

Évaluation d'un prototype d'interface multimodale d'assistance en mathématiques

Silvia Fajardo Flores
EA 4004 – CHArt-THIM
Université Paris 8, France

Email : silvia.fajardo-flores@etud.univ-paris8.fr

Dominique Archambault
EA 4004 – CHArt-THIM
Université Paris 8, France

Email : dominique.archambault@univ-paris8.fr

Résumé—Notre travail concerne l'accès non visuel aux mathématiques. En nous basant sur une analyse des processus de résolution de problèmes algébriques chez des voyants et des non voyants, nous avons proposé des fonctionnalités d'assistance pertinentes dans un contexte pédagogique. Afin de valider ces propositions nous avons développé un prototype d'interface multimodale destiné à faciliter la saisie de contenus et la résolution d'équations, ainsi que la communication entre les voyants et les non voyants. L'interface utilise plusieurs modalités synchronisées : visuelle, audio et braille. Nous avons mené des tests d'utilisateur avec des élèves de lycée non voyants et des enseignants de mathématiques. Les tests avec les élèves ont montré que le prototype facilite la saisie et la manipulation d'expressions, et permet la communication directe élève-professeur. Un deuxième type de tests a été fait avec des enseignants de mathématiques familiarisés avec le travail avec des élèves non voyants et malvoyants, afin de vérifier la pertinence de l'interface comme outil de support dans le processus d'enseignement-apprentissage de l'algèbre dans un environnement intégré. Dans cet article nous nous concentrerons dans ces derniers tests.

I. INTRODUCTION

Les élèves non voyants et malvoyants qui apprennent les mathématiques dans un environnement scolaire intégré font face à des problèmes qui vont au-delà de la difficulté des mathématiques à proprement parler. [1] estime que le problème principal vient des modalités non visuelles d'accès aux contenus mathématiques, qui sont linéaires et ne donnent pas un accès direct à la structure des expressions, tandis que les représentations utilisées par les voyants sont bidimensionnelles et favorisent la compréhension de la sémantique mathématique contenue dans une expression. D'autre part cette différence essentielle entre les représentations utilisées par les personnes voyantes et non voyantes rend plus difficile la communication directe entre eux, par exemple entre un élève non voyant en intégration scolaire et son enseignant de mathématiques. Les documents écrits, exercices, devoirs ou examens, peuvent être transcrits par les centres de transcription chargés d'aider les élèves non voyants. Néanmoins dans ce cas la communication autour d'un document écrit ne peut être immédiate et cela rend l'apprentissage difficile, aussi bien du point de vue de l'élève que de celui de l'enseignant. Dans certains cas, les élèves peuvent bénéficier de l'aide d'auxiliaires de vie scolaire (AVS) pour un suivi personnalisé, mais ceux-ci n'ont en général pas de compétences spécifiques en mathématiques. De plus, les élèves ont besoin de suivre le discours oral du professeur qui, la plupart du temps, utilise le sens visuel des élèves. C'est le cas par exemple des références à la position des termes d'une

expression ou de leur indication par un geste sur le tableau.

Le travail de l'enseignant est un facteur important dans la réussite d'un élève, voyant ou non voyant, dans l'étude des mathématiques. L'enseignant crée des situations d'enseignement-apprentissage pour attirer l'attention de l'élève et l'orienter vers des objectifs à caractère mathématique [2]. Malheureusement, dans certaines cas la résolution de problèmes mathématiques est considérée comme une séquence de manipulations qui ont pour but de trouver un résultat. Si l'enseignant décide des méthodes pédagogiques qu'il veut employer, l'utilisation d'aides techniques pertinentes s'avère très importante pour la réussite des élèves non voyants intégrés dans une salle de classe.

