

Vers des intelligences artificielles pour l'enseignement de la démarche d'investigation

MATTHIEU CISEL, GEORGES-LOUIS BARON

Laboratoire Education Discours Apprentissages
Université Paris-Descartes
France

mathieu.cisel@parisdescartes.fr
georges-louis.baron@parisdescartes.fr

ABSTRACT

Virtual learning environments have been used as a tool to teach science during almost three decades. The potentialities of artificial intelligence (AI) to teach science methodology, despite of the design of various intelligent tutoring systems in the field of science, remain largely unexplored. In this article, we propose a review of the literature to put into context the rise of these AIs among the main families of technologies that have been used to foster the acquisition of inquiry skills in STEM, from computer-assisted experimentation to scaffolding tools. Some of the AIs that have been developed aim at diagnosing automatically learners' mastery of the scientific approach, through the hypotheses they test, or the interpretations they make. The learning environment can incorporate a virtual world that allows the learner to control some variables and simulate some experiments based on the values of the variables they have set. Alternatively, the diagnosis of the learner's inquiry skills can be made by analyzing the requests he performs on a dataset.

KEYWORDS

Learning environments, inquiry-based learning, intelligent tutoring systems, scaffolding

RÉSUMÉ

Des environnements informatiques ont été mobilisés pour instrumenter l'enseignement de la méthode scientifique depuis plus de trois décennies. Malgré le développement de nombreux tuteurs intelligents dans le domaine de l'enseignement des sciences, le potentiel de l'intelligence artificielle (IA) pour l'enseignement de la méthode scientifique reste largement inexploré. Nous proposons à travers cette contribution une revue de littérature visant à les replacer dans le contexte de développement des environnements informatiques pour l'enseignement de la démarche d'investigation. Les environnements fondés sur l'IA proposent des scénarios plus ou moins prédéfinis supposés faire s'exercer et éventuellement diagnostiquer automatiquement les capacités d'investigation des apprenants. Ces logiciels autorisent parfois la simulation d'expériences, l'apprenant étant libre de fixer les valeurs d'une ou plusieurs variables, selon les hypothèses qu'il souhaite tester. Alternativement, l'utilisateur peut être évalué sur sa capacité à effectuer des requêtes pertinentes pour analyser un jeu de données qui est incorporé dans l'application.

MOTS-CLÉS

Environnements Informatisés pour l'Apprentissage Humain (EIAH), démarche d'investigation, tuteurs intelligents, étayage

INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies, on a vu se renforcer l'intérêt pour l'enseignement de la dimension méthodologique de la démarche scientifique, comme en témoigne le succès de la notion de démarche d'investigation (Calmettes, 2012; Hasni, Bousadra & Lebeaume, 2018). Il ne s'agit pas uniquement de faire acquérir des notions disciplinaires, mais d'inscrire dans les objectifs d'enseignement des capacités transversales aux différentes disciplines scientifiques : formuler une question de recherche, développer une hypothèse, concevoir un protocole, etc. L'approche dite de la démarche d'investigation implique une plus grande agentivité des élèves eu égard à la réalisation de ces différentes tâches.

Les manuels scolaires et les programmes ont accompagné ces évolutions, mais aussi, dans une certaine mesure, les Environnements Informatisés pour l'Apprentissage Humain (EIAH) (Edelson Gordin & Pea, 1999; Linn, 2013). Dès les années 1970, on voit se développer des logiciels de simulation et de modélisation, puis, à partir des années 1980, l'expérimentation assistée par ordinateur, ou ExAO (Faure-Vialle, 2004). L'ordinateur devient le « phénoménographe » des modèles à faire acquérir (Beaufils & Salame, 1989; Beaufils, 2009). Néanmoins, si ces artefacts peuvent être utilisés dans des scénarios qui permettent de mimer la démarche du chercheur, ils n'instrumentent pas spécifiquement la mise en œuvre d'une démarche d'investigation.

Se développe en parallèle de ces logiciels, et ce dès les années 1980, ce que l'on nomma les systèmes tuteurs intelligents (Bradáč & Kostolányová, 2017). Ce sont des intelligences artificielles dont la plupart visent à diagnostiquer automatiquement les acquis des apprenants sur la base des interactions qu'ils réalisent avec l'environnement d'apprentissage, pour éventuellement proposer en fonction des parcours de formation adaptés. La plupart de ceux qui furent utilisés dans l'enseignement des sciences, ANDES pour la physique newtonienne (Van Lehn et al., 2005), le furent pour l'enseignement de notions disciplinaires. Une poignée d'entre eux furent utilisés spécifiquement pour mesurer la capacité d'apprenants à mener à bien une démarche d'investigation. Nous proposons de revenir, dans le corps de cette contribution, de nous focaliser plus précisément sur ces intelligences artificielles, après avoir décrit succinctement comment elles s'inscrivaient dans un ensemble d'environnements visant à instrumenter l'enseignement de la démarche scientifique.

