

Logiciel de Support pour l'Apprentissage de l'Algèbre et la Communication entre Personnes Voyantes et Non Voyantes

Silvia Fajardo Flores and Dominique Archambault

EA 4004 – CHArt-THIM
Université Paris 8, France
`silvia.fajardo-flores@etud.univ-paris8.fr`,
`dominique.archambault@univ-paris8.fr`

Résumé Le but de notre projet c'est de faciliter l'apprentissage de l'algèbre pour les élèves non voyants ou malvoyants, et d'améliorer la communication et la collaboration avec leurs professeurs et camarades de classe. Suite à une analyse des besoins d'élèves voyants et non voyants pendant la résolution d'équations algébriques, et prenant en compte les recommandations des enseignants de mathématiques, nous avons développé un prototype de logiciel qui permet d'éditer des expressions algébriques et de travailler à leur résolution. Ce prototype utilise une sortie synchronisée visuelle et auditive afin de permettre la communication entre utilisateurs voyants et non voyants. A présent, le prototype est finalisé et nous préparons les tests avec des élèves et leurs enseignants dans leur environnement scolaire.

1 Introduction

Les difficultés que les élèves et les étudiants non voyants rencontrent quand ils apprennent l'algèbre dans leur environnement scolaire sont nombreuses, notamment dans l'accès aux contenus des expressions mathématiques et dans leur manipulation pour effectuer des calculs essentiels. Les élèves voyants ont la possibilité de s'aider en annotant/griffonnant ou faisant des schémas autour de ces expressions, et le manque d'équivalents non visuels de ce type de support ajoute une difficulté aux élèves et étudiants handicapés visuels [1,2]. L'ordinateur peut diminuer ces difficultés de façon importante et faciliter l'interaction entre voyants et non voyants. Parmi les logiciels et prototypes développés à ce propos, on peut mentionner le Math Genie [3,4], Lambda [5] et MaWEn [2,6] ; néanmoins leurs fonctionnalités sont limitées ou bien ils ne prennent pas en compte les aspects pédagogiques requis pour l'apprentissage.

2 Interaction et apprentissage

Il est admis que les interactions homme-machine dans les logiciels pour apprendre les mathématiques peuvent affecter positivement ou négativement la

compréhension conceptuelle des étudiants [7,8]. Dans un logiciel qui a pour but de faciliter certaines tâches pendant l'apprentissage, il est important de prendre en compte en même temps les aspects pédagogiques impliqués. En nous basant sur le travail de [9], nous avons identifié les actions requises par des étudiants voyants et non-voyants en résolvant des équations linéaires, et les aspects fondamentaux d'interaction [10]. Les tâches les plus communes à réaliser sont l'édition d'expressions, la multiplication de facteurs d'un ou plusieurs termes et la simplification des termes semblables ; ces tâches ont été identifiées en [11] comme essentielles après une analyse de textes scolaires.

En ce qui concerne les besoins spécifiques pour les utilisateurs non voyants, la facilitation de l'accès direct aux termes dans l'expression et la réduction de la charge mentale sont des aspects critiques à prendre en compte. En même temps, le logiciel doit permettre à l'élève d'être autonome, de choisir sa stratégie de solution et de faire des erreurs.

Même s'il semble être un travail simple, le vrai défi c'est de rendre les tâches faciles à réaliser sur une interface, sans interférer négativement sur le processus d'apprentissage. Afin de travailler avec des expressions algébriques dans la salle de classe, un élève doit être capable de les écrire, de les comprendre et de les manipuler, tout en ayant la direction et la supervision d'un enseignant.

2.1 Compréhension d'une expression

Afin de proposer des interactions convenables pour la compréhension d'expressions et la mise en opération d'une stratégie de solution dans notre interface, il faut premièrement savoir ce qui signifie « comprendre » une expression mathématique. Par la suite, on peut envisager à quel degré notre interface peut être utile.