L'objectif de ce travail est de proposer des fonctionnalités d'assistance à la saisie de contenus algébriques, à la manipulation de ces contenus en vue de résoudre des problèmes, et permettant une communication transmodale, permettant à des utilisateurs voyants et non voyants d'échanger directement dans un environnement multimodal, où chaque acteur peut utiliser la représentation mathématique à laquelle il est familier. Pour cela nous avons fait une première étude consistant à analyser la résolution de problèmes algébriques par des utilisateurs, voyants et non voyants, et notamment en relevant leurs intentions lorsqu'ils font des calculs. A partir de cette analyse nous proposons un ensemble cohérent de fonctions d'assistance pertinentes, susceptible d'apporter une aide dans le cadre d'un processus d'enseignement-apprentissage, c'est à dire que ces fonctions doivent aider la compréhension des processus et non faire les calculs à la place des élèves. Afin de valider ces propositions, nous avons développé un prototype d'interface pour faciliter la saisie de contenus algébriques, la manipulation de ces contenus et la communication entre des personnes voyantes et non voyantes. Notre prototype utilise ainsi plusieurs modalités de sortie synchronisées : visuelle, audio et braille.

Le prototype a été évalué selon deux protocoles distincts et complémentaires :

- 1) Un premier protocole, pratique, a été mis au point, faisant intervenir des élèves non voyants de lycée et des enseignants de mathématiques [3]. Cette évaluation était focalisée sur l'aide apportée pour la saisie, la compréhension et la résolution de problèmes d'algèbre, ainsi que sur la communication entre l'élève et l'enseignant. Les résultats étaient positifs en général : les élèves ont saisi des expressions algébriques

complexes, et résolu les problèmes proposés. Ils ont aussi saisi des expressions dictées par leur enseignant, qui a vérifié l'expression et corrigé quand c'était nécessaire.

- 2) Le second protocole impliquait quand à lui des enseignants de mathématiques familiarisés avec le travail avec des élèves non voyants. Le but de cette évaluation était de vérifier la pertinence de l'interface comme outil d'aide dans le processus d'enseignement-apprentissage de l'algèbre dans un environnement intégré.

Cet article porte plus particulièrement sur les évaluations effectuées dans le cadre de ce second protocole et en présente les résultats.

II. ÉTAT DE L'ART

Le problème de représentation et communication de contenus mathématiques entre personnes voyantes et non voyantes a fait l'objet de différents projets. Le projet NAT Braille [4] permet la transcription de documents vers le braille à partir de différents formats sources, et en particulier MathML. Pour faciliter l'accès aux études supérieures de mathématiques, différents projets portent sur la transcription de documents au format \LaTeX vers le braille ou des représentations audio. C'est le cas de LABRADOOR [5], qui propose la transcription de \LaTeX vers le code braille allemand Marburg ; du projet \LaTeX -access [6] vers le code Nemeth, et du projet PSLM (*Programme Spécialisé de Lecture Mathématique à l'usage des non-voyants*) qui produit une sortie audio en Français [7]. Le Math Genie [8] permet une visualisation synchronisée d'expressions selon des modalités visuelle et audio. D'autres projets portent sur les sorties audio d'expressions : comment utiliser la prosodie et des indices lexicales pour améliorer la compréhension [9], l'utilisation de sonification non verbale [10], ou les modalités de présentation dépendant de la complexité [11], [12], entre autres.

Ces outils peuvent proposer une aide efficace pour assister les élèves non ou mal voyants, soit parce qu'ils aident à produire des documents en braille, soit parce qu'ils améliorent la compréhension des expressions par les utilisateurs. Néanmoins l'accès et l'aide à la compréhension des expressions sont insuffisants et le challenge auquel il convient de faire face aujourd'hui consiste à proposer des outils permettant de faire des mathématiques, c'est à dire de manipuler ces contenus mathématiques et de réaliser des calculs, tout en permettant une communication entre les utilisateurs voyants et non voyants, afin que les élèves déficients visuels puissent travailler dans un environnement intégré avec leurs camarades de classes et avec leurs enseignants de mathématiques. Il existe des travaux qui portent sur ces possibilités : ChattyInfty [13], faisant partie du projet Infty, est un logiciel qui utilise une sortie visuelle et audio et permet l'édition de contenus. SensoMath [14] permet la saisie et la visualisation de contenus en braille vers le noir et vice versa. Le logiciel permet l'écriture braille via le clavier d'ordinateur et la plage braille. Les prototypes MAWEN [1] offrent une visualisation synchronisée entre visuel et braille, ainsi que l'utilisation d'assistants pour la manipulation et la résolution [15], [16] ; néanmoins, ces assistants ont été partiellement implémentés, et dans certains cas ils font des actions automatiques au lieu de l'élève, ce

