



HAL
open science

Étude et tests d'une application haptique multimodale pour enfants déficients visuels

Thomas Pietrzak, Benoît Martin, Isabelle Pecci

► **To cite this version:**

Thomas Pietrzak, Benoît Martin, Isabelle Pecci. Étude et tests d'une application haptique multimodale pour enfants déficients visuels. *Sciences et Technologies pour le Handicap*, 2009, 3 (1), pp.37-62. 10.3166/sth.3.37-62 . hal-00671461

HAL Id: hal-00671461

<https://inria.hal.science/hal-00671461v1>

Submitted on 17 Feb 2012

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

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

Étude et tests d'une application haptique multimodale pour enfants déficients visuels

Une application d'exploration de schémas de circuits électriques

Thomas PIETRZAK, Isabelle PECCI, Benoît MARTIN

Université Paul Verlaine - Metz

UFR MIM – LITA

Ile du Saulcy

F-57000 METZ

{pietrzak, pecci, benoit.martin}@univ-metz.fr

RÉSUMÉ. De nouvelles technologies permettent de proposer de nouvelles interactions, notamment pour les personnes en situation de handicap. Ce papier présente le projet Européen MICOLE dont le but est de fournir une API de développement d'applications multimodales et multi-utilisateurs pour déficients visuels. Dans cette API, de nouvelles techniques d'interactions basées sur le retour haptique telles que les tactons ou les PICOB sont proposées. Nous montrons ensuite une application permettant d'explorer des schémas de circuits électriques construite à partir de cette API et utilisant le PHANToM et la souris VTPlayer. Enfin, nous présentons les résultats d'une première expérimentation de cette application avec 13 enfants déficients visuels.

ABSTRACT. New technologies allow proposing new interactions, in particular for disabled people. This paper presents the European project MICOLE that aims at providing a development API for multimodal and multi-users applications intended for visually impaired users. In this API, new interactions techniques based on haptic such as tactons and PICOB are introduced. Then, we show an electric circuit schematic exploration software that is built with this API and that uses the PHANToM and the VTPlayer mouse. Finally, we present results of the first experimentation of this application with 13 visually impaired children.

MOTS-CLÉS : haptique, retour tactile, retour d'effort, multimodalité, utilisateurs déficients visuels, schémas de circuits électriques.

KEYWORDS: haptic, tactile feedback, force feedback, multimodality, visually impaired users, electric circuit schematics.

1. Introduction

Les schémas sont des objets utilisés dans de nombreux domaines. Ils sont composés de dessins graphiques et éventuellement d'annotations textuelles. La vision est donc importante pour comprendre des schémas. En conséquence, les personnes possédant un handicap visuel ont des difficultés à explorer ce genre de média.

Les informations textuelles ne posent pas trop de problèmes en soi : les personnes possédant une vision résiduelle peuvent agrandir la taille des caractères, et les non-voyants utilisent l'alphabet Braille. Ces deux techniques sont possibles à la fois sur papier et sur un système informatisé, grâce aux tablettes braille. De plus des systèmes de synthèse vocale peuvent transcrire du texte de manière fidèle. Par contre, les informations graphiques sont plus difficiles à représenter. Les personnes possédant une vision résiduelle peuvent augmenter le contraste et agrandir les schémas. Par contre les personnes non-voyantes utilisent généralement un papier spécial mis en relief. Cette technique possède plusieurs désavantages. Tout d'abord les schémas doivent être simplifiés car ils sont plus difficiles à interpréter que les schémas visuels. De plus, cette technique est difficile à transposer dans un système interactif. Pour ce faire, il faut utiliser des périphériques stimulant le sens du toucher. Nous distinguons deux grandes catégories de sensations : le retour tactile et le retour de force. Le retour tactile est ressenti par des mécanorécepteurs de la peau. Parmi les périphériques pouvant procurer ce genre de sensations, nous retiendrons la souris VTPlayer (figure 1, à gauche), qui possède deux matrices de 4×4 picots. L'utilisateur ressent la stimulation tactile en posant ses doigts sur les matrices. Le retour de force désigne les sensations issues de la stimulation de récepteurs situés dans les muscles, les tendons et les articulations. En guise d'exemple nous présentons le PHANToM Omni, qui est un bras articulé permettant d'exercer des forces dans trois directions, et qui possède six degrés de liberté en entrée.



Souris VTPlayer : retour tactile



PHANToM Omni: retour d'effort

Figure 1. Les périphériques haptiques de référence.

(Zijp-Rouzier et Petit, 2005) ont créé un système appelé SALOME permettant à des personnes à déficience visuelle de réaliser des constructions géométriques. Ce système utilise à la fois un PHANToM pour le retour de force et un retour sonore grâce à une synthèse vocale. Cette application montre la faisabilité de la représentation de schémas à l'aide d'un retour haptique. Cependant ce système est dédié aux constructions géométriques, et ne permet pas la manipulation d'autres types de graphiques.

Le projet TeDUB (Horstmann *et al.*, 2004) permet d'explorer plusieurs sortes de graphiques de manière non visuelle. La modalité haptique est limitée à l'usage d'un joystick à retour de force pour aider au parcours du circuit complété par un lecteur écran Braille. L'utilisateur obtient aussi des informations sur la localisation et sur les composants via un retour vocal de type texte et des icônes sonores. Un son 3D a été ajouté, mais les tests ont montré son inefficacité. L'approche utilisée dans TeDUB est très dépendante du retour vocal et du lecteur d'écran Braille : d'une part l'usage du retour vocal n'est pas toujours possible en environnement bruyé et d'autre part le Braille n'est pas connu par tous les déficients visuels. Notons qu'en environnement bruyé le casque pourrait être une solution, mais il n'est pas adapté à des applications où l'utilisateur doit garder un contact avec le monde réel pour communiquer.

La technologie des matrices à picots est cependant intéressante car elle permet aussi d'afficher des formes géométriques (Ziatet *et al.*, 2007). Ziatet *et al.* utilisent un périphérique appelé Tactons, constitué d'une tablette graphique en entrée et d'une matrice de 4x4 picots en sortie. Leurs études ont montré que des utilisateurs parviennent à distinguer plusieurs formes géométriques entre 0,5mm et 2mm.

Le travail présenté ci-dessous a été réalisé au sein du projet européen MICOLE. Le but de ce projet était de créer un environnement multimodal et collaboratif destiné aux enfants déficients visuels (Micole, 2003). L'environnement devait permettre de naviguer dans des données et favoriser la collaboration entre les enfants déficients visuels avec des enfants voyants ou des enseignants. Pour ce projet, nous devons tout d'abord développer une API (Application Programming Interface ou Interface de Programmation) permettant de développer rapidement des applications multimodales. L'usage de la multimodalité devait être disponible tant en entrée qu'en sortie au niveau de l'architecture de base. Les modalités gérées pourront solliciter le canal visuel, le canal auditif et le canal haptique.

L'API devait également intégrer des capacités de guidage permettant de lier un périphérique à un autre. Par exemple, un utilisateur muni d'une souris peut amener un autre utilisateur utilisant un matériel à retour d'effort à une certaine position. Cela rend générique la notion d'enseignant/apprenant et doit encourager les situations de collaboration.

L'API est basée sur un système multi-agents. Chaque agent est une entité autonome qui s'occupe d'une tâche. Les agents peuvent communiquer par un bus logiciel soit en envoyant un message sur ce bus, soit en exécutant du code quand des messages sélectionnés transitent sur le bus. Cette architecture est proche du bus Ivy (Ivy, 2007) mais optimisée pour la prise en compte de l'haptique. La partie haptique est gérée par la librairie Reachin (Reachin, 2008) exceptée la souris VTPlayer qui est utilisée avec une librairie développée spécifiquement pour le projet MICOLE (Martin *et al.*, 2007). La description de l'architecture n'étant pas l'objectif de ce papier, le lecteur intéressé pourra se reporter à (Pietrzak *et al.*, 2007b) pour plus de détails.

Une enquête que nous avons menée auprès d'enfants déficients visuels et d'éducateurs nous a appris que les principaux besoins pour l'éducation des enfants déficients visuels se situaient au niveau des schémas et des notations mathématiques. Nous avons donc utilisé l'API MICOLE pour développer une application d'exploration de schémas de circuits électriques. D'autres partenaires du projet ont utilisé l'API MICOLE pour développer d'autres applications, comme par exemple une application d'exploration du système solaire (Saarinen *et al.*, 2006).

L'application d'exploration de schémas de circuits électriques a été développée avec deux objectifs :

- favoriser la communication avec les enfants déficients visuels en optimisant l'usage de techniques d'interactions haptiques.
- fournir une approche multimodale pour faciliter d'une part la communication entre enfants déficients visuels et voyants (autres enfants, enseignants) et d'autre part pour renforcer la compréhension pour les enfants déficients visuels en favorisant la redondance d'informations.

La section 2 présente deux approches de codage afin de représenter une information à l'aide de l'haptique. Cela prend toute son importance pour représenter les différents composants ou informations qui apparaissent lors de l'exploration d'un schéma. L'application et l'approche multimodale utilisées sont décrites dans la section 3. Une première expérimentation de cette application est présentée et discutée dans la section 4 avant de conclure dans la section 5.

