



**HAL**  
open science

## Conception d'un Système Tutoriel Intelligent (STI) basé sur les progrès d'apprentissage : des étapes formelles aux étapes d'expérimentations chez les enfants

Hélène Sauzéon, Benjamin Clément, Cécile Mazon, Didier Roy, Pierre-Yves Oudeyer

### ► To cite this version:

Hélène Sauzéon, Benjamin Clément, Cécile Mazon, Didier Roy, Pierre-Yves Oudeyer. Conception d'un Système Tutoriel Intelligent (STI) basé sur les progrès d'apprentissage : des étapes formelles aux étapes d'expérimentations chez les enfants. 10e Conférence sur les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain, Marie Lefevre, Christine Michel, Jun 2021, Fribourg / Virtual, Suisse. pp.20-27. hal-03293081

**HAL Id: hal-03293081**

**<https://hal.science/hal-03293081v1>**

Submitted on 20 Jul 2021

**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.

## Conception d'un Système Tutoriel Intelligent (STI) basé sur les progrès d'apprentissage : des étapes formelles aux étapes d'expérimentations chez les enfants

Hélène Sauzeon<sup>1,2</sup>, Benjamin Clément<sup>1</sup>, Cécile Mazon<sup>1,2</sup>, Didier Roy<sup>1</sup> et Pierre-Yves Oudeyer<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Equipe FLOWERS, Inria, ENSTA Paris-Tech et Université de Bordeaux, F-33405, Talence, France

helene.sauzeon@inria.fr

<sup>2</sup> Equipe Handicap, Activité, Cognition et Santé, Université de Bordeaux - Inserm, Bordeaux Population Health Lab (U1219), F-33086 Bordeaux, France

**Résumé.** S'appuyant sur le modèle des Progrès d'Apprentissage (PA, Oudeyer & Gotlieb, 2016 [1]), une approche STI basée sur les PA a été conçue et implémentée dans un jeu sérieux de numératie (addition et soustraction de nombres dans des activités d'échanges monétaires) appelé KidLearn. Dans ce contexte, le STI personnalise les parcours d'apprentissage en optimisant les PA (algorithmes de type bandit multi-bras), en minimisant les présupposés sur les apprenants et le domaine de connaissance. Dans un premier temps, l'approche STI adoptée est présentée, suivie de sa validation par une étude à grande échelle auprès d'enfants de 6 à 8 ans. Puis, la capacité de généralisation de cette approche est illustrée à travers son transfert à un public cognitivement hétérogène (i.e. éducation spécialisée), et son transfert à un autre domaine d'apprentissage (i.e., éducation thérapeutique).

**Mots-clés :** STI, progrès d'apprentissage, motivation intrinsèque, études terrains.

**Abstract.** Based on the Learning Progression (LP) model of Oudeyer and Gotlieb, 2016 [1], an LP-based ITS approach was designed and implemented in a serious numeracy game (addition and subtraction of numbers in money exchange activities) called KidLearn. In this context, the ITS personalizes learning paths by optimizing LPs (multi-armed bandit-like algorithms), minimizing presuppositions about learners and knowledge domain. First, the adopted ITS approach is presented, followed by its validation through a large-scale study with 6-8 year old children. Then, the generalizability of this approach is illustrated through its transfer to a cognitively heterogeneous children (i.e., special education), and its transfer to another learning domain (i.e., health education).

**Keywords:** ITS, Learning progress, Intrinsic motivation, field studies.

## 1 Introduction

L'un des défis de l'école du 21<sup>e</sup> siècle est de faire face à la grande diversité des apprenants en termes de capacités d'apprentissage et de motivations. Les nombreuses recherches sur l'éducation personnalisée et l'enseignement actif témoignent de cet enjeu sociétal critique dont l'objectif *in fine* est d'asseoir l'égalité des chances à l'école.

Bien que les atouts de l'apprentissage personnalisé soient aujourd'hui bien documentés (e.g., [2], [3]), sa généralisation est défi face à la taille élevée des classes. C'est pourquoi de fortes attentes sont associées aux technologies éducatives *adaptatives* pour l'automatiser et soutenir les enseignants dans leurs missions. Parmi elles, les Systèmes tutoriels Intelligents (STI) occupent une place privilégiée puisqu'ils ont la particularité d'individualiser l'enseignement en tenant compte de multiples caractéristiques de l'élève et/ou d'offrir un ajustement du parcours pédagogique selon les réponses au fil de l'eau de l'apprenant.