qui n'est pas recommandé dans un logiciel pour l'apprentissage. Le logiciel LAMBDA [17] utilise une représentation linéaire d'expressions dans un code Braille propriétaire, qui par conséquent ne peut s'utiliser que dans l'éditeur LAMBDA. Cet éditeur permet la visualisation en noir des caractères du code LAMBDA, en utilisant une police graphique pour indiquer de façon visuelle la signification des symboles braille. Cette représentation linéaire n'est pas la représentation bidimensionnelle dont les voyants sont familiers, et leur demande un effort de compréhension. La visualisation bidimensionnelle est possible de façon asynchrone, avec l'hypothèse que l'expression possède une syntaxe correcte, mais cette visualisation ne permet aucune interaction. LAMBDA offre la possibilité d'éditer les expressions, et d'utiliser des fonctions de « compensation » tels que la visualisation partielle des expressions. La sortie braille utilise un code mathématique à 8-points, avec des dictionnaires de symboles différents pour chaque pays, inspirés des symboles utilisés dans les codes braille mathématiques nationaux, ceci afin d'en simplifier l'apprentissage.

Ces projets ont facilité la production et la communication de contenus ; la plupart d'entre eux sont des prototypes ou des logiciels partiellement implémentés. Actuellement, seulement LAMBDA et InftyReader/ChattyInfty sont couramment utilisés. Alors que ces logiciels permettent la représentation et l'exploration des contenus, les aides à la résolution sont limitées. Nous considérons qu'il est important d'offrir aux utilisateurs la possibilité d'éditer et de visualiser les contenus en utilisant chacun leur modalité préférée.

Notre démarche pour le développement de fonctionnalités d'assistance

Notre démarche a consisté à faire des propositions de fonctionnalités d'assistance basées sur une analyse des processus de résolution de problèmes algébriques à la fois chez des personnes voyantes et chez des personnes non-voyantes – élèves et enseignants –, ainsi que sur une analyse des processus d'apprentissage des concepts mathématiques, menée avec des enseignants de mathématiques, spécialisés dans l'enseignement aux élèves déficients visuels ou non. Ces fonctionnalités d'aide sont délicates à mettre en place car elles ne doivent pas « faire à la place » des élèves, mais au contraire les aider à comprendre les concepts sous-jacents aux opérations effectuées sur les expressions dans le cadre de calculs. Elles sont nécessaires pour compenser les limitations des modalités non visuelles par rapport aux modalités visuelles qui offrent toute une palette d'outils informels aux utilisateur, depuis leur utilisation comme mémoire auxiliaire, l'accès immédiat à la structure bidimensionnelle des expressions, permettant une compréhension de la sémantique mathématique plus rapide et plus efficace, jusqu'aux différents graffitis qu'on peut griffonner autour d'une expression lors de la résolution d'un problème (souligner, barrer, entourer, relier, dessiner des flèches, etc.). Ce sont ces possibilités étendues qu'offre la vision – et qui sont très utilisées par les voyants et constituent de fait un désavantage pour les non voyants – que nos fonctions d'assistance s'attachent à compenser.

Sur la base de cette analyse ainsi que des recommandations proposées par les enseignants de mathématiques impliqués, nous avons développé un prototype d'interface multimodale destinée faciliter le travail dans la salle de cours [18], nous

permettant d'implémenter ces fonctionnalités originales, dans un processus de développement centré utilisateur.

Un autre aspect essentiel est de faciliter la communication entre voyants et non voyants autour de contenus mathématiques. Pour cela nous utilisons différentes vues synchronisées du même contenu, basées sur des modalités visuelles, audio, tactile. Lorsqu'une expression est modifiée, les différentes vues sont mise à jour en temps réel. Les utilisateurs des différentes modalités ont la possibilité de désigner des éléments pour les montrer dans les autres modalités.

Une première version du prototype a été évaluée avec des élèves aveugles et malvoyants, dans un contexte d'intégration scolaire et avec des enseignants de mathématiques en milieu ordinaire. Cette évaluation nous a permis d'analyser les interactions entre les utilisateurs, voyants et non voyants, et les contenus algébriques, via l'interface multimodale, de raffiner les fonctions proposées, d'en éliminer quelques unes jugées non pertinentes, de proposer d'autres fonctions susceptibles de faciliter le travail sur les contenus mathématiques par des utilisateurs non voyants.