Ernest [12] propose un modèle pour la compréhension de la signification cognitive des expressions mathématiques, selon lequel le processus se déroule de la façon suivante : Premièrement, l'expression est explorée visuellement par le lecteur ; à partir de cette observation il forme une structure superficielle qui sert à vérifier si tous les symboles sont connus et si la longueur et la complexité de l'expression sont gérables. Ensuite s'exécute le processus d'analyse syntaxique, dont on identifie l'opérateur principal à partir duquel l'arbre syntactique sera formé ; celui-ci est un processus itératif qui comprend le traitement de toutes les sous-expressions. Après, la signification des opérateurs est récupérée de la mémoire sémantique à long terme. Par la suite, la représentation sémantique de la structure est formée et préparée, soit pour être transformée, ou bien juste aux fins de compléter la connaissance du sujet.

Dans le modèle de [12] on parle d'une exploration visuelle, que dans le cas des non voyants s'effectue normalement à partir d'une expression représentée en braille ou par audio. On peut dire que dans notre cas le problème originel c'est la représentation de l'expression. Le reste du modèle comprend des processus cognitifs qui ne dépendent pas de la capacité visuelle, donc on peut considérer qu'il peut servir de référence commune pour les voyants et les non voyants.

La capacité de comprendre la structure syntaxique des expressions algébriques est essentielle pour la réussite dans l'apprentissage de l'algèbre. Les transformations inhérentes à la résolution d'équations algébriques ne sont possibles qu'après une analyse syntaxique complète [13].

Au niveau syntaxique il est possible de proposer des interactions pour faciliter la compréhension de la structure et complexité d'une expression. Par contre, le sens que l'élève va assimiler à partir d'une expression dépend de ce que l'enseignant lui apprend comme concepts fondamentaux de l'algèbre. Autrement dit, un élève qui arrive à comprendre la syntaxe d'une équation et les transformations qui peuvent être appliquées, peut parvenir à sa résolution même sans avoir une idée de ce qui représentent ni l'équation ni la solution. Donc, en ce qui concerne notre proposition d'interface on va se concentrer principalement sur le domaine syntaxique, et on mènera des tests avec des élèves et leurs enseignants pour vérifier si elle sert également aux fins pédagogiques.

2.2 Représentation de contenus

Représenter des expressions pour leur accès par les personnes non voyantes n'est pas une tâche facile. La conversion d'une structure bidimensionnelle vers une représentation non visuelle telle que le braille ou l'audio demande l'utilisation d'information additionnelle pour décrire les termes [14–16]. En plus, la conversion vers l'audio peut être ambiguë.

Au sein de la représentation par audio, [16] suggère que l'utilisation d'information auditive additionnelle est une question incontournable puisque il est nécessaire de décrire les propriétés de l'expression par rapport à la résolution spatiale. Par conséquent, la description auditive doit résoudre l'ambiguïté structurelle d'une façon efficace ; en plus, il doit donner à l'utilisateur le contrôle sur la navigation et la possibilité d'avoir une vue générale de l'expression [14, 16].

Pour [14], le problème de l'adaptation visuelle vient du fait que aucun des autres sens n'a autant de bande passante comme la vision. À première vue une personne voyante peut saisir la longueur et complexité d'une expression, et contrôler le flux d'information de façon immédiate.

D'après [15, 16], la question c'est la communication correcte de la résolution spatiale d'une expression. Cependant, nous proposons que bien que la structure d'une expression doit être clarifiée, ceci n'est pas une question de résolution spatiale mais de syntaxe mathématique. Donc, il est possible de surmonter le problème de la bidimensionnalité en offrant une représentation syntaxique auditive complète sans décrire des caractéristiques spatiales ; ceci est une question importante à se poser par rapport à la navigation dans la formule. On propose aussi que l'ambiguïté d'une expression peut être réduite en transférant à l'utilisateur le contrôle de la position dans la formule et de la granularité de la navigation. D'un autre côté, la possibilité d'offrir une vue générale de l'expression est primordiale. Nous avons choisi la représentation auditive comme sortie non visuelle.