Dans le présent travail, nous présentons le projet Kidlearn dont les objectifs sont les suivants : 1) Optimiser et personnaliser automatiquement les parcours d'apprentissage dans les STI, en minimisant les présupposés sur les apprenants et le domaine de connaissance ; 2) Proposer une nouvelle approche avec des algorithmes de type bandit multi-bras; et 3) Optimiser l'engagement des apprenants en s'appuyant sur le modèle des progress d'apprentissage [1] en lien avec la théorie des motivations intrinsèques [4] [5].

## 2 Etat-de-l'art

D'une manière générale, deux grandes familles de conceptions des STI pour la personnalisation peuvent être distinguées [6]. La première, à savoir la personnalisation dite "linéaire", implique que tous les apprenants suivent un même chemin d'apprentissage, mais à des vitesses différentes ou avec un nombre différent d'exercices. La seconde, qualifiée "à chemins ramifiés", permet à chaque apprenant de suivre un chemin spécifique en fonction de ses réponses.

Plusieurs revues systématiques ont rapporté des résultats prometteurs, voire positifs, sur la valeur ajoutée des STI (e.g., [7] [8]), tout en soulignant les limites méthodologiques de ce champ de recherche (e.g., pas de groupe contrôle, pas d'équivalence initiale des groupes sur le critère de jugement d'efficacité de l'intervention STI, pas de mesures pré et post-intervention, voir par exemple, [9]) ainsi qu'une grande variété de contextes d'utilisation de ces STI (e.g., par exemple, les STI peuvent être utilisés seuls ou mixés à une intervention pédagogique menée par l'enseignant). Au final, les revues systématiques concluent qu'il est difficile aujourd'hui d'identifier les caractéristiques propres au STI qui sont essentielles à la réussite de l'apprentissage personnalisé [10] [6].

De manière plus ou moins explicite, les STI s'appuient sur le concept de la Zone Proximale de Développement (ZPD, [11]) où il s'agit de proposer à l'apprenant des activités pédagogiques ni trop difficiles, ni impossibles au regard de ses capacités afin qu'il puisse progresser dans ses acquisitions. Le concept ZPD est un concept bien connu

en psychologie du développement qui a inspiré de nombreux modèles d'apprentissage (par exemple, la théorie de la charge cognitive, [12]).

Récemment, avec l'intérêt croissant pour le phénomène de la curiosité (e.g. pour revue, [13]), ce concept a été revisité dans le modèle des Progrès d'Apprentissage (PA) [1]. Ce modèle propose que la ZPD conditionne PA mais également la motivation intrinsèque. Le modèle **PA** est un modèle contemporain d'apprentissage par récompense où la motivation intrinsèque et l'apprentissage sont liés par une boucle vertueuse : les tâches adaptées aux capacités de l'enfant sont plus motivantes et génèrent des **PA** qui, en retour, sont une récompense interne stimulante pour de nouvelles acquisitions.

Il est intéressant de noter que le modèle LP s'appuie également sur les théories des motivations intrinsèques, et en particulier, la théorie de l'autodétermination [4] [5], qui pose les motivations intrinsèques comme l'ingrédient essentiel à l'apprentissage. Les motivations intrinsèques se rapportent aux comportements ou aux activités réalisés pour le bien de l'individu ou pour satisfaire ses propres besoins de développement. Elles s'opposent aux motivations extrinsèques plus hétérogènes dans leur nature et, qui renvoient aux comportements motivés pour des raisons autres que les intérêts et désirs inhérents à l'individu (exigences environnementales, attentes ou récompenses sociales, etc.).

Sur la base du modèle des **PA**, le projet Kidlearn vise à développer un STI dont la particularité du mécanisme automatique de personnalisation est d'optimiser les progrès d'apprentissage de l'apprenant au fil de l'eau de ses réponses aux activités proposées. A ce titre, Kidlearn appartient à la famille des STI à personnalisation ramifiée.

### 3 Le Projet KidLearn

Dans un premier temps l'approche STI adoptée et les algorithmes développés sont présentés suivis de leur validation à travers une étude à grande échelle réalisée auprès d'enfants de 6 à 8 ans. Puis, la capacité de généralisation de cette approche est illustrée à travers son transfert à un public cognitivement hétérogène (i.e. étude en éducation spécialisée), et son transfert à un autre domaine d'apprentissage (i.e., éducation thérapeutique d'enfants avec asthme chronique).