2. Codage de l'information

Le contexte de la déficience visuelle demande de privilégier d'autres modalités que les modalités visuelles. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'apport de techniques d'interactions haptiques pour transmettre des informations. Deux études s'offrent à nous car le retour haptique se décompose en deux catégories : retour tactile et retour de force.

2.1. Codage par retour tactile : les tactons

De nombreux exemples existent concernant les messages vibrotactiles dans le contexte de la mobilité. Par exemple, Chang and O'Sullivan suggèrent l'intégration d'un retour vibrotactile sur un téléphone afin d'enrichir la communication et le retour audio, en particulier (Chang *et al.*, 2005). Dans ce sens, ils ont essayé de proposer une classification des sensations haptiques (O'Sullivan *et al.*, 2006).

Les informations tactiles sont également utilisées pour informer l'utilisateur dans des situations où sa vision n'est pas disponible. (van Veen *et al.*, 2000) proposent une veste tactile afin de faire ressentir les informations d'orientation à un pilote. Ils utilisent une ligne d'actuateurs sur le torse afin d'indiquer la position relative par rapport à l'horizon. De manière similaire, ils ont aussi développé un système pour les astronautes afin de leur fournir un sens de l'orientation en situation de gravité

zéro (van Erpet *et al.*, 2003). Cette fois, il s'agit d'indiquer à la fois la direction et la rotation. Ces exemples montrent comment le sens tactile distribué sur le corps peut être utilisé afin de présenter des informations sans nécessiter la vision. L'un des inconvénients majeurs est que les zones du corps sollicitées ne sont pas les plus sensibles (W. Penfield *et al.*, 1950). La transmission d'informations différentes reste limitée.

Les matrices tactiles proposent une autre approche. Elles sont très répandues si l'on considère les nombreux périphériques et technologies développés autour de ce type de retour. On peut citer à titre d'exemple la surface de (Kawai et Tomita, 1998) qui utilise une grande matrice 16×16, le Tactile Shape Display de (Wagner *et al.*, 2002) qui utilise une matrice de dimension 6×6 picots, le système VITAL avec actionneurs électromagnétiques de (Benali-Khoudja *et al.*, 2004) qui est composé d'une matrice 8×8, ou encore le STReSS de (Pasquero et Hayward, 2003) qui est une matrice de 8×8 se déplaçant latéralement. En ce qui concerne les matrices tactiles, il y a deux façons pour afficher des informations :

- reproduire l'image sur la matrice.
- afficher un message en utilisant une codification.

La première proposition consiste à convertir directement les pixels d'une image à afficher : les pixels sont convertis en picots levés et les autres en picots baissés. Cette méthode a été utilisée par (Jansson *et al.*, 2005) pour présenter des cartes avec une souris VTPlayer. Les résultats n'étaient pas meilleurs qu'une aide sonore : la navigation avec la souris a perturbé les utilisateurs. En introduisant une interface tangible, Wall and Brewster ont obtenu de meilleurs résultats (Wall *et al.*, 2006), mais cette interface est spécifique au problème étudié.

La seconde proposition demande d'associer à une configuration tactile de la matrice une sémantique : un message peut être transmis plus ou moins indépendamment de l'image que véhicule le tracé tactile. Ainsi, nous menons des investigations afin de concevoir une forme générique de messages basés sur des matrices tactiles. Pour cela nous combinons une représentation par des picots avec les travaux sur les tactons vibrants de (Brown *et al.* 2005). Ils ont défini les tactons comme des « messages tactiles structurés » et sont analogues aux earcons en audio expérimentés par (Brewster, 1994). Ces travaux précédents ont exploré l'usage des périphériques vibrotactiles comme une méthode pour fournir à l'utilisateur des informations tactiles. (Brown *et al.* 2005) ont tout d'abord étudié l'aspect monodimensionnel et ont montré qu'un haut niveau de précision peut très rapidement être atteint avec un périphérique peu onéreux. Ils ont montré que la combinaison de paramètres indépendants – qui n'interfèrent pas entre eux au niveau de la reconnaissance – peut être utilisée afin d'augmenter le flot d'informations envoyé à l'utilisateur. (Brown *et al.* 2006) ont démontré qu'un utilisateur pouvait atteindre un haut niveau de précision avec trois paramètres variables au niveau du signal tactile. Cependant, il est apparu important de choisir avec attention les bons paramètres à modifier. Par exemple, la modification de la fréquence pouvait modifier la

perception de l'amplitude. Des travaux plus récents de (Hogganet *et al.*, 2006) ont exploré les équivalences entre les tactons vibrants et les tactons audio. Ceci tend à permettre la présentation de la même information à l'aide de deux modalités différentes selon la situation. Nous proposons une autre solution basée cette fois sur les matrices tactiles (Pietrzak *et al.*, 2006b). Il s'agit de suggérer une information à l'aide d'un motif fixe ou d'une animation créée à l'aide d'une matrice tactile.

Chaque picot d'une matrice tactile peut être contrôlé individuellement. Nous appelons motif l'état d'une matrice à un instant t . Ainsi un tacton statique est défini par un motif. Il est affiché jusqu'à ce que le tacton change. L'utilisateur contrôle l'exploration de ces Tactons. Il les parcourt en déplaçant son doigt sur la matrice. Par contre, un tacton dynamique est défini par une animation, c'est-à-dire une succession d'images. Une image dénote une étape de l'animation : elle est représentée par un motif et une durée de présentation. Cette durée est relative, elle ne prend son sens que relativement aux autres images et à la durée de l'animation. Une image de longueur 2 sera présentée deux fois plus longtemps qu'une image de longueur 1. Cette même image de longueur 2 dans une animation de longueur 10 et d'une durée de 1s sera présentée pendant 200ms. Ainsi, les notions de motif, image, durée de présentation (image), durée (animation) représentent les principaux paramètres des tactons sur lesquels il est possible d'agir pour coder une information sous la forme d'un message tactile. Cette fois l'utilisateur ne contrôle plus l'exploration : l'utilisateur garde son doigt immobile pour recevoir l'information.

Ces paramètres permettent de structurer l'information véhiculée par ces tactons en plusieurs dimensions. Dans une première étude nous avons examiné la reconnaissance de tactons monodimensionnels (Pietrzak *et al.*, 2006). Dans l'application décrite ci-dessous nous n'utiliserons que des tactons monodimensionnels car il n'y aura qu'une seule information à afficher à la fois, à savoir des directions ou un composant électrique. Les expériences sur les tactons monodimensionnels ont permis d'obtenir plusieurs ensembles de tactons satisfaisants en terme de taux d'erreur et de vitesse de reconnaissance. Nous notons cependant que les utilisateurs préfèrent en majorité les tactons statiques. L'intérêt des dynamiques est qu'ils possèdent plus de paramètres, ce qui offre plus de potentiel pour représenter les informations. La figure 2 présente les ensembles de tactons les plus faciles à reconnaître.

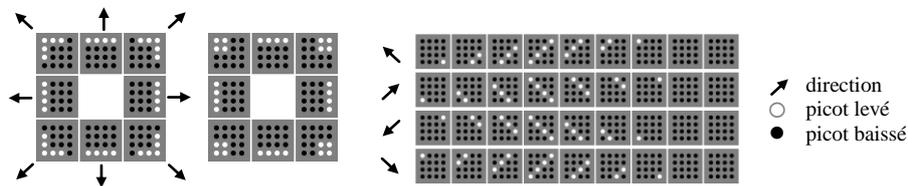


Figure 2. Tactons satisfaisants.

Une expérimentation menée par (Crossan *et al.*, 2006) a permis de confirmer nos tests en laboratoire sur la supériorité des tactons directionnels statiques sur les dynamiques dans une application. Les utilisateurs déficients visuels devaient se déplacer dans un labyrinthe avec un PHANToM Omni dans leur main dominante et une souris VTPlayer dans leur main non dominante. Le déplacement était contraint dans le labyrinthe via le PHANToM Omni. Les directions possibles étaient transmises via la souris avec des tactons statiques ou dynamiques que nous avons expérimentés précédemment.

2.2. Codage par retour d'effort : les PICOB

Au contraire du retour tactile, l'affichage de messages par le retour de force est très peu étudié. MacLean et Enriquez décrivent des expérimentations sur les paramètres utilisables pour des icônes haptiques ou « Hapticons » (MacLean et al., 2003). Ils ont utilisé un moteur à courant continu qui délivre des forces sur un axe en rotation : le signal envoyé peut se paramétrer en magnitude (amplitude de déplacement), en forme (signal sinusoïdal, carré, etc.) et en fréquence. Les études publiées montrent des tests utilisateurs où les participants devaient classer en catégories des icônes en utilisant des paramètres de leur choix. Il semble que le seul critère unanimement utilisé pour la classification est la fréquence. Leurs études se sont poursuivies autour de la notion de phonème haptique et de signification arbitraire (Enriquez et al., 2006). Un phonème y est défini comme des formes de signal simples à fréquence et amplitude constantes. Des mots haptiques ont été construits à partir de ces phonèmes par concaténation ou superposition. L'idée première était de tester l'association de ces mots à des significations arbitraires afin de connaître les limites de la compréhension de l'information. Les résultats ont montré qu'après un temps d'apprentissage de 25 minutes, l'association arbitraire était assimilée. Mais ces études sont basées sur un matériel spécifique non commercial.