2.3 Communication et collaboration

La différence de représentation de contenus mathématiques entre les personnes voyantes et non voyantes rend difficile la communication directe entre eux. Dans la salle de classe, les élèves ont besoin de prendre des notes des exercices à partir du discours oral de l'enseignant, montrer le déroulement d'un exercice, rendre des devoirs et travailler avec leurs camarades de classe. Pour mener à bien ces activités, les élèves non voyants normalement sont aidés par des enseignants spécialistes de la déficience visuelle, qui font la transcription du braille vers le noir et vice versa. Même si le travail des enseignants spécialisés rend possible la communication de contenus par écrit, cette communication ne se produit pas de façon immédiate pour servir aux besoins dans la salle de classe. Une interface pour l'édition et traitement dynamique de contenus mathématiques offrant une sortie adéquat pour chaque représentation pourrait améliorer la communication de contenus et la collaboration entre personnes voyantes et non voyantes. Les deux modalités de sortie seront synchronisées dynamiquement suivant les interactions de l'utilisateur, de façon que le terme ou les termes actifs puissent être identifiés aussi bien par les voyants que par les non voyants.

3 Implémentation du prototype

Notre prototype offre l'édition d'expressions, la synchronisation visuelle et auditive des termes actifs, ainsi que des commandes pour faciliter l'accès directe aux termes et la minimisation de la charge mentale. Parmi les interactions incluses dans le prototype, certaines avaient été déjà considérées lors d'autres travaux, par exemple : navigation par bloc [1–3] et localisation de positions spécifiques dans la formule [6].

3.1 Édition

La totalité des termes dans une expression peut être écrit directement d'après le clavier. Pour écrire la puissance d'un exposant il suffit d'indiquer le début en utilisant [Ctrl]+[Flèche vers le haut], et pour la fin [Ctrl]+[Flèche vers le bas]. Les fractions se forment en utilisant le raccourci [Ctrl]+[T] précédé de la sélection des termes qui vont composer la fraction ; c'est l'opérateur «/» qui délimite le numérateur et dénominateur.

L'édition et suppression de termes se fait par défaut caractère par caractère ; la suppression de multiples termes est possible après une sélection de termes à supprimer. Les commandes pour copier et coller sont également incluses.

3.2 Navigation

La navigation entre termes ou blocs composant une expression utilise les flèches droite et gauche uniquement, même pour les termes bidimensionnels, prenant en compte que la bidimensionnalité d'une expression est utile surtout

à la vue, et que le sens d'une expression ne change pas quand on le représente de façon linéaire. Par exemple $1/2$ et $\frac{1}{2}$. Par contre, cette façon de naviguer pourrait déconcerter l'utilisateur voyant dans une expression compliquée comme un fraction avec multiples termes au numérateur et dénominateur. Cet aspect sera considéré dans les tests.

Pour naviguer dans une expression il est possible d'avancer et aller en arrière dans des différents niveaux de l'arbre syntactique, dont la granularité de navigation est contrôlée par l'utilisateur. Par exemple, dans une expression complexe telle que $x + 2(x + 2(x + 2)) = x + 2$ il existent plusieurs niveaux de profondeur (Fig. 1) ; l'utilisateur peut avancer terme par terme, ou bien aller dans un niveau plus profonde dans l'arbre. Sur l'interface l'affichage et la navigation seront toujours linéaires.

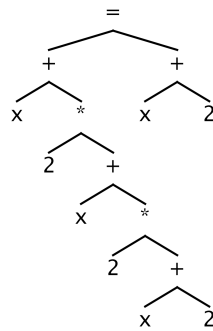


FIGURE 1. Arbre syntaxique.

3.3 Accès et repérage

Afin de faciliter l'accès direct aux termes d'une expression, nous proposons la recherche libre et la recherche de termes semblables. Dans la première, l'utilisateur peut chercher une séquence de termes ou opérateurs de façon pareil à la recherche du texte. Dans la deuxième, le critère de recherche est un exposant (avec ou sans puissance), et la recherche renvoie comme résultat l'ensemble des termes semblables de cet exposant dans l'expression, y compris ceux qui se trouvent entre parenthèses, dans une fraction, ou bien dans un autre membre. La recherche de termes semblables n'est pas sémantique, mais purement lexicale. Si l'utilisateur cherche les termes semblables en x^2 , des termes comme $x.x$ ou $(x + 2)^2$ ne s'afficheront pas comme résultats.