#### 3.1 Approche STI, algorithme ZPDES et Etude à grande échelle

Notre stratégie est de proposer à chaque apprenant les activités maximisant ses progrès. Ces activités ne sont pas nécessairement celles définies a priori dans les modèles cognitifs et apprenants, ce sont celles repérées en temps réel, grâce aux résultats de l'étudiant, comme étant les plus efficaces pour celui-ci. Cette approche présente trois principaux avantages :

1. *Une faible dépendance vis à vis des modèles cognitifs et apprenant.* Il est souvent très difficile pour l'enseignant d'identifier précisément les points forts et les points faibles de l'élève, et donc de déterminer quelles activités seront profitables. De là, un premier prérequis est que le STI explore et expérimente diverses activités afin d'évaluer leur potentiel didactique pour faire progresser l'apprenant concerné.

2. *La possibilité d'utiliser des méthodes efficaces d'optimisation*, qui ne font pas d'hypothèses spécifiques sur la façon dont les élèves apprennent et qui ont seulement besoin d'informations sur la progression de l'apprentissage estimée pour chaque activité. Nous faisons la simple hypothèse que les activités et leurs paramètres qui sont repérés comme fournissant un bon gain d'apprentissage, doivent être choisis prioritairement. Un formalisme efficace et bien étudié pour ce type de problèmes est celui du bandit multi-bras. Suivant une analogie avec des bandits manchots dans un casino, à chaque étape du processus d'optimisation nous choisissons une des machines à sous, nous misons puis nous observons le gain qui s'ensuit, l'objectif étant de découvrir le meilleur bras. Nous sommes dans un processus d'exploration/ expérimentation.

3. *Une motivation accrue*. Dans notre approche, les activités choisies doivent être en permanence celles qui possèdent le meilleur gain d'apprentissage pour être motivantes. Cette théorie des motivations intrinsèques renvoie à la zone proximale de développement (ZPD).

Dans le cadre de simulations d'étudiants virtuels, nous avons construit le logiciel Kidlearn sur l'apprentissage de l'utilisation de la monnaie (lecture, composition, addition, soustraction de nombres entiers ou décimaux) et implémenté trois approches :

- une séquence d'exercices prédéfinie construite par un expert en didactique,
- la même séquence optimisée par un algorithme, RiARiT, utilisant des informations préalables sur la difficulté et les caractéristiques des tâches proposées,
- la même séquence optimisée par un autre algorithme, ZPDES, sans information sur les tâches.

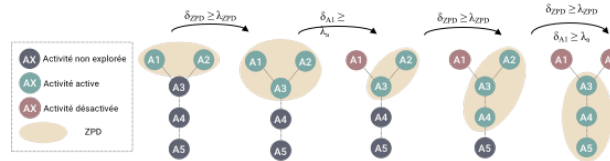


Fig. 1. Graphe de fonctionnement de ZPDES.

Nos simulations concernaient une population de 1000 étudiants, chaque étudiant étant amené à résoudre 100 exercices afin d'évaluer comment et à quelle vitesse chaque algorithme estimait et proposait les activités les plus pertinentes aux étudiants. RiARiT et ZPDES se sont avérées plus efficaces que la séquence prédéfinie ; les algorithmes pouvaient effectuer une réorganisation dynamique et modifier les paramètres des exercices, en exploitant pour cela leur exploration des résultats de l'élève [14].

Après une première expérimentation en situation réelle avec 100 élèves de CE1 ayant donné des résultats similaires aux simulations, nous avons réalisé une étude à grande échelle auprès d'élèves de CE1, basée, sur le logiciel Kidlearn en y incluant des activités plus variées et élaborées (Figure 2). Nous avons comparé deux conditions de personnalisation : une condition de personnalisation linéaire appelée séquence prédéfinie (établie par un dictateur pour constituer la condition contrôle) et une condition de personnalisation basée sur les PA, à l'aide de l'algorithme ZPDES (selon deux versions avec ou sans optimisation des PA). Chacune de ces conditions de personnalisation était subdivisée en deux autres conditions, l'une donnant à l'élève la possibilité de choisir l'objet de la transaction monétaire, et l'autre lui imposant l'objet de la transaction. Cette dernière manipulation visait à évaluer l'impact d'une prise de décision motivée par un choix personnel, sans pour autant impacter la chaîne des opérations calculatoires à opérer par l'enfant.