Nous menons donc des investigations similaires dans le projet PICOB (Post-It haptiques par COdes-Barres) pour concevoir une forme générique de messages basés sur l'usage du retour de force avec un bras articulé à retour d'effort de type PHANToM. Nous nous sommes inspirés d'un codage bien connu, le code morse : il utilise deux digits pour coder les caractères alphanumériques. Pour afficher un message utilisant ce code il faut associer une représentation à chaque digit. Une représentation auditive courante est des bips longs et courts, et au niveau visuel des tirets et des points. Pour afficher le message « SOS » avec le codage morse il faut utiliser une de ses représentations. On obtient ● ● ● — — ● ● ●. Avec une représentation haptique basée sur des impulsions, le codage utilisé serait le même mais sa représentation serait alors ↓ ↓ ↓ ↑ ↑ ↑ ↓ ↓ ↓. En nous basant sur cette notion d'impulsions nous avons imaginé deux sortes de PICOB : guidés et semi-guidés. Dans les deux modes, nous pouvons utiliser des impulsions dans les six directions (figure 3).

En mode guidé, l'utilisateur est passif, il reçoit directement les impulsions du système qui le fait toujours revenir au point de départ. Le point de départ est le point à partir duquel le PICOB guidé a été déclenché. Une expérimentation préliminaire a montré que la discrimination de direction était triviale malgré l'usage de trois amplitudes différentes (Pietrzak *et al.*, 2005b). Par contre pour l'amplitude, la discrimination parmi trois amplitudes a posé problème. Au-delà d'un apprentissage ou d'une meilleure adaptation à chaque utilisateur (personnalisation), il apparaît que deux amplitudes soient mieux adaptées.

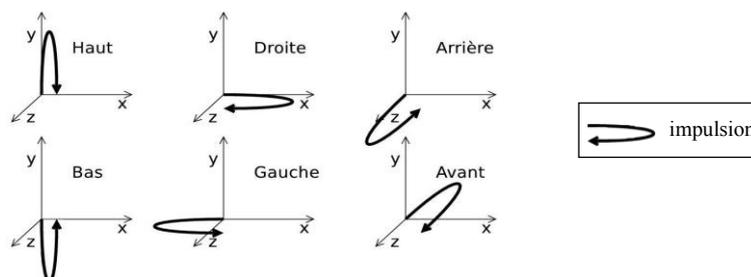


Figure 3. Impulsions dans six directions différentes.

En mode semi-guidé, l'utilisateur ressent des impulsions d'amplitudes et de directions différentes alors qu'il est contraint sur un axe (Pietrzak *et al.*, 2005a). C'est le déplacement de l'utilisateur qui induit le ressenti de l'impulsion alors qu'en mode guidé, l'utilisateur n'agit pas. Une étude préliminaire a été réalisée sur un axe horizontal avec quatre directions d'impulsion. Nous n'utilisons pas les directions « gauche » et « droite » car elles sont dans l'axe d'évolution de l'utilisateur. Les résultats montrent que la discrimination de direction est aisée malgré l'usage de deux ou trois amplitudes différentes. Par contre pour l'amplitude, la discrimination de plus de deux amplitudes pose problème.

À partir de ces résultats, nous avons examiné la reconnaissance de séquences d'impulsions (Pietrzak *et al.*, 2006a). Les séquences proposées sont indiquées sur la figure 4. Les résultats ont révélé des ambiguïtés à cause d'un manque de référence. Par exemple la séquence « haut-bas-haut » (séquence 6) peut être confondue avec la séquence « haut-haut » (séquence 2) : avec l'absence de « porteuse », le « bas » peut être confondu avec le retour du premier « haut » et l'aller du second. Ne pas utiliser ces codes ambigus ou introduire un « blanc » pouvant servir de porteuse entre deux impulsions devrait faire baisser le taux d'erreurs.

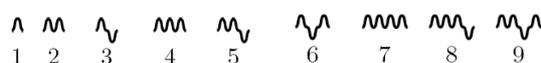


Figure 4. Les séquences d'impulsions testées.

3. L'application d'exploration de schémas de circuits électriques

L'enquête sur les besoins des enfants déficients visuels menée dans le cadre du projet MICOLE a montré un manque d'outils informatiques pour permettre la reconnaissance de schémas. De plus, l'autonomie est souvent souhaitée ainsi que la

collaboration entre enfants sans différence dans l'utilisation des outils. Nous avons choisi de développer une application couvrant ces différents aspects : la reconnaissance de schémas de circuits électriques. L'application a fait l'objet d'une démonstration dans (Pietrzak *et al.*, 2007a). Les circuits se limitent dans notre expérimentation à des composants simples : pile, lampe et résistance.

Nous avons choisi de ne pas tester le retour sonore dans notre application car nous voulons nous concentrer sur les possibilités haptiques contrairement au projet TeDUB présenté précédemment. De plus le retour sonore peut être perturbant en situation réelle dans une salle de classe. Notre application utilise le système de codage haptique de l'information présenté dans la partie 2 : pour le retour tactile, nous avons utilisé la souris VTPlayer et pour le retour d'effort le PHANToM Omni. Les deux mains de l'utilisateur sont sollicitées sans coordination nécessaire. Comme le PHANToM est utilisé pour parcourir le circuit contrairement à la souris VTPlayer, il est donc affecté à la main dominante. La souris VTPlayer reste pour la main non dominante. Afin d'illustrer les capacités collaboratives de l'application, il est possible à deux utilisateurs d'interagir : le premier représente l'utilisateur déficient visuel et le second l'utilisateur voyant qui a pour rôle d'aider le premier.

3.1. Usage de la multimodalité

Pour définir la multimodalité dans notre application, nous utilisons la définition classique d'une modalité par le couple <d,l> où d est le périphérique et l le langage d'interaction utilisé (Nigay et Coutaz, 1995). En entrée, l'utilisateur déficient visuel explore les circuits avec un PHANToM, et le second utilisateur l'explore avec une souris conventionnelle. L'application devient multimodale du point de vue des sorties (table 1). Les modalités de sortie permettant de réaliser les tâches principales de l'application y sont représentées.

Tâches et sous tâches	Modalités en sortie
Reconnaître un composant	<écran, affichage 2D> <PHANToM, PICOB semi-guidés> <VTPlayer, tactons statiques>
Reconnaître la forme du circuit	<écran, affichage 2D> <PHANToM, attraction > <écran, guidage> <PHANToM, guidage>
Reconnaître les directions possibles	<écran, affichage 2D> <PHANToM, PICOB guidés> <VTPlayer, tactons dynamiques>
Reconnaître les zones déjà parcourues	<écran, code couleur> <PHANToM, PICOB guidé>
Localiser les utilisateurs	<écran, attraction> <PHANToM, attraction> <PHANToM, guidage>

Table1. Les modalités en sortie.

Les objectifs que nous nous sommes fixés sont maintenus avec la liste des modalités présentées. D'une part, la communication avec les enfants déficients visuels est favorisée puisqu'à chaque modalité visuelle est proposée au moins une modalité haptique. D'autre part, l'approche multimodale décrite doit permettre de faciliter la communication entre enfants déficients visuels et voyants (autres enfants et enseignants). Un guidage automatique est mis en place pour permettre à un enfant de travailler en collaboration avec soit un enseignant, soit un enfant voyant. L'avantage ici est de pouvoir offrir le même support de communication, même si les enfants n'utilisent pas la même modalité en sortie. De plus, l'approche multimodale tient compte de la diversité des enfants déficients visuels en favorisant la redondance d'informations. Par exemple, les composants sont donnés sous forme visuelle, tactile et de retour de force.

Si nous nous basons sur les propriétés CARE (Coutazet *al.*, 1995), les langages proposés pour une même tâche sont redondants si l'on ne considère pas l'état de l'utilisateur. En effet, pour un utilisateur aveugle, il peut y avoir assignation dans certains cas. Par exemple, le langage d'interaction d'attraction est assigné à la tâche de reconnaissance de la forme du circuit avec une durée permanente et une portée partielle. Avec un utilisateur voyant, les langages d'affichage 2D et d'attraction sont redondants avec une durée permanente et une portée partielle. Il faut noter que quel que soit l'utilisateur, le langage de guidage vient s'ajouter pour une durée temporaire, ce qui donne une relation de redondance avec les autres langages dans un contexte très précis. Les dispositifs, quant à eux, sont soit équivalents pour un langage donné, soit assignés. Ainsi, le PHANToM et l'écran sont non seulement équivalents pour le langage d'attraction mais aussi pour le langage de guidage. Par contre, le PHANToM est assigné au langage d'interactions PICOB, tout comme la souris VTPlayer au langage d'interactions Tactons.

Nous présentons plus en détails les tâches mentionnées ci-dessus.