Dans les deux types de recherche, l'utilisateur peut aller au résultat suivante ou précédente.

Par rapport au repérage dans l'expression, nous proposons l'attribution et la suppression des marques comme un outil pour indiquer les termes qui ont déjà

été traités, de façon équivalente à barrer le terme avec un crayon sur le papier. On garde aussi la dernière position du curseur dans la ligne, de tel façon qu'en y revenant on se trouve où on s'attend.

3.4 Facilitation des calculs vs aspects pédagogiques

Au sein de la salle de classe, les élèves malvoyants ou non voyants doivent avoir une possibilité équivalente aux voyants par rapport à la facilité d'exécution des calculs. Afin d'améliorer la performance des élèves avec une déficience visuelle, on propose une commande pour trouver automatiquement les termes semblables d'une expression, à utiliser par exemple pendant une simplification. Bien que cette option pourrait mettre en avantage à l'utilisateur malvoyant ou non voyant par rapport à l'utilisateur voyant qui n'utilise pas le logiciel, l'utilisateur doit toujours choisir entre les termes qui sont susceptibles d'être simplifiés et ceux qui ne le sont pas. Donc, bien que il s'agit probablement d'un avantage qui ne représente pas nécessairement un obstacle pour l'apprentissage, c'est un point à discuter avec les enseignants.

La totalité des interactions proposées s'affichent sur le tableau 1.

Tableau 1. Besoins identifiés et interactions proposées

Besoin	Interaction
Facilité d'édition	Écriture directe par clavier commun.
Compréhension	Navigation libre, granularité adaptable de navigation, affichage par bloc structurel et sémantique, sortie auditive sur demande.
Manipulation et contrôle	Sélection et suppression par bloc, mise et suppression de marques.
Accès direct et repérage	Recherche libre, recherche de termes, mise et suppression de marques, navigation entre résultats des recherches et des termes marqués, conservation de la position du curseur par ligne.
Vue générale de l'expression	Affichage par bloc structurel et sémantique.
Minimisation de la charge de mémoire	Mise et suppression de marques, granularité adaptable de navigation.
Communication et coopération	Soulignage visuel et sortie auditive synchronisés, enregistrement du document sous fichier.

Notre prototype a été développé sur la plateforme Mozilla : XUL+XPCOM, Python comme langage de script, et MathML de présentation pour représenter les expressions mathématiques. Une expression est, donc, représentée à l'intérieur par un arbre syntaxique, et à l'extérieur comme un expression linéaire ou bidimensionnelle selon les termes qui la composent. Les figures 2, 3 et 4 affichent des exemples d'utilisation.

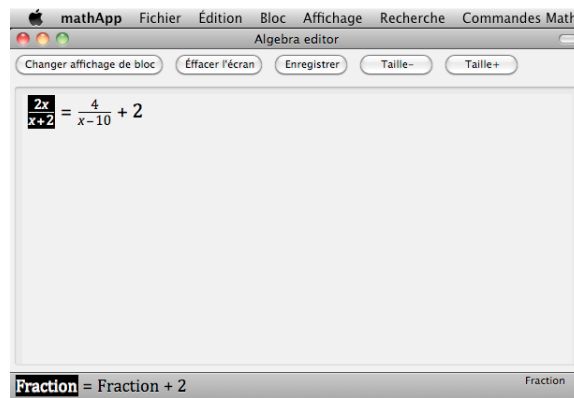


FIGURE 2. Exemple d'affichage d'un expression complexe.