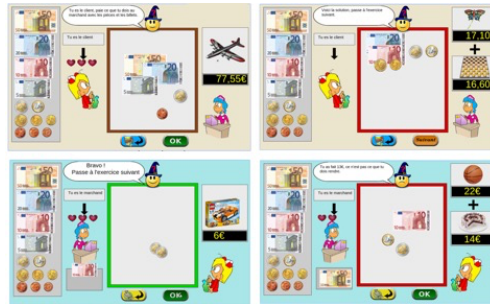


Fig. 2. Visuels de l'application KidLearn

Pour évaluer les progrès des élèves au sein de l'application Kidlearn, nous avons comparé au cours des essais successifs le niveau de difficulté atteint dans l'espace tâche ; ainsi que le niveau de réussite des élèves (Figure ci-dessous) [15]. A cela, des évaluations pré-/post-interventions ont été ajoutées pour renseigner les progrès réels des élèves et leur motivation selon 5 stratégies.

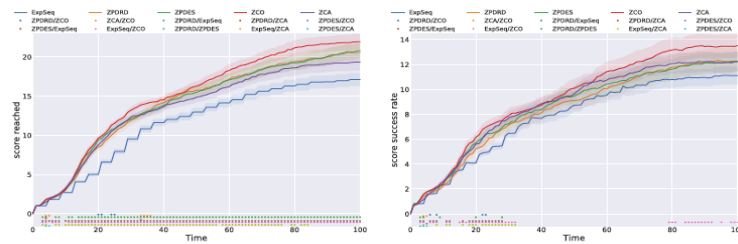


Fig. 3. Evolution dans le temps des Scores atteints et Scores de succès selon les 5 stratégies proposée (Exseq- Séquence prédéfinie ; ZPDRD- ZPDES sans optimisation ; ZPDES ; ZCO- ZPDES avec choix d'objets ; ZCA – ZPDES avec choix d'activité Achat/Vente).

### 3.2 Etudes de Généralisation de notre approche STI

Fort de ces résultats, pour en vérifier la généralisation possible, nous avons opté pour deux cas d'étude : 1) éprouver l'approche auprès d'apprenants atypiques (i.e., résistance à la diversité cognitive des apprenants) ; et 2) la tester dans un autre domaine de connaissance (i.e., transfert inter-domaine).

Nous avons ainsi proposé la version ZPDES de KidLearn à des enfants avec autisme scolarisés en Unité Locale d'inclusion Scolaire (Mazon et al., *Article en préparation*). Du fait de la forte variabilité cognitive dans l'autisme, de nombreux enfants et adolescents éprouvent des difficultés dans l'apprentissage des mathématiques, et sont même en retard sur leurs camarades à l'école. Une étude de faisabilité a alors été menée auprès de 24 élèves (13-14 ans) atteints d'autisme avec déficience intellectuelle (QI autour de 60, équivalent à un âge mental de 7-8 ans) : 14 élèves ont reçu l'application KidLearn-ZPDES, et les dix autres une application « contrôle » (jeu sans calcul). Les mesures de calcul et surtout de motivation intrinsèque ont été améliorées dans la condition KidLearn comparé à la condition contrôle. Aussi, l'amélioration en calcul était de même amplitude que celle observée pour les enfants de 6-9 ans. Pris ensemble, cela indique que ZPDES est une intervention prometteuse pour l'apprentissage du calcul dans le cadre de l'éducation spécialisée.

Dans le cadre d'un programme d'éducation thérapeutique d'enfants asthmatiques de 8 à 11 ans, le logiciel KidBreath a été conçu et déployé pendant un mois auprès de 29 enfants en condition réelle d'usage et dans un environnement non contrôlé, soit selon une séquence prédéfinie de progression d'apprentissage, soit selon une séquence personnalisée avec ZPDES [16]. Pour chaque condition, l'impact de la pratique de KidBreath a été évalué en termes d'efficacité pédagogique (connaissance de la maladie), et d'efficacité pédagogique (e.g., type de motivation suscitée). En condition personnalisée avec ZPDES, l'efficacité pédagogique a été légèrement moins concluante que la condition prédéfinie : bien que les enfants améliorent leur connaissance générale sur l'asthme, cette amélioration n'est significative. De manière intéressante, le niveau atteint de connaissance avec ou sans personnalisation était similaire alors que le nombre de contenu et le temps consacré dans la condition « ZPDES » étaient bien inférieurs à ceux observés dans la condition prédéfinie. Aussi, un plus fort impact de la condition ZPDES est observé sur la motivation intrinsèque. Ainsi, l'apprentissage personnalisé via ZPDES a produit une efficacité pédagogique accrue en termes de motivation intrinsèque, de durée d'apprentissage et d'étendue des contenus explorés, mais sans augmentation significative de l'efficacité pédagogique comparé à la condition prédéfinie. Une durée d'apprentissage plus longue qu'un mois aurait sans doute permis de mieux démontrer la meilleure efficacité pédagogique de ZPDES, du fait de l'impact de la motivation dans le temps.