3.2. Localiser les utilisateurs

La première tâche consiste à donner la possibilité aux utilisateurs de se repérer. Selon les tâches, un utilisateur peut se déplacer sur le circuit avec le PHANToM ou avec la souris classique. L'écran permet de connaître leur position : une boule jaune pour le premier et une boule rouge pour le second. Ces repères visuels ne sont pas les positions réelles des utilisateurs, mais des projections sur le circuit. Il s'agit d'attractions réalisées pour garantir le déplacement sur le circuit. Ces repères ne sont utiles que pour les utilisateurs voyant ou ayant encore une forte vision résiduelle. Par contre, l'utilisateur déficient visuel qui utilise le PHANToM pour se déplacer peut obtenir des informations sur sa position avec l'attraction que ce périphérique opère afin de contraindre l'utilisateur sur le circuit. Nous n'avons pas souhaité surcharger l'environnement, qui contient déjà beaucoup d'informations. L'utilisateur déficient visuel ne possède donc ni de moyen direct de connaître sa position ni celle du second utilisateur. Cependant lorsque le guidage du PHANToM par la souris est

activé, le premier utilisateur est attiré par la position du second et a donc une idée de la direction où il peut se trouver.

3.3. Reconnaître un composant

L'application se veut simple, et ne comporte que trois composants électriques : la pile, la résistance et la lampe. Nous ajoutons deux objets : les fils et les nœuds. Les fils sont les portions de circuit sans composant, et les nœuds permettent de relier les fils et les composants entre eux.

Trois modalités ont été utilisées pour représenter les composants. Premièrement nous avons utilisé une représentation visuelle basée sur les symboles standards, issus des métaphores du monde réel. L'intérêt de cette représentation est double. D'une part certains utilisateurs déficients visuels possèdent une vision résiduelle, et dans la plupart des cas ils souhaitent s'en servir. D'autre part l'application est conçue pour être utilisée à la fois par des utilisateurs déficients visuels, et par des utilisateurs sans problème de vision.

Deuxièmement nous avons utilisé des séquences de PICOB semi-guidés (figure 5). Comme le PHANToM est utilisé pour parcourir le circuit, il convient de définir les différents plans utilisés pour le circuit et les PICOB. Le circuit est représenté dans le plan horizontal. L'idée est de simuler le travail réel où le schéma est sur une feuille posée sur la table. Nous avons choisi de placer les PICOB orthogonalement au plan horizontal. Il s'agit de ne pas surcharger dans un même plan les connaissances transmises à l'utilisateur : dans un plan, il parcourt le circuit et obtient des informations sur le parcours et en dehors de ce plan, il obtient des informations sur la composition du circuit. L'application fournit deux niveaux d'exploration : un niveau global dans le plan horizontal pour reconnaître la forme du circuit et un niveau local orthogonalement à ce plan pour identifier les composants.

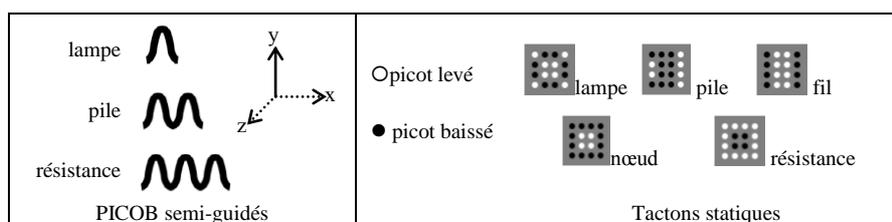


Figure 5. Représentations haptiques des composants.

Les tests préliminaires sur les PICOB semi-guidés ont permis d'identifier des difficultés à discriminer les amplitudes. De plus nous avons remarqué des ambiguïtés possibles dans des séquences combinant des impulsions opposées et une impulsion et son retour à la position neutre (figure 4, séquences 2 et 6). Nous avons donc choisi d'utiliser une seule amplitude et une direction (haut) dans les séquences. Les composants à représenter sont limités : pile, lampe et résistance. Il n'y a donc pas de problème pour choisir des codes (figure 5 à gauche). Les fils et les nœuds sont ressentis par contrainte sur le circuit, et n'ont donc pas besoin de PICOB. Une

simple contrainte sur les fils et dans un disque sur les nœuds pendant l'exploration permet à l'utilisateur de savoir qu'il est sur le circuit. Un codage de type PICOB n'est pas nécessaire et risquerait de perturber les déplacements.

Troisièmement nous avons utilisé des tactons statiques sur la VTPlayer en utilisant la matrice de picots sous l'index pour représenter les composants, les fils et les nœuds (figure 5 à droite). Les motifs ont été choisis par analogie avec la représentation visuelle, car ces symboles sont utilisés sur les représentations classiques sur papier en relief. L'évaluation de la reconnaissance de ces tactons s'est faite de manière informelle. L'évaluation finale de l'application montrera si le codage est adapté ou pas.

3.4. Reconnaître la forme du circuit

La reconnaissance de la forme du circuit est une tâche importante pour la compréhension globale du circuit. Elle s'appuie tout d'abord sur une représentation visuelle formée des différentes parties du circuit : composants, fils et nœuds.

L'haptique a été utilisée de deux manières pour permettre à l'utilisateur de ressentir la forme du circuit. Tout d'abord, le PHANToM est attiré vers le circuit grâce à une force de type ressort. Ainsi l'utilisateur reste en permanence en contact avec le circuit, tel que le précise (Sjöström, 2002) dans ses recommandations sur l'usage de l'haptique dans les interfaces pour déficients visuels.

Nous avons ensuite ajouté deux systèmes de guidage, pendant lesquels la représentation des composants est suspendue. Le premier guidage est un système basé sur la métaphore du magnétophone. Un utilisateur peut enregistrer un parcours avec le stylet du PHANToM. Ce parcours enregistré peut ensuite être rejoué par lui-même ou par un autre utilisateur. Le stylet du PHANToM est attiré le long du parcours enregistré. L'utilisateur doit se laisser guider. Il peut toutefois revenir en arrière ou changer de parcours pendant le guidage automatique ; le système garantit qu'il pourra revenir sur le chemin enregistré. Une attraction de type ressort est calculée, et est combinée à l'attraction sur le circuit.

Le second guidage est effectué en temps réel. Il renforce la communication entre deux utilisateurs : l'un est considéré comme le guide, l'autre comme l'apprenant. Le guide, supposé voyant, utilise une souris standard et l'apprenant le PHANToM pour parcourir le circuit. Le guide parcourt le circuit et l'apprenant est automatiquement attiré vers la position du guide.

La reconnaissance de la forme globale du circuit est une tâche difficile lorsqu'elle est réalisée de manière non visuelle. Nous avons donc créé deux sous-tâches pour aider l'utilisateur à se repérer dans le circuit. La première consiste à savoir dans quelles directions il peut se déplacer, et la seconde à savoir dans quelle direction il est déjà allé.

3.4.1. Reconnaître les directions possibles

À tout moment l'utilisateur peut demander de l'aide au système pour savoir dans quelles directions il peut se déplacer. De manière visuelle cette information correspond à la portion de circuit affichée autour du curseur jaune, représentant la projection du PHANToM sur le circuit.

L'utilisateur peut aussi cliquer sur le bouton du PHANToM pour recevoir des informations de manière redondante, codées à l'aide des techniques d'interaction décrites ci-dessus. Une séquence de PICOB guidés indique les directions possibles (figure 6, à gauche). Si l'utilisateur est sur un fil ou sur un composant, les impulsions ont pour direction les deux extrémités. Si par contre il est sur un nœud, les directions représentent les directions des fils et des composants adjacents à ce nœud.

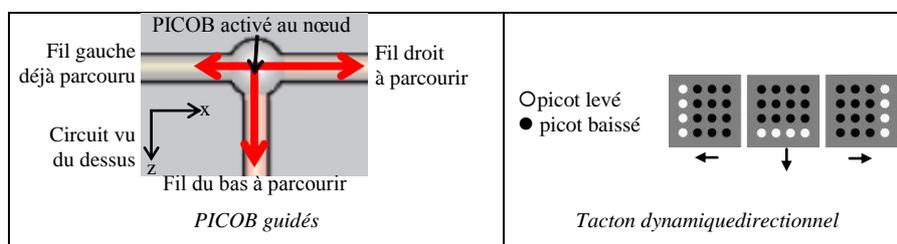


Figure 6. Informations directionnelles haptiques.

Les mêmes informations directionnelles sont affichées sur la souris VTPlayer sous forme de séquences de tactons (figure 6, à droite). Afin de limiter les désavantages des tactons dynamiques, nous avons augmenté le temps de présentation de chaque direction afin que l'utilisateur puisse les parcourir comme des tactons statiques. L'idée est d'afficher, à la demande de l'utilisateur, les directions qu'il peut prendre en tout point du circuit. Les motifs choisis sont ceux utilisés pour nos tests préliminaires sachant que nous n'avons pas eu besoin d'utiliser les directions diagonales sur nos schémas (figure 2). Ainsi, à la demande de l'utilisateur, les motifs correspondants aux directions possibles se succéderont sur la matrice créant un tacton dynamique pour indiquer les chemins à l'utilisateur.