MÉTHODOLOGIE

Constitution du corpus initial

Cette revue de littérature a été motivée par la conception, au sein du consortium *Les Savanturiers du Numérique* (Cisel & Baron, 2018), d'une application dédiée à l'enseignement de la démarche scientifique. L'objectif de la revue de littérature était de fournir aux différents acteurs du consortium un panorama des travaux susceptibles d'inspirer l'application. La première version du corpus de publications a été réalisée sur la base d'articles se situant à l'intersection entre l'enseignement des sciences et les technologies éducatives. Pour ce faire, nous avons parcouru les principales revues anglophones relatives à l'enseignement des sciences – *Science Education*,

JEST, et utilisé des mots-clés comme *digital*, ou *technology* dans le titre et dans le corps du texte. Nous avons ensuite procédé de manière analogue avec des revues consacrées à la technologie de l'éducation, comme *Computers et Education*, et recherché les mots-clés *Science Education*, *Inquiry*, *Inquiry Based-Learning*.

Nous avons, en parallèle, mis en œuvre une démarche analogue avec les revues francophone comme *STICEF* dédiées aux technologies éducatives, puis sur des revues de didactique des sciences, comme la *RDST*, en nous concentrant sur les technologies liées à l'enseignement des sciences. Afin de ne pas restreindre le corpus aux principales revues du domaine – beaucoup des articles sur les technologies d'intérêt sont publiés dans des revues moins cotées ou ayant disparu, nous avons enrichi le noyau initial d'articles en parcourant leur bibliographie. Cette approche nous a permis d'atteindre un corpus de 107 articles. Néanmoins, nous n'avons pas visé l'exhaustivité, mais à dégager les principales formes d'environnements mobilisés dans le cadre de notre travail, avec les illustrations correspondantes. Une fois le corpus d'articles rassemblé, nous avons défini des critères d'exclusion pour l'incorporation ou non des logiciels dans le périmètre de notre recherche.

Exclusion des outils de simulation et de modélisation

Si un environnement n'est pas pensé spécifiquement pour instrumenter tout ou partie d'une démarche d'investigation – et spécifiquement ce type de démarche, il n'entre pas dans notre périmètre d'intérêt. Ce critère nous a amené à laisser de côté un certain tous les EIAH dont la fonction est notamment de faire acquérir des notions disciplinaires, dont notamment les logiciels de modélisation et de simulation de phénomènes, les laboratoires virtuels pédagogiques (LVP) (De Jong, Linn & Zacharia, 2013; Etkina et al., 2010; Zumbach, 2006 ;) ou l'ExAO (Faure-Vialle, 2004). Les LVP sont des salles d'expérimentation virtuelles qui permettent aux étudiants de réaliser des travaux pratiques de manière informatisée. Ils offrent une liberté d'exploration et d'essais et d'erreurs impossible à envisager dans la pratique au regard des coûts qu'impliquerait la réalisation de telles expériences en manipulant des produits coûteux. Néanmoins, les outils de simulation d'expérience, s'ils peuvent être utilisés dans une approche pédagogique fondée sur la démarche d'investigation, n'ont pas été conçus spécialement pour étayer la mise en œuvre d'une démarche d'investigation, ou pour diagnostiquer automatiquement la capacité à mener celle-ci à bien. Cette considération nous a poussé à les écarter pour nous concentrer sur les EIAH qui ont été pensés en premier lieu dans cette optique.

Vers le développement d'EIAH instrumentant exclusivement l'enseignement de la démarche d'investigation

Dans le domaine de l'instrumentation de l'enseignement de la démarche d'investigation, les environnements qui ont connu le plus d'écho, notamment sur le plan scientifique, sont ceux qui visent à faciliter la production d'écrits par les élèves (Edelson et al., 1999). Ces environnements reposent dans une large mesure sur ce que l'on nomme les étayages, ou *scaffolds* dans la littérature anglo-saxonne, permettant de simplifier des tâches de recherche d'information (Quintana, Zhang & Kravic, 2005) ou d'écriture. Ces étayages visent à restreindre la complexité de la tâche permettant à l'enfant de résoudre des problèmes qu'il ne peut accomplir seul. Ils peuvent notamment aider à formuler des questions de recherche, des hypothèses, des protocoles, comme c'est le cas pour le Knowledge Forum (Scardamalia & Bereiter, 2006). Ce dernier environnement repose sur la théorie du Knowledge Building, ou co-élaboration des connaissances dans la littérature francophone (Impedovo & Andreucci, 2016) ; il incorpore une dimension collaborative dans le processus de rédaction de ces idées.

