles (Ducasse et al., 2018). Ducasse et collaborateurs (2016) ont développé un système à base d'objets passifs connectables, permettant de représenter des nœuds et des segments, à l'image des intersections et des routes présents dans une carte, ou encore des cases et des flèches dans un organigramme. Les Tangible Reels sont des éléments constitués d'un enrouleur de badge fixé au-dessus d'une ventouse. Un aimant est fixé au bout du fil de l'enrouleur et un anneau métallique placé autour de l'enrouleur permet de connecter facilement les Tangible Reels entre eux (Figure 7). Les évaluations menées montrent que les Tangible Reels sont utilisables pour reconstruire des graphiques et des cartes de complexité moyenne et intermédiaire. Le placement des éléments est très fiable (98% des éléments placés au bon endroit par l'ensemble des sujets) et ils sont parfaitement stables lors de l'exploration. Ces études ont également montré que les cartes construites avec des Tangible Reels sont compréhensibles par des personnes déficientes visuelles puisqu'elles étaient capables de répondre à des questions posées sur ces cartes avec une précision très élevée (90% de réponses correctes).

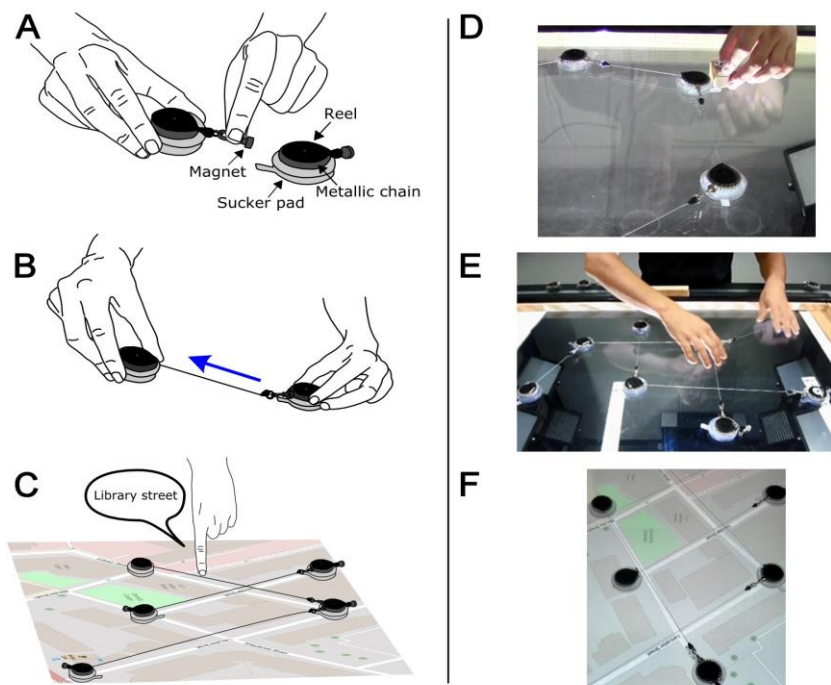


Figure 7. Tangible Reels : Ce dispositif permet à des personnes déficientes visuelles de construire et explorer un graphique tangible accessible en autonomie. Les éléments circulaires représentent les points et les fils représentent les lignes des graphiques tangibles (par ex. carrefours et routes dans une carte).

<sup>3</sup> <http://www.accessimap.fr/>

**A : Schéma détaillant le placement de deux Tangible Reels. B : Connexion de 2 Tangible Reels. C : Illustration du retour vocal lors de l'exploration d'une carte reconstruite grâce à des Tangible Reels. D : Photographie lors de la construction d'une carte avec des Tangible Reels. E : Exploration de cette carte. F : Tangible Reels placés sur la carte numérique qu'ils représentent.**

Aujourd'hui apparaissent des interfaces tangibles à base d'objets mobiles, appelées interfaces « actionnées » (« actuated » en anglais) sur lesquelles des éléments physiques (objets) peuvent être manipulés par l'utilisateur mais aussi de façon dynamique par le système pour refléter un changement du modèle numérique sous-jacent. Grâce à un tel dispositif, les personnes déficientes visuelles pourraient explorer des graphiques avec des changements de points de vue mais aussi des changements d'échelle. Afin d'en évaluer l'utilisabilité mais aussi de vérifier que les concepts de changement de point de vue et d'échelle sont compréhensibles et manipulables par des personnes déficientes visuelles, Ducasse et collaborateurs (2018) ont développé un dispositif permettant d'afficher des graphiques tangibles (Figure 8). Les auteurs ont conçu des techniques d'interaction non-visuelle permettant de changer le point de vue et de zoomer sur une carte géographique. Des petits robots mobiles représentent les villes. Ils peuvent se déplacer tout seul pour se repositionner chaque fois que la carte est rafraîchie. Les utilisateurs explorent librement l'affichage et doivent toucher un robot pour connaître le nom de la ville qu'il représente.