3.4.2. Reconnaître les zones déjà parcourues

De manière complémentaire à la tâche précédente, il est intéressant pour l'utilisateur de savoir quelles sont les directions qu'il a déjà explorées. Ces informations lui sont fournies en même temps que les informations de direction. Visuellement, l'objet actuellement survolé par le PHANToM est mis en surbrillance. De plus les objets déjà parcourus sont foncés alors que les objets non parcourus sont plus clairs. Ces informations permettent par exemple à un second utilisateur de donner des indications à l'utilisateur déficient visuel. De couleurs plus adéquates seront étudiées prochainement afin de permettre aux utilisateurs à vision résiduelle de les utiliser plus facilement.

L'information selon laquelle l'objet a déjà été parcouru ou non est donnée à l'aide de l'amplitude des PICOB guidés codant les directions voisines possibles (cf. 3.4.1). Une petite amplitude signifie que l'objet a déjà été parcouru, alors qu'une grande amplitude signifie que l'objet n'a pas encore été parcouru. Les amplitudes utilisées sont issues des expériences préliminaires sur les PICOB évoquées précédemment.

4. Expérimentation

4.1. Objectifs

L'objectif premier de cette expérimentation était de mesurer les performances des participants lors du premier usage de l'application. Nous laissons l'étude plus précise de l'apprentissage à un travail ultérieur. Lors de ce premier usage, nous désirons mesurer les performances des participants à plusieurs niveaux :

- reconnaissance des formes de circuit.
- reconnaissance des composants.

L'application est à la base collaborative sur le principe enseignant/apprenant. Il apparaissait important de mesurer l'impact de l'enseignant sur les performances du participant. Aussi, l'expérimentation a été faite selon deux conditions : avec et sans aide de l'enseignant. Le but n'étant pas de tester les techniques d'interactions, qui ont déjà été évaluées lors d'études précédentes, mais bien de tester l'application en conditions réelles, les utilisateurs possédant une vision résiduelle pouvaient utiliser cette vision résiduelle pour accomplir les tâches s'ils le désiraient.

Enfin, nous désirons évaluer l'usage de la multimodalité. L'observation des tests et un questionnaire post-expérimentation nous permettront d'évaluer les modalités les plus utilisées ainsi que leur cadre d'usage. Tout au long de l'expérimentation, chaque participant est libre d'utiliser la modalité qu'il désire.

4.2. Participants

Treize enfants déficients visuels âgés de 9 à 17 ans ont pris part aux tests (table 2). Dix enfants possédaient une vision partielle et trois étaient aveugles. Parmi les trois enfants aveugles, deux l'étaient de naissance. Deux enfants présentaient une légère déficience mentale, ce sont les participants 12 et 13 de la table 2.

Certains participants connaissaient déjà le PHANToM et la souris VTPlayer car ils avaient déjà participé à de brefs tests antérieurs. Certains participants avaient déjà utilisé des périphériques haptiques essentiellement à travers des jeux : joystick vibrant, joystick et volant à retour d'effort.

Tous les participants connaissaient les circuits électriques, les piles et les lampes. Six participants (1, 2, 3, 4, 12 et 13) ne connaissaient pas les résistances.

n°	Âge	Vision OG/OD ou globale en dioptries	Connaissances haptiques
1	9	5	joystick vibrant
2	11	0,05 / 0,2	PHANToM, VTPlayer, joystick vibrant, joystick et volant à retour de force
3	11	2	PHANToM, VTPlayer, joystick vibrant, joystick et volant à retour de force
4	11	2	PHANToM, VTPlayer
5	13	0,05	joypad vibrant, joystick à retour de force
6	14	1 / 4,5	joypad vibrant, joystick à retour de force
7	15	0 / 0,1	joystick vibrant
8	16	1,4 / 2,4	joystick vibrant
9	16	2 / 0,5	joystick vibrant, joystick à retour de force
10	17	0,5 / 0,1	PHANToM, VTPlayer, lis le Braille
11	17	Aveugle de naissance	PHANToM, clavier Braille, lis et écrit le Braille
12	17	Aveugle de naissance	Lis le Braille, papier en relief, machine Perkins
13	17	Aveugle	Lis le Braille, papier en relief, machine Perkins, joystick vibrant, joystick et volant à retour de force

Table 2. *Les participants.*

Les participants provenaient de trois institutions différentes :

- Ecole primaire Saint Eucaire à Metz (participants 1, à 4).
- Lycée Robert Schumann à Metz (participants 5 et 6).
- Centre Santifontaine à Nancy (participants 7 à 13).

Les tests de l'école primaire Saint Eucaire et du lycée Robert Schumann ont été réalisés à l'école. Par contre les enfants ne sont pas toujours présents dans l'enceinte du centre Santifontaine. Aussi, nous avons réalisé quatre tests à la maison, les trois derniers étant réalisés au centre. Tous les enfants suivent une scolarité intégrée en classe avec des enfants voyants sauf les trois enfants pour lesquels les tests ont été réalisés au centre Santifontaine. Les tests ont été réalisés à l'école, au lycée ou au centre durant les horaires de classe. Par contre les tests à la maison ont été réalisés hors période scolaire.

4.3. Méthodologie

L'aspect collaboratif a été mesuré en utilisant deux conditions d'exploration :

- condition 1 : le participant utilise l'application pour explorer un circuit sans aucune assistance de la part de l'enseignant.
- condition 2 : le participant utilise l'application pour explorer un circuit avec l'assistance de l'enseignant. Cette assistance se fait à l'initiative du participant ou de l'enseignant mais toujours avec l'accord du participant.

L'enseignant peut aider le participant en lui indiquant ses erreurs après avoir reçu ses réponses. Il peut aussi lui rappeler les consignes, et en particulier les représentations de chaque composant.

Les circuits testés utilisent les 3 composants électriques présentés plus haut. Nous avons restreint les formes de circuits à trois formes simples indiquées dans la figure 7. Il n'était pas demandé de distinguer le carré du rectangle. Nous avons volontairement simplifié la tâche car des tests précédents ont montré qu'elle est non triviale pour des utilisateurs non voyants (Pietrzak *et al.*, 2006b).

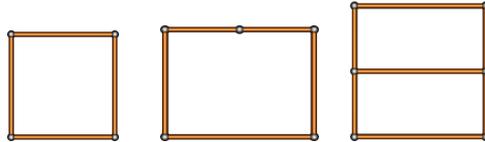


Figure 7. Les trois formes de circuits.

Nous avons conçu 7 circuits en se basant sur les trois formes précédentes, et en utilisant les 3 composants (figure 8). Nous avons aussi créé un circuit d'apprentissage, qui possède les trois composants, et des intersections à trois directions possibles afin de pouvoir expliquer les différents systèmes de guidage aux utilisateurs.

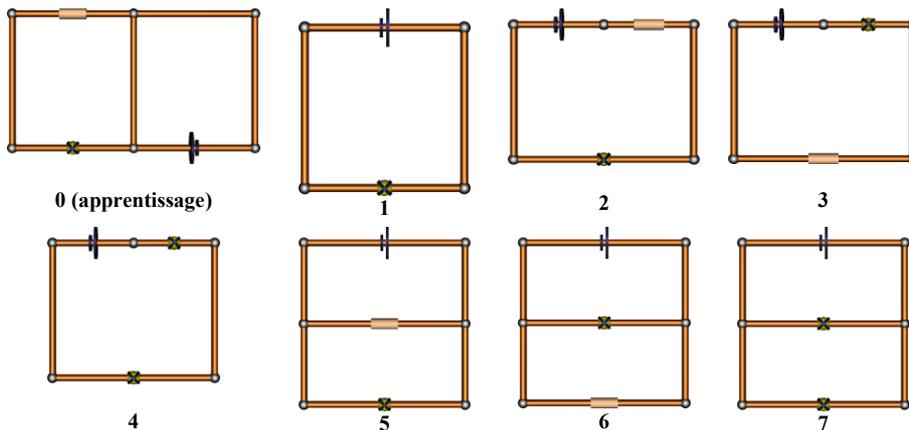


Figure 8. Les circuits proposés à l'exploration.

L'affichage s'appuie sur écran 17" 16/10 avec une résolution de 1920x1600 pixels. Pour chaque participant, unPHANToM Omni et une souris VTPlayer sont attachés au système. La souris VTPlayer n'est utilisée que comme afficheur, et pas comme un périphérique de pointage. L'enseignant utilise une souris ordinaire pour l'assistance.

La figure 9 montre une situation typique d'expérimentation. L'enseignant et le participant peuvent se servir du retour visuel. Par contre seul le participant peut utiliser le retour haptique avec sa main dominante (PHANToM) et sa main non dominante (VTPlayer).



Figure 9. *Le contexte d'expérimentation, un participant et l'enseignant.*

Pour chaque expérimentation, toutes les actions du participant et de l'enseignant sont enregistrées et après accord signé, une vidéo est conservée. L'hétérogénéité des participants ne permet pas de dégager de statistiques significatives, c'est pourquoi nous adopterons une analyse qualitative.