Nous pouvons différencier ces EIAH en premier lieu sur la base de la multiplicité des tâches instrumentées. À une extrémité du gradient, la focale porte sur l'écriture d'écrits, éventuellement accompagnés d'images, avec le Knowledge Forum. À l'autre, l'ensemble d'une démarche est concerné, de la question initiale à la formulation des conclusions, en passant par le processus d'idéation ou de recherche documentaire. C'est le cas de *WISE*, pour *Web-based Inquiry Science Environment* (Slotta & Linn, 2009), mais aussi du projet européen SCY, pour *Science Created by You* (De Jong et al., 2010). Ce dernier environnement est centré autour de la création d'objets d'apprentissage pour les apprenants, les Emerging Learning Objects, qu'ils produisent au cours de diverses « missions ».

Il est enfin des approches qui contraignent davantage l'activité, en se focalisant davantage sur la conception expérimentale, sans s'y restreindre. L'apprenant doit alors choisir le matériel, des réactifs et leurs quantités, tout en laissant à l'enseignant une certaine agentivité dans la scénarisation de l'activité. L'environnement LabBook (Wajeman, Girault, d'Ham & Marzin-Janvier, 2015), en constitue une illustration connue dans la littérature francophone. Il est issu d'évolutions de l'EIAH Copex Chimie, un environnement dont la fonction était d'étayer la conception de protocoles incluant des titrages de solutions (Girault & d'Ham, 2014). L'environnement a été adapté pour instrumenter la conception expérimentale dans d'autres disciplines ; il a été par exemple utilisé dans diverses expériences en biologie (Bonnat, 2017). C'est dans ce contexte de développement progressif de tels EIAH qu'a émergé, plus marginalement, des environnements pensés pour diagnostiquer automatiquement, via une IA, les acquis des élèves.

Le premier type de tuteur intelligent que nous évoquerons instrumente également une tâche de production d'écrits scientifiques, la production étant alors analysée automatiquement pour analyser la scientificité du propos. Dans le cas de Belvedere (Suthers, Weiner, Connelly & Paolucci, 1995), exemple historique de cette approche, l'apprenant est confronté à un phénomène, comme la disparition des dinosaures, et proposer une hypothèse pour l'expliquer ; l'environnement évalue si l'hypothèse est rédigée de manière suffisamment précise et étayée pour satisfaire aux critères fixés par les concepteurs de l'EIAH.

Dans d'autres tuteurs intelligents, dont Inq-ITS (Gobert, Pedro, Raziuddin & Baker, 2013), la démarche d'investigation est considérée comme une procédure, dont la maîtrise est testée par l'analyse des décisions prises par l'utilisateur. On peut *a minima* distinguer ceux qui reposent sur la simulation d'expériences (Gobert et al., 2013), et ceux qui se fondent sur l'analyse d'un jeu de données embarqué dans l'environnement (Shute & Glaser, 1990). Dans le premier cas, l'utilisateur manipule diverses variables, après avoir proposé des hypothèses afférentes, puis, lance l'expérience en fonction et en tire des conclusions. Cette approche a pour source d'inspiration les recherches séminales sur le développement de la pensée scientifique, notamment les travaux de Piaget et Inhelder et de leurs prolongements contemporains (Bryant et al., 2015). Ces auteurs de référence ont mené chez l'enfant une réflexion approfondie sur les tâches permettant de réaliser un diagnostic niveau d'acquisition de la pensée scientifique, et appuyer ce développement. Il est des tâches piagétienne classiques – parfois nommées Tâches de Contrôle des Variables (TCV) (Bryant et al., 2015) – comme le mouvement d'un pendule, de la flottaison d'un solide ou de la trajectoire d'un wagon sur un plan incliné, et pour lesquelles des applications spécifiques ont été créées.

Dans Inq-ITS (Gobert et al., 2013), l'apprenant doit identifier la manière dont un jeu de variables influence la distance parcourue par le wagon après que celui-ci a glissé le long d'une pente : inclinaison, longueur du plan incliné, poids du wagon. Le rôle de l'élève est d'identifier les variables qu'il souhaite faire varier, celles qu'il souhaite maintenir constantes, celles qu'il

s'agit de mesurer, et d'émettre parallèlement un certain nombre d'hypothèses eu égard à l'influence de telle ou telle variable, puis de faire tourner une simulation. En fonction des hypothèses testées par l'apprenant, Inq-ITS infère automatiquement quant à la manière dont raisonnent les élèves. L'étape sur laquelle le diagnostic se concentre varie d'un tuteur à l'autre.