**Figure 8. BotMap : des robots autonomes se déplacent de manière contrôlée sur la table pour permettre à des personnes déficientes visuelles d'explorer des cartes en manipulant le point de vue et l'échelle.**

Une évaluation a été menée auprès de huit personnes déficientes visuelles (5 hommes et 3 femmes âgés de 26 à 66 ans) qui devaient explorer une carte contenant plusieurs points de repère à trois niveaux d'échelle. Ils devaient en mémoriser la configuration pour pouvoir répondre à des questions de cognition spatiale et reconstruire la carte sans aide. Ils devaient finalement répondre à trois questionnaires pour évaluer l'utilisabilité du dispositif, la charge cognitive associée à son utilisation, et leur satisfaction. Les résultats montrent que le dispositif est utilisable, quel que soit l'âge ou le statut visuel des utilisateurs, mais que cela nécessite une importante charge cognitive. Finalement, les auteurs ont observé des utilisateurs déficients visuels manipuler le système dans une tâche classique de recherche d'itinéraire pour un voyage. Tous les utilisateurs ont pu réaliser la tâche demandée. Ils ont trouvé que le système était compréhensible, que les fonctionnalités proposées étaient suffisantes et qu'ils pourraient facilement l'utiliser de manière autonome.

Comme nous l'avons vu dans cet exemple, les graphiques tangibles représentent une solution particulièrement intéressante pour les personnes déficientes visuelles avec de nombreux avantages. Tout d'abord, ils fournissent une double boucle d'interaction (Ullmer & Ishii, 2000) : une première boucle en touchant et en manipulant les objets, et une seconde boucle de rétroaction sonore provenant du graphique numérique, ce qui est très approprié pour des utilisateurs déficients visuels. Le deuxième avantage est la persistance des objets sur le dispositif: la position relative de l'un par rapport à l'autre ainsi que leur orientation, leur forme et éventuellement leur couleur peuvent aider les utilisateurs déficients visuels à connaître l'état actuel du modèle numérique. Même si le système est désactivé, les objets véhiculent toujours des informations de base sur le but et l'état du système. Le troisième avantage est la coïncidence des espaces d'entrée et de sortie: les utilisateurs n'ont pas besoin d'interagir sur un dispositif supplémentaire et les objets peuvent être utilisés comme périphériques d'entrée. Par exemple, il est possible de modifier les données d'un graphique mathématique en bougeant un point de la courbe. De plus, dans le cas des graphiques « actuels » avec des objets mobiles, ils peuvent également servir de périphériques de sortie, ce qui offre ainsi une continuité spatiale entre les espaces d'entrée et de sortie. La quatrième propriété des interfaces tangibles est à la fois un avantage et un inconvénient: ce sont des interfaces spécifiques, contrairement aux interfaces graphiques qui sont des interfaces générales. Comme les interfaces tangibles sont généralement conçues pour s'adapter à une fonction particulière ou pour représenter une certaine information (par exemple un modèle de bâtiment), ils peuvent rarement être adaptés à plusieurs applications. Cette spécificité permet aux interfaces tangibles d'augmenter l'intuitivité des interactions. Cependant, l'idéal serait de trouver un compromis entre la conception d'objets spéciaux qui ne peuvent pas être réutilisés dans une autre application et la conception d'objets très abstraits qui ne véhiculent aucune affordance. C'est ce que Ducasse et collaborateurs ont cherché à réaliser dans leur projets de Tangible Reels (Ducasse et al., 2016) et BotMap (Ducasse, Mace, et al., 2018). Enfin, et ce point n'a pas été abordé dans les exemples cités plus haut, il existe un cinquième et dernier avantage associé aux interfaces tangibles; elles permettent des entrées multiplexées dans l'espace. En effet, plusieurs utilisateurs peuvent manipuler la même information numérique, tout en interagissant avec des objets différents en même temps. On pourrait par exemple imaginer un graphique tangible dans lequel deux utilisateurs travaillent sur le même graphique mathématique et manipulent les mêmes valeurs en même temps, à condition que les boucles de rétroaction soient adaptées. En conclusion, il est évident que les graphiques tangibles représentent une solution particulièrement adaptée pour les personnes déficientes visuelles mais ces solutions sont toujours dans une phase de recherche. Leur application dépend, une fois encore, de la disponibilité des algorithmes d'adaptation dynamique des contenus; mais elle dépend aussi de la disponibilité de dispositifs tangibles plus ou moins génériques permettant de répondre à des besoins identifiés auprès des professionnels de la déficience visuelle.