4.4. Procédure

Chaque participant commence par remplir un premier questionnaire préliminaire. L'expérimentateur qui joue le rôle de l'enseignant explique les objectifs de l'expérimentation. Ce sera le même pour tous les tests.

Le test commence par une phase de prise en main du matériel, le PHANToM et la souris VTPlayer. L'expérimentateur explique les caractéristiques des périphériques et comment les utiliser. À ce stade, des programmes de démonstration sont utilisés. Pour la souris VTPlayer, il s'agit d'un programme faisant ressentir des icônes directionnelles. Pour le PHANToM, il s'agit du programme Dice (Sensable, 2008) et de divers programmes de démonstration de l'APIReachin (Reachin, 2008). Cette phase dure environ 10 minutes jusqu'à ce que l'enfant se sente prêt à utiliser les périphériques.

Un premier circuit électrique correspondant au circuit 0 de la figure 8 est présenté afin de familiariser chaque enfant avec l'exploration d'un circuit et avec la représentation de tous les composants avec les tactons et les PICOB. Il est précisé que le bouton du stylet sur le PHANToM peut être utilisé à tout moment pour obtenir de l'aide sur les directions de déplacements possibles (avec les tactons et les PICOB). L'expérimentateur montre un exemple de guidage à l'aide de la souris. Avant le guidage, il est rappelé qu'il faut tenir fermement le PHANToM afin de se prémunir contre toute blessure. Le guidage par enregistrement n'a pas été testé dans notre expérimentation.

Pendant cette phase d'apprentissage, l'enfant peut poser autant de questions qu'il le désire à propos des composants ou de la navigation jusqu'à ce qu'il se sente à l'aise tant du point de vue de la navigation dans le circuit que sur la reconnaissance

des composants avec les tactons et les PICOB. Cette phase d'apprentissage dure entre 5 et 10 minutes.

La procédure de test commence à l'issue de la phase de prise en main. Chaque participant explore aléatoirement six circuits, tous différents, parmi ceux de la figure 8 (circuits 1 à 7). Les deux conditions sont utilisées alternativement entre les participants et entre les circuits.

Au cours de l'exploration, il est demandé à chaque participant de :

- dire le nom d'un composant lorsqu'il passe dessus.
- indiquer la forme du circuit.
- tenir compte du temps afin de réaliser la tâche dans un temps raisonnable.

À la fin de l'expérimentation, le participant doit remplir un questionnaire. La table 3 liste les questions posées.

Les composants sont difficiles à identifier.	Réponses sur une échelle de 1 (pas d'accord) à 4 (d'accord)
Il est difficile de parcourir les circuits en entier.	
Le fait d'être contraint sur le circuit aide à parcourir les circuits.	
Le guidage du PHANToM par la souris n'aide pas à parcourir les circuits.	
Les tactons dynamiques aident à parcourir les circuits.	
Les tactons sont difficiles à reconnaître.	
J'ai réussi à identifier tous les composants.	
Les tactons statiques sont plus utiles que les PICOB semi guidés pour identifier les composants.	
La présence de l'enseignant aide à mieux comprendre le circuit.	
La méthode traditionnelle permet de mieux comprendre des schémas de circuits électriques.	

Table 3. *Questionnaire post-expérimentation.*

4.5. Résultats

Tous les participants ont réalisé les tâches demandées même si certains ont fait des erreurs aussi bien en reconnaissance de formes qu'en reconnaissance de composants. Certains participants (essentiellement ceux possédant une vision partielle) ont exploré très rapidement les circuits et n'ont pas pris plus de 15 minutes pour reconnaître les six circuits. Les plus lents ont demandé entre 20 et 30 minutes pour terminer (participants 12 et 13). Ces deux derniers participants étaient très nerveux pendant les tests.

Les résultats décrits dans la suite tiennent compte des manipulations réalisées par les participants, de leurs résultats quant aux reconnaissances qu'ils ont effectuées, mais aussi des réponses au questionnaire post-expérimentation présenté dans la table 3.

4.5.1. Exploration et reconnaissance des formes des circuits

La table 4 résume les résultats en ce qui concerne la reconnaissance de formes. Pour chaque participant, on indique les six circuits parcourus. Une case grisée

dénote une erreur de reconnaissance : la réponse fautive est précisée ainsi que les parties de circuit non parcourues si c'est le cas.

Sans surprise, les enfants possédant une vision partielle n'ont rencontré aucune difficulté à ce niveau. La raison est que la plupart des enfants ont utilisé cette vision partielle pour explorer les circuits. Ils n'ont pas utilisé les aides de navigation haptique ; ils n'ont pas fait d'erreurs en ce qui concerne la forme des circuits et ils ont tous eu le sentiment qu'il était facile d'explorer les circuits complètement. Certains ont même donné la forme du circuit avant de l'explorer en totalité. Seul le participant 10a déclaré ne pas vouloir utiliser sa vision résiduelle. Il a fait une erreur sur six : il a ressenti deux carrés l'un à côté de l'autre à la place de deux rectangles l'un au-dessus de l'autre.

Par contre les participants aveugles ont eu de sérieuses difficultés dès lors que le circuit était plus compliqué qu'un simple carré. Parfois ils n'ont pas exploré les circuits en totalité, parfois ils ont rencontré des difficultés à raccorder des parties explorées. Si le participant 11 n'a fait que deux erreurs, les deux autres enfants aveugles (12 et 13) ont seulement reconnu le circuit de forme carrée. À chaque circuit ils déclaraient reconnaître un carré. Ils n'ont pas réussi à parcourir en totalité la moitié des circuits. La légère déficience mentale a certainement joué un rôle défavorable. Dans le questionnaire post-expérimentation, ils ont tous les deux trouvé le parcours difficile. Par contre, le troisième enfant aveugle (11) n'a pas eu ce sentiment bien qu'il se soit trompé sur 2 circuits. Il est vrai que l'erreur commise dans la reconnaissance d'au moins un circuit est limitée car la solution proposée était très proche du résultat.

session n°	1	2	3	4	5	6
1	3	6	2	5	1	4
2	5	1	4	7	3	6
3	7	3	6	2	5	4
4	3	6	5	1	4	7
5	5	1	4	7	3	6
6	1	4	7	3	5	2
7	4	6	1	3	5	7
8	4	7	3	6	5	1
9	6	1	3	5	7	4
10	3	5/deux rectangles côte à côte	7	2	4	6
11	4	6/rectangle	1	3	5/deux rectangles l'un dans l'autre	7
12	3	6/carré sans explorer la lampe	2/carré sans explorer la résistance	5/carré sans explorer la lampe	1	4/carré sans explorer la lampe
13	5/carré sans explorer la pile	1	4/carré sans explorer la lampe du dessus	7/carré sans explorer la pile	2	6/carré

Table4. Numéro des circuits explorés par utilisateur pour chaque session: une case grisée indique une réponse erronée précisée à droite du numéro de circuit.

Bien que les PICOB guidés aient été activés, il semble que seul le participant 10 s'en soit servi réellement. Le participant 11 les a testés, mais n'a pas jugé que cette technique pourrait l'aider. Il faut noter que l'activation des PICOB guidés entraîne simultanément celle des tactons dynamiques. Les résultats du questionnaire post-expérimentation ont montré que les participants 4, 10, 11, 12 et 13 ont plutôt utilisé les tactons dynamiques aux jonctions pour obtenir des informations sur les directions possibles. Les participants 10, 12 et 13 ont trouvé cela utile. Pourtant, les résultats des participants 12 et 13 ne confirment pas cette utilité : cela ne les a manifestement pas aidés à parcourir en totalité les circuits. Le participant 11 qui est aveugle n'y a pas trouvé toute l'aide désirée. Pourtant il a toujours exploré les circuits complètement. Sa stratégie d'exploration consistait à toujours partir du coin en bas à gauche d'un circuit. Par contre, il a rencontré des difficultés à décrire la forme des circuits. Enfin, le participant 4 n'a pas trouvé les tactons dynamiques utiles même s'il n'a commis aucune erreur.

La plupart des participants trouvent que contraindre le déplacement sur le circuit facilite la reconnaissance. Deux enfants ne voient qu'un intérêt moyen, mais ils font partie de ceux qui ont la meilleure vision résiduelle.

4.5.2. Reconnaissance des composants

Globalement les enfants trouvent les composants faciles à identifier. La table 5 résume par participant son nombre d'erreurs en comparaison au nombre de réponses données.

n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Nombre de réponses	17	18	17	17	17	18	17	17	17	17	17	13	14
Mauvaises réponses	0	0	0	0	3	0	1	0	0	0	0	3	3

Table5. Nombre de réponses et de composants reconnus par participant.

Sans surprise, la plupart des enfants ayant utilisé leur vision les ont reconnus sans difficulté. Parmi les enfants aveugles ou n'ayant pas utilisé leur vision (participants 10, 11, 12 et 13), seuls les participants 10 et 11 n'ont fait aucune erreur. Les autres participants ont rencontré des difficultés à différents niveaux. La table 6 présente les types d'erreurs réalisés par ces participants.