A partir de cette évaluation une seconde version du prototype a été développée et utilisée lors du second protocole d'évaluation, dont les résultats sont présentés dans cet article.

III. CARACTÉRISTIQUES DE L'INTERFACE

La version du prototype utilisée lors de cette seconde évaluation comprend l'édition d'équations algébriques contenant des puissances, des fractions et des racines carrées, tout en utilisant une sortie synchronisée visuelle, audio et braille. Les équations sont saisies en utilisant le clavier de l'ordinateur ou celui de la plage braille, selon le code à 6 points duquel les utilisateurs brailistes sont familiers. Elles sont visualisées de façon simultanée en noir, selon la représentation graphique bidimensionnelle classique. Les expressions sont présentées de la façon conventionnelle pour les malvoyants et les non voyants ; la saisie linéaire est également possible. La sortie braille produite d'après la représentation bidimensionnelle respecte les règles de mise en forme standard : par exemple en braille français, les termes x^2 et x^2 produisent la même sortie braille. Nous utilisons des délimiteurs de début et de fin de bloc, visibles sur la vue graphique, pour garder une correspondance visuelle avec le braille et l'audio.

La représentation en mémoire des expressions est un DOM MathML, qui est transformé en temps réel selon les éléments saisis. La validation des structures est prévue, de façon à ce que la saisie ne produise pas d'erreurs de syntaxe MathML.

Une lecture active d'expressions est possible par l'utilisation des flèches droite et gauche. L'utilisateur peut contrôler le degré de visualisation selon les niveaux de granularité dans l'arbre syntaxique de l'expression, ce qui peut présenter un avantage dans la lecture d'expressions longues. Dans la pratique cette notion de granularité signifie que des termes ou des sous expressions sont masqués et représentés par des blocs que nous appelons « sémantiques » parce qu'ils sont dénommés selon les éléments qui les composent, tels que : « Fraction », « Produit », « Membre ». Par exemple, la fraction $\frac{x(x-1)+2x}{\sqrt{x^2}}$ peut être présentée sous la forme $\frac{x(x-1)+2x}{\text{Dénominateur}}, \frac{\text{Produit}+2x}{\text{Dénominateur}}$, ou bien *Fraction*.

Concernant le style de lecture audio, utilisant une synthèse vocale, nous avons opté pour une lecture sans interprétation, sauf pour les blocs, pour lesquels le nom sémantique est lu. C'est à dire que l'expression $(x+1)(x-1)$ sera lue *parenthèse début, x plus un, parenthèse fin, parenthèse début...* sans indiquer qu'il s'agit d'un produit, laissant au lecteur le soin de faire cette interprétation. Par contre si cette expression est masquée, elle sera remplacée dans la lecture par le nom de l'étiquette que nous associons à son sous-arbre MathML *PRODUIT*.

Nous avons implémenté des fonctionnalités d'aide à la résolution par des fonctions auxiliaires qui peuvent être utilisées selon la tâche à développer ; comme on l'a vu plus haut, il ne s'agit pas de fonctions qui résolvent automatiquement les équations, mais de fonctions permettant de pallier aux limitations des modalités non visuelles. Notre prototype comprend la recherche d'éléments de l'expression, la recherche de termes semblables afin de faciliter la simplification d'une expression longue, ainsi que le placement et la suppression de marques pour faciliter la manipulation et le suivi des tâches. Par exemple le placement de marques peut être utilisé pour indiquer les termes qui ont déjà été traités, ce qui correspond à l'action de barrer le terme avec un crayon sur le papier. La sélection indépendante de la position du curseur est également possible, ce qui peut faciliter le repérage dans l'expression. La sélection et la copie simultanée d'éléments non contigus est une fonction implémentée dans notre prototype qui n'est pas offerte dans d'autres logiciels. Les résultats de la recherche sont indiqués visuellement par la couleur rouge, et de façon audio par un son qui accompagne la lecture du terme. On peut accéder directement aux résultats l'un après l'autre en utilisant des raccourcis clavier. En braille l'affichage des marques n'a pas encore été implémenté.

Les contenus peuvent être enregistrés dans des fichiers au format MathML pour les utiliser ultérieurement, par exemple pour les importer dans un document OpenOffice ou dans NAT Braille.