## Les objets interactifs : une révolution en marche

Comme nous l'avons vu dans la section précédente, les interfaces tangibles cumulent beaucoup d'avantages dans le cadre des activités éducatives pour les personnes déficientes visuelles. D'ailleurs, un ensemble de nouvelles technologies figurant dans le champ de l'interaction tangible s'est imposé récemment dans le domaine professionnel de la déficience visuelle. Ces technologies permettent de

créer des objets interactifs. Les objets sont un support d'apprentissage important pour les enfants déficients visuels. En effet, ils permettent de représenter des concepts sous différentes formes (par ex. le triangle, qu'il soit plein, vide, ou de tailles différentes), mais aussi des choses impossibles à toucher dans leur globalité (comme un avion, la tour Eiffel, ou un animal sauvage). Cependant, l'apprentissage basé sur l'exploration tactile des objets repose sur la présence d'un proche ou d'un enseignant qui donne des explications. Les objets dans lesquels on rajoute des zones interactives permettent de restaurer une part d'autonomie et encouragent la curiosité et le travail personnel. L'interactivité permet d'insérer des rétroactions vibratoires, sonores ou vocales dans l'objet mais aussi de programmer des activités basées sur l'exploration et l'utilisation de l'objet. On peut par exemple programmer des tâches qui visent à explorer l'objet d'une certaine façon, à identifier certaines parties de l'objet, à résoudre un problème basé sur la compréhension de l'objet, à assembler des objets pour construire un modèle plus grand, etc. Il est même possible de connecter les objets interactifs à des bases de données permettant d'y associer des connaissances dynamiques. Par exemple, on peut imaginer un bâtiment interactif qui soit démontable, et qui donne des informations sur les différentes pièces du bâtiment et les personnes qui occupent ces pièces. Si le bâtiment représenté est un centre commercial, on peut connecter la maquette au système d'information du centre commercial et obtenir des informations à jour sur les magasins présents, leurs horaires d'ouverture, ce qu'on y trouve, etc. Evidemment, ceci est valable pour le plan d'un quartier ou d'un événement culturel, et bien d'autres contextes encore.

### Réalisation des objets interactifs

Grâce aux imprimantes 3D et aux découpeuses laser, il est possible d'imprimer des objets ou des maquettes en 3D avec des coûts et des délais de plus en plus réduits. Ces outils permettent de réaliser des objets qui n'existent pas sur le marché ainsi que des objets très évolués<sup>4</sup>. De plus, des outils et des méthodes de prototypage rapide, utilisables par tous, se développent et permettent d'améliorer l'accessibilité des supports grâce à des interactions sonores ou tactiles (Sato, Poupyrev, & Harrison, 2012). Par exemple, Silver, Rosenbaum et Shaw (2012) ont créé la carte microcontrôleur Makey Makey<sup>®</sup> permettant de concevoir des objets interactifs de manière flexible en incluant des matériaux organiques et vivants (une fleur ou le corps humain par exemple) et sans avoir besoin de compétences techniques. Cette carte destinée à un large public (des débutants aux experts) est compatible avec tous les logiciels et ne nécessite pas de programmation ou d'assemblage de pièces électroniques. D'autres cartes encore permettent de concevoir des applications mobiles plus riches car elles intègrent un processeur et une batterie (Hamidi, Baljko, Kunic, & Feraday, 2014), caractéristique intéressante afin de pouvoir utiliser un objet interactif dans différents environnements comme la classe. Nous citerons une dernière car, la Touch Board<sup>®</sup>, car elle représente un bon compromis pour concevoir un objet interactif simplement et rapidement tout en permettant sa mobilité.

Par conséquent, les objets interactifs peuvent être créés par les enseignants spécialisés eux-mêmes à partir d'outils de prototypage rapide tels que les cartes microcontrôleurs. N'importe quelle partie d'un objet conduisant l'électricité (métal, eau, corps humain, etc.) ou étant rendu conducteur (avec du papier aluminium ou de la peinture conductrice par exemple) peut devenir interactive grâce à ces cartes microcontrôleurs. Par exemple, un éducateur spécialisé de l'Institut des Jeunes Aveugles de

---

<sup>4</sup> Voir par ex le site de partage de modèles appelé [www.Thingiverse.com](http://www.Thingiverse.com)

Toulouse a connecté des fruits à une carte afin de déclencher des musiques individualisées lorsque ces fruits sont manipulés par les enfants déficients visuels avec des troubles cognitifs associés (voir Figure 9). Il existe plusieurs cartes avec des caractéristiques différentes, et elles ne requièrent pas toutes les mêmes compétences techniques (Giraud & Jouffrais, 2016).