Session Utilisateur	1	2	3	4	5	6
5	R/L L/R	R/L				
7		P/L				
12	L/R		R/L		R/L	
13	L/R P/L				L/R	

R = résistance
 L = lampe
 P = pile
 a/b = a reconnu
 b à reconnaître

Table6. Erreurs de reconnaissance des composants.

Le participant 5a rencontré des difficultés à mémoriser les noms des composants, en particulier la résistance. Cela s'est manifesté par une inversion dans le premier circuit entre résistance et lampe. Après le 3^{ème} circuit exploré, il a seulement compris qu'un composant était indiqué à la fois sur la souris VTPlayer et le PHANToM. À partir de ce moment, il a utilisé exclusivement les informations de la souris VTPlayer et n'a plus fait d'erreurs.

Le participant 7a reconnu une pile au lieu d'une lampe sur le circuit 6, le second exploré. Cependant, il a correctement senti une seule impulsion (la lampe) sur le PHANToM. On peut imaginer qu'il a confondu la signification des codes. Il a également hésité trois fois sur le circuit 4 (premier exploré) et une fois sur les deux circuits suivants (1 et 3). Mais à chaque fois, il a donné la bonne réponse.

Comme pour la reconnaissance de formes, les utilisateurs 12 et 13 ont rencontré de nombreuses difficultés. Ce sont d'ailleurs les seuls à l'avoir signalé dans le questionnaire post-expérimentation. L'utilisateur 13 a toutefois présenté le plus grand nombre d'hésitations. Sur le premier circuit exploré (circuit 5), il a reconnu une lampe à la place de la résistance. Pourtant, il a bien reconnu un carré sur la souris VTPlayer et deux impulsions sur le PHANToM. Il a également reconnu une pile à la place de la lampe alors qu'il avait reconnu une croix sur la souris VTPlayer et deux impulsions sur le PHANToM. Il a clairement eu des problèmes avec les PICOB semi-guidés. Nous lui avons demandé de se concentrer sur les tactons statiques pour reconnaître les composants. Il a également semblé avoir oublié la signification des formes, nous les lui avons rappelées. Après cela, il a hésité une fois par circuit et il a fait une erreur sur le circuit 2 (cinquième exploré). Les hésitations ont toujours porté entre la lampe et la résistance.

Sept participants (1, 2, 4, 7, 8, 11 et 13) ont préféré utiliser les PICOB semi-guidés plutôt que les tactons statiques pour identifier les composants. Il n'y a donc pas

de tendances qui se dégagent quant à la modalité préférée : certains préfèrent les tactons statiques et d'autres les PICOB semi-guidés. Les avis sont partagés, ce qui renforce l'idée de proposer des langages d'interaction complémentaires pour une même tâche.

4.5.3. Assistance

L'aide orale fournie par l'enseignant a été utile. En particulier, les participants 3, 9 et 13 avaient des difficultés à se rappeler les noms des composants et leur codification.

La plupart du temps, les participants n'ont pas eu besoin d'assistance. Les enfants ont toujours pris l'initiative durant l'expérimentation. Ils ont considéré cette expérimentation comme un exercice et la plupart du temps ils ont eu le sentiment de devoir réaliser la tâche seuls. Même en condition 2, en situation de difficulté, les participants 5 et 12 ont refusé l'aide proposée par l'enseignant. D'après le questionnaire post-expérimentation, la moitié des participants (3, 7, 9, 10, 11, 12 et 13) a apprécié l'aide de l'enseignant. Il est difficile de conclure car les enfants utilisant encore leur vision n'ont vraiment pas rencontré de difficultés nécessitant une intervention. Pourtant, ils préfèrent cette méthode d'exploration à la version traditionnelle sur papier.

Les participants aveugles (11, 12 et 13) ont rencontré des difficultés à explorer les circuits en totalité. Dans la condition 2, l'enseignant a dû leur conseiller de continuer l'exploration. Malgré cela, ils ont rencontré les difficultés de reconnaissance.

Le mode de guidage du PHANToM par la souris n'a été utilisé que par trois participants, à savoir 10, 12 et 13. Seul l'utilisateur 10 a trouvé cela utile bien qu'il possède une vision résiduelle.

4.5.4. Discussion

L'expérimentation menée confirme la diversité des personnes à besoins spécifiques. Chaque participant possède ses propres caractéristiques et il apparaît difficile voire impossible de généraliser. Chaque expérience permet de tirer un enseignement différent. Une remarque importante concerne l'aspect multimodal de l'application et la satisfaction des participants quant à l'usage de l'application. Il apparaît important de ne pas « frustrer » les enfants en supprimant le retour visuel. Seul un participant déficient visuel a annoncé vouloir se passer du retour visuel alors que la plupart des participants ont une déficience visuelle évolutive pouvant les amener à devenir aveugle. À l'usage, d'autres participants ont plus utilisé le retour haptique mais sans l'annoncer. À ce titre la moitié des participants a préféré le retour tactile au retour d'effort. La redondance des langages sur une même tâche donnée a permis aux participants de choisir sans contraintes la modalité préférée.

De la même façon le non usage du Braille a été apprécié par les enfants déficients visuels. En effet, avec certains participants, une réserve apparaît

rapidement dès lors que l'on parle de Braille : le fait de parler d'icône ou de dessin a levé toute réserve. À l'usage cela peut représenter une étape intermédiaire vers la pratique du Braille. À l'inverse, le participant 12 brailliste a été gêné par les tactons car il voulait les lire en Braille. Il convient dans certains cas, de tenir compte du Braille dans la conception des tactons ou de faire deux représentations différentes même si ce n'était pas l'objectif initial de notre application.

La reconnaissance des formes des circuits a posé problème à tous les participants aveugles ou n'ayant pas utilisé leur vision résiduelle. Le participant 11 qui a réalisé deux erreurs a mis en place une stratégie d'exploration basée sur un point de départ (référence) en bas à gauche. Ce point apparaît comme essentiel dans une version future de l'application. Nous envisageons de placer des balises haptiques, telles que proposées par (Wall et Brewster, 2004). Pour les participants 12 et 13, les erreurs se sont accompagnées de parcours partiels. Ils ont pourtant utilisé les tactons dynamiques censés les aider dans le parcours. Malgré leur satisfaction à ce niveau, les résultats ne le confirment pas. Il est possible de douter de l'efficacité des tactons dynamiques en l'état actuel : la reconnaissance des directions était bonne mais cela n'a pas permis d'améliorer l'exploration de manière significative. Une amélioration à ce niveau est nécessaire voire un apprentissage. L'usage des PICOB guidés n'a pas fonctionné dans cette application. Seul le participant 6 les a vraiment utilisés. Nous pensons qu'un apprentissage plus long est nécessaire pour montrer leur utilisation auprès des participants.

La reconnaissance de composants a produit proportionnellement moins d'erreurs. La lampe fait toujours partie des erreurs, le plus souvent avec la résistance mais parfois avec la pile. Certains utilisateurs ont reporté que le tacton associé à la lampe était difficile à reconnaître. L'apprentissage n'était pas l'objectif premier de nos tests. Pourtant les participants qui ont fait des erreurs dans les premiers circuits ont fait moins d'erreurs dans les suivants après avoir acquis une certaine expérience dans l'usage des périphériques et surtout dans la reconnaissance des PICOB semi-guidés et des tactons statiques. Par exemple, le participant 9 a fait 3 erreurs de reconnaissance de composants dans les trois premiers circuits. Il s'est alors senti plus à l'aise avec les tactons pour reconnaître les composants. Par la suite, il n'a plus fait d'erreurs. Pour les participants 12 et 13, l'effet d'apprentissage n'a que très peu joué. Il apparaît que leur nervosité et la légère déficience mentale ont influé sur leurs résultats. Ce point est important car d'après les éducateurs, la déficience mentale est de plus en plus fréquente chez les enfants aveugles de naissance. Cet aspect est à prendre en compte avec notamment des périodes d'apprentissage plus longues et certainement des temps de sessions plus courts afin d'éviter un stress, une fatigue ou une excitation trop importante.

5. Conclusion et perspectives

Nos travaux avaient pour objectif d'explorer l'usage de l'haptique pour la codification de l'information. Les tests menés montrent qu'il est possible de le faire sous certaines conditions :

- en utilisant le retour tactile avec une souris VTPlayer.
- en utilisant le retour d'effort avec un matériel de type PHANTOM.

Ces résultats ont été utilisés dans une application plus importante d'exploration de schémas de circuits électriques. Les résultats sont encourageants. La multimodalité a montré tout son intérêt :

- la plupart des enfants qui possèdent une vision résiduelle ont préféré utiliser leur vision lorsque cela était possible. Un enfant a déclaré ne pas vouloir l'utiliser.
- la moitié des enfants a préféré utiliser le retour tactile alors que l'autre moitié a préféré utiliser le retour d'effort.

L'utilisation de la redondance multimodale a montré son efficacité dans cette application. Il serait cependant intéressant d'étudier d'autres formes de multimodalité telles que la complémentarité.