Alternativement, pour les cas qui ne se prêtent pas à la simulation d'expériences, le tuteur intelligent analyse les requêtes adressées, pour tester des hypothèses, à un jeu de données embarquées dans l'environnement. Cette approche facilite l'application de cette démarche aux sciences non expérimentales, comme les sciences humaines, où la manipulation de variables n'est pas la norme. On retrouve cette logique dans un environnement comme le système tuteur intelligent *Smithtown* (Shute & Glaser, 1990), relevant des sciences économiques. La base de données contient un certain nombre d'éléments sur le prix et l'abondance de produits divers. L'objectif de ce tuteur intelligent est de tester la capacité de l'apprenant à effectuer et tester des hypothèses sur la manière dont fonctionne la loi de l'offre et de la demande. Les différents environnements cités, qui relèvent de l'intelligence artificielle, se distinguent alors selon l'approche qui est suivie pour produire un modèle de l'apprenant ; nous renverrons aux revues sur les typologies de systèmes tuteurs intelligents pour un approfondissement de la question (Bradáč & Kostolányová, 2017).

CONCLUSION

Les EIAH fondés simplement sur l'étayage de productions écrites présentent l'avantage de se prêter à une grande diversité de scénarios pédagogiques, mais requièrent de ce fait, de la part des praticiens, une certaine maîtrise de l'enseignement de la démarche d'investigation. Le travail de médiation est moindre pour l'enseignant dans le cas des systèmes tuteurs intelligents. Néanmoins, l'un des problèmes que pose l'utilisation de ces IA en situation écologique réside selon nous dans l'adéquation des thématiques portées par les scénarios embarqués avec les curriculums prescrits. Nous voyons au moins deux pistes d'évolutions possibles pour l'utilisation de tuteurs intelligents pour l'évaluation des acquis en matière de maîtrise de la démarche d'investigation.

La première consiste à rester dans une logique d'étayages des productions d'écrits, suffisamment génériques pour autoriser les enseignants à mobiliser l'environnement sur la thématique de leur choix. Le tuteur intelligent aurait alors pour fonction de faire de l'aide au diagnostic humain sur la base de l'analyse de ces productions écrites, dans le prolongement de ce qui fut fait dans les versions initiales de *Belvedere* (Suthers et al., 1995), mais sans que l'environnement n'embarque de sujets d'étude prédéfinis. La différence résiderait dans le fait que le diagnostic n'est pas fourni directement à l'apprenant, mais à l'enseignant, qui déciderait de sa pertinence avant de modifier et de transmettre les éventuels diagnostics aux élèves. On se situe dans une logique d'hybridation entre les différentes approches que nous avons décrites jusqu'à présent.

La seconde approche consisterait à investir les intelligences artificielles qui disposent d'outils-auteurs (Aleven, McLaren, Sewall & Koedinger, 2006; Murray, 1999). On peut alors envisager des scénarios prédéfinis, où le diagnostic est fait entièrement par le tuteur intelligent, mais que celui-ci ait été créé et paramétré en amont par des enseignants non-spécialistes, et pas uniquement par une équipe de concepteurs experts de l'intelligence artificielle.