Figure 9 : utilisation d'une carte Makey Makey® pour déclencher des musiques personnalisées lors du contact avec des fruits. L'objectif de l'éducateur spécialisé consistait à encourager des enfants avec des troubles cognitifs à toucher et éventuellement goûter de nouveaux fruits.

### Les objets interactifs comme supports éducatifs et pédagogiques

Deux études récentes (Giraud & Jouffrais, 2016; Giraud, Truillet, Gaildrat, & Jouffrais, 2017) ont montré l'intérêt que portent les professionnels de la déficience visuelle à ces objets interactifs créés à partir d'outils de prototypage. Tous les professionnels de la déficience visuelle rencontrés disent manquer d'outils spécifiques pour répondre à leurs besoins pédagogiques ou éducatifs et ont recours aux services d'adaptation ou à des ateliers pour faire réaliser des outils spécifiques. Dans ces études, de nombreux exemples d'objets interactifs ont été réalisés en collaboration avec les professionnels de la déficience visuelle suite à des sessions de conception participative, comme un conte sensoriel interactif (Figure 10), une frise chronologique interactive (Figure 11), une boîte métaphorique sonore pour apprendre la notion de taille (Figure 12), etc.



Figure 10. Le « conte sensoriel » est un livre en tissu incluant des objets imprimés en 3D et une carte microcontrôleur. Il est utilisé pour raconter une histoire incluant des expériences sonores et tactiles à des jeunes enfants déficients visuels. Les objets imprimés en 3D sont détachables et permettent d'instancier l'histoire. Des contacteurs sont dissimulés dans le livre et permettent de déclencher des narrations ou des sons pour accompagner l'histoire.

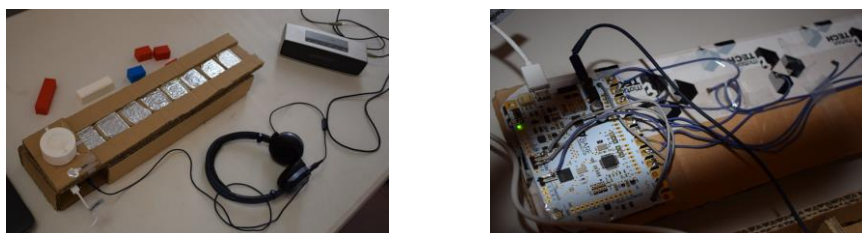


Figure 11. La frise chronologique interactive a été réalisée en carton avec une carte Touch Board dissimulée à l'intérieur et des objets imprimés en 3D. Elle est utilisée pour apprendre à des collégiens l'enchaînement de différents courants littéraires, artistiques, ou historiques. Les contenus sont modifiables facilement en

fonction de la leçon du jour. Les pièces en 3D représentent la durée d'une période spécifique. Le bouton blanc permet de modifier la description vocale de chaque période.



Figure 12. La boîte métaphorique est une boîte en plastique dans laquelle ont été placés une carte microcontrôleur et des têtes de vis servant de contacteurs. Le contact avec une tête de vis permet de déclencher des sons. Tous les contenus sonores sont modifiables très facilement. Elle est utilisée pour enseigner la notion de taille à des jeunes enfants déficients visuels avec des troubles associés.

Après quatre mois d'utilisation en classe de ces différents objets interactifs, Giraud et collaborateurs (2017) ont évalué les usages et la satisfaction des professionnels. Un questionnaire a permis de mettre en évidence une opinion positive en faveur des objets interactifs. En effet, les professionnels ont mentionné que ces objets permettent de satisfaire des besoins jusqu'alors insatisfaits, notamment en raison de l'absence d'outils pédagogiques spécifiques. Ils ont également jugé ces objets utiles, nécessaires, efficaces, et adaptables aux compétences de leurs élèves. Ils ont apprécié leur utilisation en classe mais aussi la création de ces objets interactifs en tant qu'activité éducative ; ce qui confirme les travaux de Leduc-Mills et collaborateurs (2013) qui ont montré que ces activités facilitent les activités avec les enfants, notamment ceux ayant une déficience. De plus, les professionnels utilisant ces objets ont mentionné que les élèves s'engageaient davantage dans l'activité et étaient capables de garder leur attention focalisée sur l'exercice plus qu'à l'accoutumée, leur permettant de travailler sur des concepts habituellement difficiles à comprendre (Giraud & Jouffrais, 2016). En conclusion de l'étude, les auteurs mentionnent que les enseignants sont disposés à recommander l'utilisation de ces objets à leurs collègues. Néanmoins, il apparaît qu'ils auraient besoin d'une formation supplémentaire pour pouvoir concevoir ces objets de manière complètement autonome.