L'interface a été développée sur la plate-forme Mozilla, et Python pour le *back-end*. Nous utilisons le lecteur d'écran NVDA, avec des scripts pour personnaliser le fonctionnement des modules audio et braille sous Windows. Le prototype a été testé sur Windows XP, Vista, 7 et 8, et sur Mac OS X Snow Leopard (avec fonctionnalités audio limitées). La figure 1 présente l'interface sur Mac OS X Snow Leopard, sur laquelle un exemple d'expression est présenté dans les deux modalités visuelles, bidimensionnelle et linéaire.

IV. ÉVALUATION PAR DES ENSEIGNANTS DE MATHÉMATIQUES

Le protocole d'évaluation que nous avons suivi pour la seconde version du prototype est basé sur un « *Cognitive walkthrough* » avec des experts en l'enseignement des mathématiques aux élèves non voyants. Ce sont des utilisateurs potentiels et ils peuvent valider l'utilité de l'interface par rapport aux besoins en matière d'enseignement-apprentissage de l'algèbre.

Quatre enseignants de mathématiques ont participé à cette évaluation, parmi lesquels un non voyant, un malvoyant et deux sans déficience visuelle. Ils connaissent tous le braille

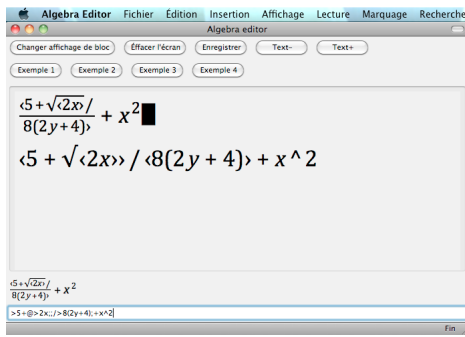


FIGURE 1. Expression d'exemple dans les formes bidimensionnelle et linéaire.

mathématique. Trois des enseignants ont participé dans l'évaluation de LAMBDA, qu'ils utilisent avec leurs élèves non voyants.

L'évaluation s'est déroulée en trois étapes successives :

A. Édition et visualisation de contenus

Dans la première étape, nous avons montré la méthode de saisie des exposants, des fractions et des racines dans les deux modalités, bidimensionnelle et linéaire, en utilisant le clavier de l'ordinateur et celui de la plage braille. Les enseignants ont observé la présentation des éléments en noir et en braille, ainsi que la sortie audio. Ils ont analysé la pertinence des délimiteurs visuels de bloc. Nous avons montré également la fonction d'exportation des contenus générés dans le prototype vers des fichiers MathML, et leur importation dans OpenOffice.

B. Visualisation par niveaux de l'arbre syntaxique

Les enseignants ont analysé ce type de visualisation sur l'interface et sur la plage braille, selon plusieurs niveaux de granularités.

C. Aides à la résolution

Nous avons un intérêt particulier à connaître l'opinion des enseignants par rapport à l'implémentation des fonctions auxiliaires, en particulier, la recherche de termes semblables, car cette recherche permet de trouver les termes que l'élève doit d'ordinaire chercher.

Chaque démonstration a été suivie par une discussion des avantages et des inconvénients de chaque aspect du prototype, et des recommandations pour son amélioration.

Pour ces démonstrations, nous avons utilisé un ordinateur PC avec le système d'exploitation Windows XP, NVDA pour la synthèse vocale, et une plage braille Papenmeier Braillex Trio. L'enseignant malvoyant a utilisé un ordinateur Macintosh OS X Snow Leopard et le zoom du système.

V. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats de l'évaluation ont été très positifs. Nous les présentons ci-dessous selon les étapes présentées précédemment.

A. Édition et visualisation de contenus

La lecture et la saisie d'exposants, des fractions et des racines est compréhensible. Les participants ont trouvé que le prototype permet de lire facilement ce qu'ils ont saisi, et de le réutiliser, le recopier et l'analyser rapidement. L'utilisation du clavier pour saisir des expressions dans la forme bidimensionnelle est perçue comme un avantage sur les modes de saisies utilisant la souris. Un enseignant a exprimé : « Ça ressemble à MathType, sauf qu'en MathType on clique ; c'est ça le problème, les élèves [non voyants] ils n'y arrivent pas parce qu'il faut cliquer, il faut aller chercher les symboles ». L'insertion automatique des blocs de fraction et de racine par des raccourcis de clavier a été perçue comme acceptable, et non considérée comme une aide automatique.