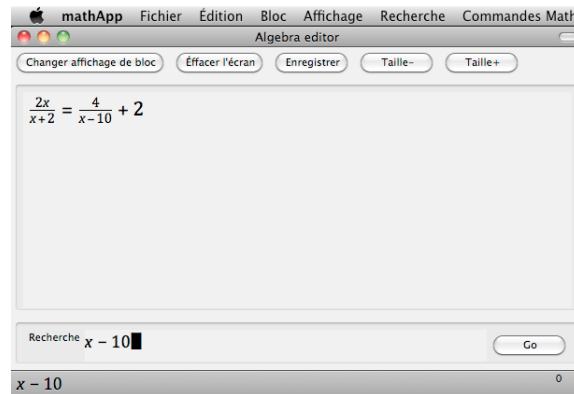


FIGURE 3. Exemple de recherche libre de termes.

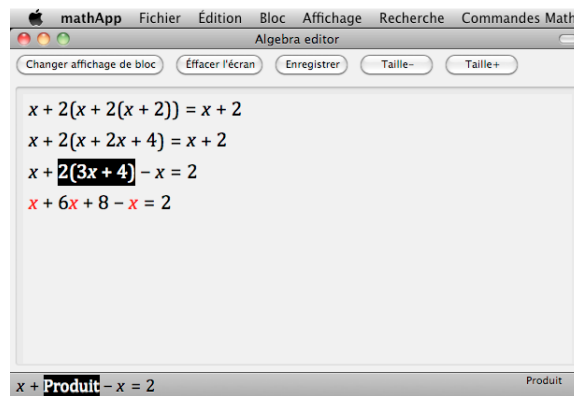


FIGURE 4. Exemple de navigation par bloc pendant la résolution d'une équation linéaire, et marquage de résultats d'une recherche de termes.

3.5 Limitations

Bien que les logiciels développés sur la plateforme Mozilla peuvent être exécutés dans plusieurs plateformes, à présent, des problèmes d’accessibilité empêchent la lecture synchronisée des contenus du logiciel avec le lecteur d’écran de l’utilisateur. Pour l’instant nous utilisons une solution temporaire pour la sortie vocale ; bien que cette solution nous permettra de mener les tests, la performance n’est pas si adéquate et cela pourrait influencer les résultats bruts de l’évaluation par les utilisateurs, donc il faudra en tenir compte pendant l’interprétation de résultats. D’autre part, nous travaillons à la résolution de ce problème.

4 Tests

À présent nous sommes en train de planifier les tests en collaboration avec les enseignants travaillant avec des élèves voyants et non voyants souhaitant participer. Nous voulons analyser l’efficacité des interactions implémentées dans notre logiciel par rapport à la facilitation des tâches d’édition, résolution et communication, et leur influence par rapport aux objectifs d’apprentissage. Nous allons vérifier les hypothèses suivantes :

- La compréhension de la syntaxe d’une expression ne dépend pas de la représentation auditive de la structure spatiale.
- La compréhension de la syntaxe d’une expression ne dépend pas de la navigation bidimensionnelle de la structure.
- L’ambiguïté inhérente à la représentation auditive peut être soulagée par la navigation granulaire à la demande de l’utilisateur non voyante ou malvoyante.
- Il existe une relation entre le niveau de granularité de navigation par rapport à la charge de mémoire pour comprendre la structure syntactique d’une expression complexe.

4.1 Participants

Nous allons évaluer le logiciel avec les participants suivants :

- Élèves non voyants, malvoyants et sans déficience visuelle qui apprennent l’algèbre
- Enseignants de mathématiques
- Enseignantes spécialisés en la déficience visuelle

4.2 Activités

Les activités prévues pendant l’évaluation sont :

Compréhension

- Explorer une expression dans l’interface, puis l’écrire en braille.
- Explorer une expression en braille, puis l’écrire dans l’interface.
- Écrire une expression dans l’interface à partir d’une dictée de l’enseignant.

Facilitation de tâches

- Résoudre des équations linéaires simples et complexes.

Communication Pendant toutes les activités, l'élève sera supervisé par l'enseignant, de telle façon qu'on puisse observer la façon dont les deux interagissent.