Dans une autre étude, Giraud et collaborateurs (Giraud, Brock, Macé, & Jouffrais, 2017) ont plus spécifiquement montré l'intérêt d'un modèle 3D interactif dans le cadre d'un apprentissage historique et géographique. Ces auteurs ont comparé l'utilisation de cartes thermogonflées (support pédagogique utilisé habituellement en classe) à celle d'une maquette 3D interactive d'une ville imaginaire. Cette étude a été réalisée auprès de 24 élèves déficients visuels (17 ans d'âge moyen). Les résultats ont montré une amélioration significative des performances mnésiques et spatiales chez les enfants déficients visuels lors de l'utilisation de la maquette 3D. Une autre étude (Brock, Oriola, Truillet, Jouffrais, & Picard, 2013) avait déjà montré des résultats convergents en faveur des cartes interactives comparées aux cartes en relief non interactives. L'utilisation d'une carte interactive permettait de diminuer le temps d'apprentissage des élèves déficients visuels, et améliorait leur satisfaction.

### Intérêt des objets interactifs dans le domaine de la déficience visuelle

Dans ces différentes études, il apparaît que les objets interactifs répondent aux besoins pédagogiques et éducatifs des professionnels de la déficience visuelle. Les nouvelles technologies sont utilisables pour créer des objets interactifs de manière simple, rapide, à bas coût et avec un haut degré de

personnalisation. Ces caractéristiques permettent de réaliser des supports éducatifs en rapport avec le type d'activité et la progression pédagogique, mais aussi avec les capacités perceptives et cognitives des élèves impliqués. De plus, les objets interactifs créés permettent de répondre à des besoins d'apprentissage spécifiques, tels que l'apprentissage spatial, en offrant un haut degré de personnalisation des supports. La facilité de conception, d'utilisation et de diffusion<sup>5</sup> de ces objets, ainsi que les bénéfices qu'ils apportent en termes d'apprentissage devraient permettre une appropriation rapide par les professionnels de la déficience visuelle. En effet, il est facile de partager des fichiers numériques et des méthodes sur de nombreux sites collaboratifs. De plus, les FabLab (Fabrication Labs) sont apparus dans de nombreuses villes et universités et sont des lieux absolument essentiels pour trouver de l'aide et acquérir des compétences.

## Conclusion générale

Le numérique et les nouvelles technologies présentent une formidable opportunité pour les personnes déficientes visuelles. Dans ce chapitre, nous avons couvert un ensemble de travaux, non exhaustif, concernant les deux grandes familles de dispositifs proposées par Ducasse et collaborateurs (2018b). Concernant les dispositifs hybrides, qui combinent informations numériques et support physique, la recherche et l'innovation sont matures et le transfert a commencé puisque les professionnels de la déficience visuelle utilisent déjà certains dispositifs issus des laboratoires comme les cartes en relief interactives (cartes déposées sur une table tactile)(Brock, Truillet, Oriola, Picard, & Jouffrais, 2012; Brulé et al., 2016). Les cas d'usage sont maintenant identifiés, que ce soit en classes adaptées (réservées à des enfants en situation de handicap), en classe d'inclusion (enfant scolarisé dans une classe ordinaire) ou en classe d'intégration (classe adaptée située au sein d'un établissement ordinaire) (Brulé et al., 2015). Ces dispositifs sont particulièrement intéressants car ils intègrent la possibilité de faire du bigraphisme (les documents en relief peuvent être colorés et contrastés) ; ils permettent une exploration bimanuelle ; ils sont simples à mettre en œuvre, et peuvent offrir des fonctions avancées (filtrage, calcul, programmation d'exercices, etc.) Ils permettent donc de couvrir un grand nombre de situations d'apprentissage. Les dispositifs hybrides intégrant la réalité augmentée (Albouys-Perrois et al., 2018) semblent prometteurs également. En effet, ils permettent de réaliser du graphisme dynamique et pourraient, par conséquent, correspondre à des situations de travail collaboratif plus important entre personnes déficientes visuelles (avec différents niveaux de déficience visuelle) et voyantes. Néanmoins, ce type de dispositif semble aujourd'hui moins mature.