Les commandes pour Copier et Coller aident à prévenir les problèmes de recopie manuelle, très fréquents lorsqu'on travaille en braille. Par exemple dans une distribution de facteurs de plusieurs termes : « On est quasiment certain qu'ils vont se tromper, parce qu'ils vont avoir beaucoup de calculs à faire déjà, et deuxième chose, ils vont avoir beaucoup de recopier à faire ; avec le copier/coller au moins on est sûr qu'on a la même chose ». Les enseignants ont apprécié la visualisation immédiate des éléments après la saisie de termes, ce qui facilite la communication entre les voyants et les non voyants sans la présence d'un intermédiaire. Un professeur explique : « Pour moi il faut vraiment qu'il y ait le lien direct entre l'enseignant et l'élève. Le problème avec les assistants qui viennent dans la salle de classe c'est que l'enseignant ne parle plus à l'élève mais à l'intermédiaire, et l'intermédiaire bien souvent n'est pas formé aux sciences. Pour moi, la présence d'assistants ne marche que pour certains handicaps ».

La sortie audio a été considérée comme convenable parce qu'elle est rigoureuse et ne fait pas d'interprétation. Les enseignants ont également recommandé d'avoir différents niveaux de verbosité, pour que les élèves puissent personnaliser la façon de lire selon leur niveau et leur préférences. Néanmoins, la sortie audio seule fatigue l'utilisateur ; de plus, dans la salle de cours l'élève aveugle utilise surtout la plage braille, parce que même s'il existe une sortie audio optimisée, il ne peut utiliser les écouteurs qu'occasionnellement car il doit écouter l'enseignant et ses camarades de classe. Un enseignant a commenté : « ça me paraît vraiment bien d'avoir les deux, l'audio et l'écrit, en plus j'imagine que dans un certain temps on peut apprendre tous les raccourcis clavier pour insérer des formules, des fractions, de racines carrées, donc j'imagine qu'en plus ils ont la possibilité de le taper en braille, s'ils connaissent déjà le braille, c'est bien d'avoir les deux, et l'enseignant peut vraiment le voir directement ».

Parmi les améliorations proposées, il faut permettre l'insertion d'espaces pour organiser visuellement les expressions. Les espaces sont nécessaires lors de l'organisation des variables en colonnes quand on traite une système d'équations par la méthode de réduction.

Concernant la possibilité d'utiliser un fichier enregistré dans notre logiciel et de l'importer dans OpenOffice, les enseignants ont trouvé que c'est utile parce qu'on peut le réutiliser et modifier, mais il faut que cela fonctionne aussi dans l'autre sens, c'est à dire qu'on puisse importer des

Ainsi une application implémentant avec les caractéristiques de notre prototype se révélerait très utile pour assis-

ter dans une certaine mesure le processus d'enseignement-apprentissage dans un environnement scolaire intégré au niveau lycée. Il est important aussi de s'intéresser aux niveaux supérieurs de l'enseignement des mathématiques et des sciences en général. De nos jours, le standard pour travailler avec des documents mathématiques complexes reste \LaTeX . Néanmoins, le code \LaTeX est très verbeux, ce qui pose problème pour son traitement dans des modalités non visuelles, aussi bien en braille qu'en audio. Comme on l'a vu, il existe des outils permettant de convertir le \LaTeX vers de l'audio ou de codes braille mathématique. L'une des extensions possibles de nos travaux consiste en l'implémentation des fonctionnalités proposées ici pour faciliter le traitement du code \LaTeX en combinaison avec le braille mathématique et de l'audio.