RÉFÉRENCES

- Aleven, V., McLaren, B. M., Sewall, J., & Koedinger, K. R. (2006). The Cognitive Tutor Authoring Tools (CTAT): Preliminary evaluation of efficiency gains. In M. Ikeda, K. D. Ashley, & T.-W. Chan (Eds.), *Intelligent Tutoring Systems* (pp. 61-70). Berlin Heidelberg: Springer.
- Beaufils, D. (2009). Le modèle et son phéno­ménographe. *Aster*, 48, 15-38.
- Beaufils, D., & Salame, N. (1989). Quelles activités expérimentales avec les ordinateurs dans l'enseignement des sciences? *Aster*, 8, 55-79.
- Bonnat, C. (2017). *Etayage de l'activité de conception expérimentale par un EIAH pour apprendre la notion de métabolisme cellulaire en terminale scientifique*. Doctoral thesis, France, Université Grenoble Alpes. Retrieved from <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01562709/>.
- Bradáč, V., & Kostolányová, K. (2017). Intelligent tutoring systems. *Journal of Intelligent Systems*, 26(4), 717-727.
- Bryant, P., Nunes, T., Hillier, J., Gillroy, C., & Barros, R. (2015). The importance of being able to deal with variables in learning Science. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 13(1), 145-163.
- Calmettes, B. (Dir.) (2012). *Didactique des sciences et démarches d'investigation. Références, représentations, pratiques et formation*. Paris: Harmattan.
- Cisel, M., & Baron, G.-L. (2018). Conception d'un EIAH à destination du programme Savanturiers : Difficultés engendrées par une approche inductiviste de la spécification des besoins. Paper presented at the « 3^{ème} conférence École et Technologies de l'Information et de la Communication », Paris, France.
- De Jong, T., Linn, M. C., & Zacharia, Z. C. (2013). Physical and virtual laboratories in science and engineering education. *Science*, 340(6130), 305-308.
- De Jong, T., Joolingen, W. R. V., Giemza, A., Girault, I., Hoppe, U., Kindermann, J., & Zanden, M. V. D. (2010). Learning by creating and exchanging objects: The SCY experience. *British Journal of Educational Technology*, 41(6), 909-921.
- Edelson, D. C., Gordin, D. N., & Pea, R. D. (1999). Addressing the challenges of inquiry-based learning through technology and curriculum design. *Journal of the Learning Sciences*, 8(3-4), 391-450.
- Etkina, E., Karelina, A., Ruibal-Villasenor, M., Rosengrant, D., Jordan, R., & Hmelo-Silver, C. E. (2010). Design and reflection help students develop scientific abilities: Learning in introductory Physics laboratories. *Journal of the Learning Sciences*, 19(1), 54-98.
- Faure-Vialle, B. (2004). L'expérimentation assistée par ordinateur, aide et obstacle en travaux pratiques de biologie au lycée. *Carrefours de l'Éducation*, 17, 118-128.
- Gobert, J. D., Pedro, M. S., Raziuddin, J., & Baker, R. S. (2013). From log files to assessment metrics: Measuring students' science inquiry skills using educational data mining. *Journal of the Learning Sciences*, 22(4), 521-563.
- Girault, I., & d'Ham, C. (2014). Scaffolding a complex task of experimental design in chemistry with a computer environment. *Journal of Science Education and Technology*, 23(4), 514-526.

Hasni, A., Bousadra, F., & Lebeaume, J. (Dirs.) (2018). *Les démarches d'investigation scientifique et de conception technologique. Regards croisés sur les curriculums et les pratiques en France et au Québec*. Saint Lambert, Québec: Éditions Cursus Universitaire.

Impedovo, M. A., & Andreucci, C. (2016). Co-élaboration de connaissances nouvelles: Du modèle théorique à ses outils technologiques. *STICEF*, 23, 57-74.

Linn, M. C. (2013). *Internet Environments for Science Education*. Mahwah: Routledge.

Murray, T. (1999). Authoring intelligent tutoring systems: An analysis of the state of the art. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 10, 98-129.

Quintana, C., Zhang, M., & Krajcik, J. (2005). A framework for supporting metacognitive aspects of online inquiry through software-based scaffolding. *Educational Psychologist*, 40(4), 235-244.

Scardamalia, M., & Bereiter, C. (2006). Knowledge building: Theory, Pedagogy, and Technology. In K. Sawyer (Ed.), *Cambridge Handbook of the Learning Sciences* (pp. 97-118). New York: Cambridge University Press.

Slotta, J. D. & Linn, M. C. (2009). *WISE Science*. New York: Teachers College Press.

Shute, V. J., & Glaser, R. (1990). A large-scale evaluation of an intelligent discovery world: Smithtown. *Interactive Learning Environments*, 1(1), 51-77.

Suthers, D., Weiner, A., Connelly, J., & Paolucci, M. (1995). Belvedere: Engaging students in critical discussion of science and public policy issues. In *Proceedings of the 7th World Conference on Artificial Intelligence in Education* (pp. 266-273). Washington DC: AI-Ed 95.

Van Lehn, K., Lynch, C., Schulze, K., Shapiro, J. A., Shelby, R., Taylor, L., ... & Wintersgill, M. (2005). The Andes physics tutoring system: Lessons learned. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 15(3), 147-204.

Wajeman, C., Girault, I., d'Ham, C., & Marzin-Janvier, P. (2015). *Students' reflection on experimental design during an innovative teaching sequence with Labbook*. Paper presented at the European Science Education Research Association (ESERA) Conference 2015 Helsinki, Finland.

Zumbach, J. (2006). Learning life sciences: Design and development of a virtual molecular Biology learning lab. *Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching*, 25, 281-300.