Les dispositifs purement numériques ont aussi des avantages. Les contenus peuvent être affichés sur de multiples supports et de façon complètement dynamique. Par contre, l'absence d'indices tactiles pour guider l'exploration haptique représente une difficulté majeure, à la fois sur les plans sensoriels et cognitifs. Par conséquent, de notre point de vue, ils sont confinés à des situations d'usage particulières dans lesquels il n'est pas nécessaire de comprendre les contours des figurés.

Cependant les freins à l'adoption de tous ces outils existent. Ils reposent sur un ensemble de constats : la disponibilité commerciale des outils eux-mêmes évidemment, mais aussi la possibilité de créer et

---

<sup>5</sup> Grace au fait que ces fichiers soient des fichiers numériques facilement partageables, notamment sur des sites collaboratifs

partager des contenus en relief avec leur complément numérique qui permet d'ajouter l'interaction. Plusieurs projets travaillent aujourd'hui sur la génération automatique de contenus adaptés (Miele, Landau, & Gilden, 2006; Takagi & Chen, 2014; Watanabe, Yamaguchi, Koda, & Minatani, 2014) ou sur la réalisation d'éditeurs spécialisés (Ducasse, Macé, & Jouffrais, 2015). Certains projets vont même plus loin puisqu'ils proposent la génération automatique de cartes adaptées imprimées en relief (Götzelmann & Pavkovic, 2014). Il nous semble donc évident que ces outils seront de plus en plus adoptés dans les années à venir.

Pour finir, nous avons vu que les objets interactifs sont utilisés dans de multiples contextes et situations d'apprentissage. Il ne fait aucun doute que ces outils répondent à des besoins identifiés et vont se répandre rapidement dans le milieu professionnel.

## Remerciements

Ces différents projets ont été subventionnés par l'ANR (AccessiMap ANR-14-CE17-0018), la FIRA (GeoAccess 2014), ou par le programme Erasmus+ de l'Union Européenne (VISTE 2016-1-EL01-KA201-023731). Nous tenons aussi à remercier le laboratoire « Cherchons pour Voir », les personnels et élèves de l'INJA de Paris, ainsi que ceux de l'IJA de Toulouse. Nous adressons des remerciements spéciaux à Laurence Boulade et Nathalie Bedouin.

## Références

- Albouys-Perrois, J., Laviole, J., Briant, C., & Brock, A. (2018). Towards a Multisensory Augmented Reality Map for Blind and Low Vision People: a Participatory Design Approach. In *CHI'18 - CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Montreal, Canada: ACM.
- Bardot, S., Serrano, M., & Jouffrais, C. (2016). From tactile to virtual: Using a Smartwatch to Improve Spatial Map Exploration for Visually Impaired Users. In *Proceedings of the 18th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services - MobileHCI '16* (pp. 100–111). New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/2935334.2935342>
- Bardot, S., Serrano, M., Oriola, B., & Jouffrais, C. (2017). Identifying how Visually Impaired People Explore Raised-line Diagrams to Improve the Design of Touch Interfaces. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '17* (pp. 550–555). New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025582>
- Bourne, R. R. A., Flaxman, S. R., Braithwaite, T., Cicinelli, M. V., Das, A., Jonas, J. B., ... Zheng, Y. (2017). Magnitude, temporal trends, and projections of the global prevalence of blindness and distance and near vision impairment: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet Global Health*, 5(9), e888–e897. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(17\)30293-0](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(17)30293-0)
- Brock, A. M., Oriola, B., Truillet, P., Jouffrais, C., & Picard, D. (2013). Map design for visually impaired people: past, present, and future research. *Médiation et Information - Handicap et Communication*, 36(36), 117–129.
- Brock, A. M., Truillet, P., Oriola, B., Picard, D., & Jouffrais, C. (2012). Design and User Satisfaction of Interactive Maps for Visually Impaired People. In K. Miesenberger, A. Karshmer, P. Penaz, & W. Zagler (Eds.), *ICCHP 2012. LNCS, vol. 7383*. (pp. 544–551). Linz, Austria: Springer.