RÉFÉRENCES

- [1] D. Archambault, "Non visual access to mathematical contents : State of the art and perspective," in *Proceedings of the WEIMS Conference 2009 (The Workshop on E-Inclusion in Mathematics and Science)*, 2009, pp. 43–52.
- [2] J. Fernández del Campo, *La Enseñanza de la Matemática a los Ciegos*. ONCE. Organización Nacional de Ciegos Españoles, 1986.
- [3] S. Fajardo Flores and D. Archambault, "Multimodal interface for working with algebra : Interaction between the sighted and the non sighted," in *Computers Helping People with Special Needs*, K. Miesenberger, D. Archambault, P. Penaz, and W. Zagler, Eds. Berlin : Springer-Verlag, 2014, p. [À être publié].
- [4] B. Mascaret, A. Mille, and V. Guillet, "Supporting braille learning and uses by adapting transcription to user's needs," in *Computers Helping People with Special Needs*, K. Miesenberger, A. Karshmer, P. Penaz, and W. Zagler, Eds. Berlin : Springer-Verlag, 2012, pp. 150–157.
- [5] K. Miesenberger, M. Batusic, and B. Stöger, "Labrdoor : Latex-to-braille-door," <http://www.snv.jussieu.fr/inova/publi/ntevh/labrdoor.htm>, 1998.
- [6] A. Irving, "The latex-access project," <http://latex-access.sourceforge.net/>, 2007.
- [7] S. Vari, "Rapport d'Étape du p.s.l.m (programme spécialisé de lecture mathématique à l'usage des non-voyants)," Baisser les Barrières, Tech. Rep., 2012.
- [8] A. Karshmer, C. Bledsoe, and P. Stanley, "The architecture of a comprehensive equation browser for the print impaired," in *Computers Helping People with Special Needs*, K. Miesenberger, J. Klaus, W. Zagler, and D. Burger, Eds. Berlin : Springer-Verlag, 2004, pp. 614–619.
- [9] E. Bates and D. Fitzpatrick, "Spoken mathematics using prosody, earcons and spearcons," in *Computers Helping People with Special Needs*, K. Miesenberger, J. Klaus, W. Zagler, and A. Karshmer, Eds. Berlin : Springer-Verlag, 2010, pp. 407–414.
- [10] R. D. Stevens, S. A. Brewster, P. C. Wright, and A. D. N. Edwards, "Design and evaluation of an auditory glance at algebra for blind readers," in *Auditory Display : The Proceedings of the Second International Conference on Auditory Display*. Addison-Wesley, 1994, pp. 21–30.
- [11] A. Awde, Y. Bellik, and C. Tadj, "Complexity of mathematical expressions in adaptive multimodal multimedia system ensuring access to mathematics for visually impaired users," *International Journal of Computer and Information Engineering*, vol. 2, no. 6, pp. 393–405, 2008.
- [12] I. Doush and E. Pontelli, "Building a programmable architecture for non-visual navigation of mathematics : Using rules for guiding presentation and switching between modalities," in *Universal Access in HCI*, C. Stephanidis, Ed. Berlin : Springer-Verlag, 2009, pp. 3–13.
- [13] M. Suzuki, T. Kanahori, N. Ohtake, and K. Yamaguchi, "An integrated ocr software for mathematical documents and its output with accessibility," in *Computers Helping People with Special Needs*, K. Miesenberger, J. Klaus, W. Zagler, and D. Burger, Eds. Berlin : Springer-Verlag, 2004, pp. 648–655.
- [14] J. Engelen and B. Simons, "Towards a common braille math code for flemish students," in *Proceedings of the World Congress Braille21*, 2011.
- [15] B. Stöger, K. Miesenberger, and M. Batusic, "Mathematical working environment for the blind : Motivation and basic ideas," in *Computers Helping People with Special Needs*, K. Miesenberger, J. Klaus, W. Zagler, and D. Burger, Eds. Berlin : Springer-Verlag, 2004, pp. 656–663.
- [16] K. Miesenberger, "Doing mathematics," <http://www.ascience-thematic.net/en/conferences/paris/Miesenberger>, 2008.
- [17] C. Bernareggi, "Non-sequential mathematical notations in the lambda system," in *Computers Helping People with Special Needs*, K. Miesenberger, J. Klaus, W. Zagler, and A. Karshmer, Eds. Berlin : Springer-Verlag, 2010, pp. 389–395.
- [18] S. Fajardo Flores and D. Archambault, "Understanding algebraic manipulation : Analysis of the actions of sighted and non-sighted students," in *The International Workshop on Digitization and E-Inclusion in Mathematics and Science 2012 (DEIMS12)*, K. Yamaguchi and M. Suzuki, Eds., 2012.