Toutes les erreurs ont été le fait des enfants n'ayant pas utilisé leur vision ou étant aveugles. De manière générale, l'absence d'un point de référence lors de l'exploration est pénalisante : les enfants avaient des difficultés à relier les différentes parties explorées. Un enfant ayant utilisé un point de référence implicite en bas à gauche du circuit a contourné ce problème et obtenu de bons résultats. Ce point devra être amélioré par exemple en permettant la pose par l'utilisateur de labels ou de points de référence. L'aide fournie aux nœuds n'a pas prouvé son efficacité tant au niveau des erreurs qu'au niveau de la satisfaction des enfants. Deux enfants possédant une légère déficience mentale ont montré les limites de l'application avec des résultats décevants sur la reconnaissance des formes des circuits.

Les enfants ont tous manifesté leur intérêt pour l'application, la jugeant plus facile à utiliser que les schémas sur papier en relief. Le non-usage du Braille pour la codification des composants a également motivé les enfants possédant une vision résiduelle.

L'expérimentation était conçue pour encourager l'aspect collaboratif. Pourtant les enfants ont pris la tâche comme un exercice et ont fortement limité l'usage de l'aide et donc du guidage automatique. Certains sont allés jusqu'à refuser l'aide proposée par l'enseignant. Ce point est à améliorer afin de rendre cette aide plus naturelle ou plus ludique.

6. Remerciements

Ce travail a été financé par le projet européen MICOLE (IST-2003-511592), la région Lorraine et la CA2M (Communauté d'Agglomération de Metz Métropole) à travers le projet PICOB. Nous tenons aussi à remercier Nicolas Noble et Jérôme Wax pour leurs contributions.

7. Références

- M. Benali-Khoudja, C. Orange, F. Maingreud, M. Hafez, A. Kheddar, and E. Pissaloux, « Shape and Direction Perception Using VITAL: A Vibro-TActiLe Interface », *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan, September 28 - October 2, 2004.
- S.A. Brewster, Providing a structured method for integrating non-speech audio into human-computer interfaces, Ph.D. Dissertation, Université de York, York, UK, 1994.
- L.M. Brown, S.A. Brewster, H.C. Purchase, « Multidimensional Tactons for Non-Visual Information Display in Mobile Devices », *MobileHCI*, Espoo, Finlande, 2006, ACM Press, p. 231-238.
- L.M. Brown, S.A. Brewster, H.C. Purchase, « A First Investigation into the Effectiveness of Tactons », *WorldHaptics*, Pise, Italie, 2005, IEEE Press, p. 167-176.
- A. Chang, C. O'Sullivan, « Audio-Haptic Feedback in Mobile Phones », *CHI*, Portland, Oregon, USA., 2005, ACM Press, p. 1264-1267.
- A. Crossan, S. Brewster, « Two-Handed Navigation in a Haptic Virtual Environment », *Extended Proceedings of CHI*, Montréal, Canada, 2006, p. 676-681.
- J. Coutaz, L. Nigay, D. Salber, A. Blandford, J. May, R.M. Young, «Four easy pieces for assessing the usability of multimodal interaction: the CARE properties», *INTERACT'95*, June 1995, pp 115-120,
- M. Enriquez, K. MacLean and C. Chita, « Haptic phonemes: basic building blocks of haptic communication », *ICMI '06*, Banff, Alberta, Canada, November 02 - 04, 2006, ACM, New York, NY, p. 302-309.
- J.B.F. van Erp, H.A.H.C. van Veen, « A Multi-purpose Tactile Vest for Astronauts in the International Space Station », *Eurohaptics*, Dublin, Irlande, 2003, p. 405-408.
- E. Hoggan, S.A. Brewster, « Crossmodal Spatial Location: Initial Experiments », *NordiCHI*, Oslo, Norvège, 2006, ACM Press, p. 469-472.
- M. Horstmann, C. Hagen, A. King, S. Dijkstra, D. Crombie, G. Evans, G. T. Ioannidis, P. Blenkhorn, O. Herzog, C. Schlieder, « TeDUB : Automatic interpretation and presentation of technical diagrams for blind people », *Conference and Workshop on Assistive Technologies for Vision and Hearing Impairment - CVHI'2004*, Granada, Espagne, 2004.
- Ivy. <http://www.tls.cena.fr/products/ivy/>, 2007.
- G. Jansson, P. Pedersen, « Obtaining geographical information from a virtual map with a haptic mouse », *22nd International Cartographic Conference*, thème "Maps for Blind and Visually Impaired", Coruña, Espagne, 2005, CD-ROM.
- Y. Kawai, F. Tomita, « Evaluation of interactive tactile display system », *International Conference on Computers Helping People with Special Needs*, 1998, p. 29-36,.
- K. E. MacLean, M. J. Enriquez, « Perceptual design of haptic icons », *Eurohaptics*, Dublin, Irlande, July 2003, ACM Press, p. 351-363.

- B. Martin, I. Pecci, T. Pietrzak, « Angle Recognition Cues using a new API dedicated to the VTPlayer Mouse », *HuMaN'07*, 12-14 Mars, Timimoun, Algérie, 2007, p.119-126.
- Micole, IST-2003-511592, <http://micole.cs.uta.fi>
- L. Nigay, J. Coutaz, « generic platform for addressing the multimodal challenge ». In *SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Denver, Colorado, United States, May 07 - 11, 1995.ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York, NY, 98-105.
- C. O'Sullivan, A. Chang, « An Activity Classification for Vibrotactile Phenomena », *Haptics and Auditory Interaction Design*, Glasgow, UK, 2006, LNCS, p. 145-156.
- J. Pasquero, V. Hayward, «STReSS: A Practical Tactile Display System with One Millimeter Spatial Resolution and 700 Hz Refresh Rate », *Eurohaptics 2003*, Dublin, UK, p. 94-110
- W. Penfield, T. Rasmussen, « The cerebral cortex of man », Macmillan, New York, 1950.
- T. Pietrzak, I. Pecci, B. Martin, « Un logiciel d'exploration de schémas de circuits électriques basés sur l'API MICOLE », *IHM 2007*, IRCAM, Paris, France, Novembre 13-15, 2007, ACM Press, p. 291-294.
- T. Pietrzak, B. Martin, I. Pecci, R. Saarinen, R. Raisamo, J. Järvi., « The MICOLE Architecture: Multimodal Support for Inclusion of Visually Impaired Children », *ICMI'07*, Nagoya, Japon, 12-15 Novembre, 2007. ACM Press, p. 193-200.
- T. Pietrzak, N. Noble, I. Pecci, B. Martin, « Evaluation d'un logiciel d'exploration de circuits électriques pour déficients visuel », *RJC-IHM'06*, Anglet, France, Novembre 12-15, 2006, 4 pages, publié sur CD-Rom (<http://perso.enst.fr/~afihm/rjc06/actes.html>)
- T. Pietrzak, I. Pecci, B. Martin, « Static and dynamic tactile directional cues experiments with VTPlayer mouse », *EuroHaptics 2006*, Paris, France, July 3-6, 2006, p. 63-68.
- T. Pietrzak, B. Martin, I. Pecci., « Information display by dragged haptic bumps », *ENACTIVE 05*, Gênes, Italie, Novembre 17-18, 2005, 4 pages, publié sur CD-ROM.
- T. Pietrzak, B. Martin, I. Pecci., « Affichage d'informations par des impulsions haptiques », *IHM 2005*, Toulouse, France, Septembre, 2005, ACM Press, p. 223-226.
- Reachin, <http://www.reachin.se>, 2008.
- R. Saarinen, J. Järvi, R. Raisamo, E. Tuominen, M. Kangassalo, K. Peltola, J. Salo, « Supporting visually impaired children with software agents in a multimodal learning environment. », *Virtual Reality*, Vol. 9 (2-3), Springer-Verlag London Ltd., 2006, p. 108-117.
- Sensible, <http://www.sensible.com/>, 2008.
- C. Sjöström, « Non-Visual Haptic Interaction Design - Guidelines and Applications », Ph D Thesis, Certec, Lund University, Sweden, 2002
- H.A.H.C. van Veen, J.B.F van Erp, « Tactile Information Presentation in the Cockpit », *1st International Workshop on Haptic Human-Computer Interaction*, LNCS, vol. 2058, 2000, p.174-181.

- C.R. Wagner, S.J. Lederman, R. D. Howe, « A Tactile Shape Display Using RC Servomotors », *Tenth Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, Orlando, Mars 2002.
- S. Wall, S. Brewster, « Feeling whatyouhear: tactile feedback for navigation of audio graphs », *CHI*, Montréal, Canada, 2006, ACM Press, p. 1123-1132.
- S. Wall, S. Brewster, « Providing External Memory Aids in Haptic Visualisations for Blind Computer Users », *International Conference Series on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies (ICDVRAT)*, New College, Oxford, UK, 20-22 September 2004, p. 157-164.
- M. Ziat, O. Gapenne, J. Stewart, C. Lenay, « Haptic recognition of shapes at different scales: A comparison of two methods of interaction », *Interacting with Computers*, 2007, 19 (1) p. 121-132
- S. Zipp-Rouzier, É. Petit, « Teaching geometry to visually impaired pupils using haptic and sound », *HCI*, Las Vegas, USA, juillet 2005, p. 3-9.