- Brock, A. M., Truillet, P., Oriola, B., Picard, D., & Jouffrais, C. (2014). Interactivity Improves Usability of Geographic Maps for Visually Impaired People. *Human-Computer Interaction*, 30, 156–194.
- Brulé, E., & Bailly, G. (2018). Taking into Account Sensory Knowledge. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '18* (pp. 1–14). New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/3173574.3173810>
- Brulé, E., Bailly, G., Brock, A., Valentin, F., Denis, G., & Jouffrais, C. (2016). MapSense: Multi-Sensory Interactive Maps for Children Living with Visual Impairments. In *International Conference for Human-Computer Interaction (CHI 2016)* (pp. 445–457). San Jose, CA, USA: ACM.
- Brulé, E., Bailly, G., Brock, A., Valentin, F., Denis, G., & Jouffrais, C. (2016). MapSense: Multi-Sensory Interactive Maps for Children Living with Visual Impairments. In *International Conference for Human-Computer Interaction (CHI 2016)* (pp. 445–455). San Jose, CA, USA: ACM. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858375>
- Brulé, E., Bailly, G., & Gentes, A. (2015, October 27). Identifier les besoins des enfants en situation de déficience visuelle : état de l'art et étude de terrain. *27ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine*. ACM. <https://doi.org/10.1145/2820619.2820630>
- Ducasse, J., Brock, A., & Jouffrais, C. (2018a). Accessible Interactive Maps for Visually Impaired Users. In E. Pissaloux & R. Velasquez (Eds.), *Mobility in Visually Impaired People - Fundamentals and ICT Assistive Technologies*. Springer.
- Ducasse, J., Brock, A. M., & Jouffrais, C. (2018b). Accessible Interactive Maps for Visually Impaired Users. In E. Pissaloux & R. Velasquez (Eds.), *Mobility in Visually Impaired People - Fundamentals and ICT Assistive Technologies* (pp. 537–584). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-54446-5\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-319-54446-5_17)
- Ducasse, J., Macé, M. J.-M., Serrano, M., & Jouffrais, C. (2016). Tangible Reels: Construction and Exploration of Tangible Maps by Visually Impaired Users. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 2186–2197). New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858058>
- Ducasse, J., Mace, M. J. M., Oriola, B., & Jouffrais, C. (2018). BotMap: Non-Visual Panning and Zooming with an Actuated Tabletop Tangible Interface. *Tochi*, in press.
- Ducasse, J., Macé, M., & Jouffrais, C. (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. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W3-517-2015>
- Giraud, S., Brock, A. M., Macé, M. J.-M., & Jouffrais, C. (2017). Map Learning with a 3D Printed Interactive Small-Scale Model: Improvement of Space and Text Memorization in Visually Impaired Students. *Frontiers in Psychology*, 8, 930. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00930>
- Giraud, S., & Jouffrais, C. (2016). Empowering Low-Vision Rehabilitation Professionals with “Do-It-Yourself” Methods. In *International Conference Computers Helping People with Special Needs* (pp. 61–68). Springer International Publishing. [https://doi.org/http://doi.org/10.1007/978-3-319-41267-2\\_9](https://doi.org/http://doi.org/10.1007/978-3-319-41267-2_9)
- Giraud, S., Truillet, P., Gaildrat, V., & Jouffrais, C. (2017). “DIY” Prototyping of Teaching Materials for Visually Impaired Children: Usage and Satisfaction of Professionals. In M. Antona & C. Stephanidis (Eds.), *UAHCI: 11th International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction* (pp. 515–524). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58706->