4.3 Analyse

Nous allons observer :

- La compréhension de la structure des expressions mathématiques complexes.
- Le repérage dans les expressions.
- La facilité d'édition et navigation d'expressions algébriques.
- La possibilité de résolution d'après la stratégie de l'utilisateur.
- La charge mentale pendant les tâches de distribution de facteurs et de simplification.
- L'efficacité de la communication et la collaboration entre personnes voyantes et non voyantes.

La démarche complète sera enregistrée en vidéo. L'observation des activités sera complétée par la réalisation d'un questionnaire non structuré avec les participants.

5 Conclusion

Nous avons présenté les aspects de compréhension et représentation des expressions, ainsi que les aspects pédagogiques qui ont été considérés pour le développement d'un logiciel de support pour l'apprentissage de l'algèbre. Le logiciel est à ce moment prêt pour mener des tests utilisateurs, dont nous allons vérifier nos hypothèses. Les résultats nous aideront à mieux comprendre les aspects cognitifs et pédagogiques de l'apprentissage de l'algèbre au sein d'une interface pour les personnes non voyantes y malvoyantes, ainsi que les interactions désirées pour faciliter leur travail dans la salle de classe.

Références

1. K. Miesenberger, "Doing mathematics," <http://www.ascience-thematic.net/en/conferences/paris/Miesenberger>, 2008.
2. D. Archambault, "Non visual access to mathematical contents : State of the art and prospective," in *Proceedings of the WEIMS Conference 2009 (The Workshop on E-Inclusion in Mathematics and Science)*, 2009, pp. 43–52.
3. D. Gillan, P. Barraza, A. Karshmer, and S. Pazuchanics, "Cognitive analysis of equation reading : Application to the development of the math genie," in *Computers Helping People with Special Needs*, K. Miesenberger, J. Klaus, W. Zagler, and D. Burger, Eds. Berlin : Springer-Verlag, 2004, pp. 630–637.

4. 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.
5. W. Schweikhardt, C. Bernareggi, N. Jessel, B. Encelle, and M. Gut, "Lambda : a european system to access mathematics with braille and audio synthesis," in *Proc. ICCHP 2006 (10th International Conference on Computers Helping People with Special Needs)*, K. Miesenberger, J. Klaus, W. Zagler, and A. Karshmer, Eds. Springer, 2006, pp. 1223–1230.
6. 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.
7. N. Balacheff, "Artificial intelligence and mathematics education : Expectations and questions," in *Proceedings of the 14th Biennial of the AAMT*, T. Herrington, Ed., 1993, pp. 1–24.
8. P. Drijvers and K. Gravemeijer, "Computer algebra as an instrument : Examples of algebraic schemes," in *The Didactical Challenge of Symbolic Calculators : Turning a Computational Device Into a Mathematical Instrument*, D. Guin, K. Ruthven, and L. Trouche, Eds. Springer, 2005.
9. L. Carry, C. Lewis, and J. Bernard, "Psychology of equation solving : An information processing study," The University of Texas at Austin, Tech. Rep., 1979.
10. 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.
11. B. Stöger, M. Batusic, K. Miesenberger, and P. Haindl, "Supporting blind students in navigation and manipulation of mathematical expressions : Basic requirements and strategies," in *Computers Helping People with Special Needs*, K. Miesenberger, J. Klaus, W. Zagler, and A. Karshmer, Eds. Berlin : Springer-Verlag, 2006, pp. 1235–1242.
12. P. Ernest, "A model of the cognitive meaning of mathematical expressions," *British Journal of Educational Psychology*, vol. 57, no. 3, pp. 343–370, 1987.
13. D. Kirshner, "The visual syntax of algebra," *Journal for Research in Mathematics Education*, vol. 20, no. 3, pp. 274–287, 1989.
14. A. Edwards and R. Stevens, "Mathematical representations : Graphs, curves and formulas," in *Non-Visual Human Computer Interactions : Prospects for the Visually Handicapped*, D. Burger and J. Sperandio, Eds., 1993, pp. 181–193.
15. 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.
16. 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.