## 4 Conclusion et Perspectives

En conclusion, l'ensemble des étapes expérimentales de validation de notre approche STI de personnalisation dirigée par les progrès d'apprentissage (ZPD) produit des résultats prometteurs en termes à la fois, d'efficacité (progrès observés pré- et post-intervention) et d'efficience (motivation suscitée post-intervention, notamment) pédagogique. Et, le succès de son transfert multi-domaines et de généralisation à la diversité cognitive sont des résultats encourageants. Dans une visée éducative, l'algorithme ZPDES fait aujourd'hui l'objet d'une intégration dans une suite d'outils d'apprentissage des mathématiques (programme « adaptative math », <https://www.adaptivmath.fr/team>). Enfin, pour aller plus loin dans sa généralisation, il fait aussi l'objet d'un projet applicatif au domaine de la rééducation cognitive visant un public varié en âge et en profil cognitifs.

### References

1. Oudeyer, P. Y., Gottlieb, J., & Lopes, M. Intrinsic motivation, curiosity, and learning: Theory and applications in educational technologies. *Progress in brain research*, 229, 257-284 (2016).
2. Deunk, M., Doolaard, S., Smale-Jacobse, A., & Bosker, R. J. Differentiation within and across classrooms: A systematic review of studies into the cognitive effects of differentiation practices. Groningen: Gion Onderwijs/Onderzoek (2015).
3. Itebeke, K., De Witte, K., & Schelfhout, W. The effects of computer-assisted adaptive instruction and elaborated feedback on learning outcomes. A randomized control trial. *Computers in Human Behavior*, 106666 (2020).
4. Ryan, R. M., & Deci, E. L. Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being. *American psychologist*, 55(1), 68 (2000).
5. Ryan, R. M., & Deci, E. L. Intrinsic and extrinsic motivation from a self-determination theory perspective: Definitions, theory, practices, and future directions. *Contemporary Educational Psychology*, 61, 101860 (2020).
6. Bartolomé, A., Castañeda, L., & Adell, J. Personalisation in educational technology: the absence of underlying pedagogies. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 15(1), 1-17 (2018).
7. Aleven, V., Mclaughlin, E. A., Glenn, R. A., & Koedinger, K. R. Instruction based on adaptive learning technologies. In R. E. Mayer, & P. A. Alexander (Eds.), *Handbook of research on learning and instruction* (pp. 522-560), Routledge (2017).
8. Faber, J. M., Luyten, H., & Visscher, A. J. The effects of a digital formative assessment tool on mathematics achievement and student motivation: Results of a randomized experiment. *Computers & Education*, 106, 83-96 (2017).
9. Cheung, A. C. K., & Slavin, R. E. The effectiveness of educational technology applications for enhancing mathematics achievement in K-12 classrooms: A meta-analysis. *Educational Research Review*, 9, 88-113 (2013).
10. Hew, K. F., & Cheung, W. S. (2011, July). Using Web 2.0 Technologies in K-12 School Settings: Evidence-Based Practice?. In International Conference on ICT in Teaching and Learning (pp. 319-328). Springer, Berlin, Heidelberg (2011).
11. Vygotsky, L. S. *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Cambridge, MA: Harvard University Press (1978).



12. Sweller, J. Cognitive load theory. In *Psychology of learning and motivation* (Vol. 55, pp. 37-76). Academic Press (2011).
13. Murayama, K., FitzGibbon, L., & Sakaki, M. Process account of curiosity and interest: A reward-learning perspective. *Educational Psychology Review*, 31(4), 875-895 (2019).
14. Clement B., Roy D., Oudeyer P.-Y., Lopes M., Multi- Armed Bandits for Intelligent Tutoring Systems, *Journal of Educational Data Mining* (JEDM) (2015).
15. Clément, B. Adaptive Personalization of Pedagogical Sequences using Machine Learning. Thèse - <https://hal.inria.fr> (2018).
16. Delmas, A., Clement, B., Oudeyer, P. Y., & Sauzéon, H. (2018). Fostering health education with a serious game in children with asthma: pilot studies for assessing learning efficacy and automatized learning personalization. *Frontiers in Education*, 3, p. 99 (2018).