- Götzelmann, T., & Pavkovic, A. (2014). Towards automatically generated tactile detail maps by 3D Printers for Blind Persons. In *Proceedings of ICCHP 2014, LNCS Vol 8548* (pp. 1–7).
- Hamidi, F., Baljko, M., Kunic, T., & Feraday, R. (2014). Do-It-Yourself (DIY) assistive technology: A communication board case study. In *ICCHP 2014* (Vol. 8548 LNCS, pp. 287–294). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-08599-9\\_44](https://doi.org/10.1007/978-3-319-08599-9_44)
- Hatwell, Y. (2003). *Touching for Knowing: Cognitive psychology of haptic manual perception (Advances in Consciousness Research)*. Yvette Hatwell, Arlette Streri, Edouard Gentaz.
- Heller, M. A. (2002). Tactile picture perception in sighted and blind people. *Behavioural Brain Research*, *135*(1–2), 65–68. [https://doi.org/10.1016/S0166-4328\(02\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S0166-4328(02)00156-0)
- Jacobson, R. D. (1992). Spatial Cognition Through Tactile Mapping. *Swansea Geographer*, *29*, 79–88.
- Jacobson, R. D. (1998). Cognitive Mapping Without Sight: four preliminary studies of spatial learning. *Journal of Environmental Psychology*, *18*(3), 289–305. <https://doi.org/10.1006/jevp.1998.0098>
- Laviole, J., & Hachet, M. (2012). PapARt: Interactive 3D graphics and multi-touch augmented paper for artistic creation. *IEEE Symposium on 3D User Interfaces 2012, 3DUI 2012 - Proceedings*, 3–6. <https://doi.org/10.1109/3DUI.2012.6184167>
- Lebaz, S., Jouffrais, C., & Picard, D. (2012). Haptic identification of raised-line drawings: high visuospatial imagers outperform low visuospatial imagers. *Psychological Research*, *76*(5), 667–675. <https://doi.org/10.1007/s00426-011-0351-6>
- Lebaz, S., Picard, D., & Jouffrais, C. (2010). Haptic Recognition of Non-figurative Tactile Pictures in the Blind: Does Life-Time Proportion without Visual Experience Matter? In A. M. Kappers (Ed.), *Haptics: Generating and Perceiving Tangible Sensations* (Vol. EuroHaptic, pp. 412–417). Amsterdam, NL.
- Leduc-Mills, B., Dec, J., & Schimmel, J. (2013). Evaluating accessibility in fabrication tools for children. In *Proceedings of the 12th International Conference on Interaction Design and Children - IDC '13* (p. 617). <https://doi.org/10.1145/2485760.2485882>
- Miele, J. A., Landau, S., & Gilden, D. (2006). Talking TMAP: Automated generation of audio-tactile maps using Smith-Kettlewell's TMAP software. *British Journal of Visual Impairment*, *24*(2), 93–100. <https://doi.org/10.1177/0264619606064436>
- Morash, V., Connell Pinsky, A. E., Alfaro, A. U., & McKerracher, A. (2012). A Review of Haptic Spatial Abilities in the Blind. *Spatial Cognition & Computation*, *12*(2–3), 83–95. <https://doi.org/10.1080/13875868.2011.599901>
- Parkes, D. (1988). NOMAD: An audio-tactile tool for the acquisition, use, and management of spatially distributed information by partially sighted and blind people. In *Proceedings Second International Conference on Maps and Graphics for Visually Disabled People Nottingham, 20-2 Jub 1988*.
- Poppinga, B., Magnusson, C., Pielot, M., & Rasmus-Gröhn, K. (2011). TouchOver map: Audio-Tactile Exploration of Interactive Maps. In *Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services - MobileHCI '11* (pp. 545–550). New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/2037373.2037458>
- Sato, M., Poupyrev, I., & Harrison, C. (2012). Touché: Enhancing Touch Interaction on Humans, Screens,

- Liquids, and Everyday Objects. In *CHI '12 Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 483–492). New York, USA: ACM. <https://doi.org/10.1145/2207676.2207743>
- Silver, J., Rosenbaum, E., & Shaw, D. (2012). Makey Makey : Improvising Tangible and Nature-Based User Interfaces. In *TEI'12* (p. 5).
- Simonnet, M., Jacobson, D., Vieilledent, S., & Tisseau, J. (2009). SeaTouch: a haptic and auditory maritime environment for non visual cognitive mapping of blind sailors. In K. S. Hornsby (Ed.), *COSIT 2009, LNCS 5756* (pp. 212–226). Aber Wrac'h, France: Springer-Verlag. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-03832-7\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-03832-7_13)
- Swaminathan, S., Roumen, T., Kovacs, R., Stangl, D., Mueller, S., & Baudisch, P. (2016). Linespace: A Sensemaking Platform for the Blind. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '16* (pp. 2175–2185). New York, New York, USA: ACM Press. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858245>
- Takagi, N., & Chen, J. (2014). Development of a computer-aided system for automating production of tactile maps and its usability evaluation. In *2014 World Automation Congress (WAC)* (pp. 213–218). IEEE.
- Thévin, L., & Brock, A. (2018). Augmented Reality for People with Visual Impairments: Designing and Creating Audio-Tactile Content from Existing Objects.
- Ullmer, B., & Ishii, H. (2000). Emerging frameworks for tangible user interfaces. *IBM Systems Journal*, 39(3.4), 915–931. <https://doi.org/10.1147/sj.393.0915>
- Watanabe, T., Yamaguchi, T., Koda, S., & Minatani, K. (2014). Tactile map automated creation system using OpenStreetMap. In K. Miesenberger, D. Fels, D. Archambault, P. Peñáz, & W. Zagler (Eds.), *ICCHP 2014* (Vol. 8548, pp. 42–49). Paris, France: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-14097-6>
- Zeng, L., Miao, M., & Weber, G. (2014). Interactive Audio-haptic Map Explorer on a Tactile Display. *Interacting with Computers*, iwu006-. <https://doi.org/10.1093/iwc/iwu006>