

## TABLE RONDE : L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Fabien Emprin\*

## RÉSUMÉ

L'intelligence artificielle (IA) est en fort développement dans la société : l'IA index (Zhang et al. 2022) de l'université de Stanford qui partage les données sur l'intelligence artificielle dans le monde annonce un investissement privé dans l'IA en 2021 d'environ 93,5 milliards de dollars. C'est plus du double de l'investissement privé total de 2020. Ces technologies liées au numérique, à la récolte et au traitement de données, aux algorithmes d'apprentissage (deep Learning, machine learning...) questionnent nécessairement le monde de l'enseignement. Si la didactique s'intéresse depuis longtemps aux questions liées à l'IA (Balacheff, 1994), ces dernières années ont changé la donne grâce à la combinaison de la puissance de calcul et la disponibilité de données massives. L'objectif de cette table ronde de l'EEDM est de questionner l'IA sous l'angle didactique en faisant dialoguer des chercheurs venant de différents horizons : didactique des mathématiques et informatique, français et nord-américains.

Mots-clefs : Intelligence artificielle, didactique des mathématiques

## ABSTRACT

Artificial intelligence (AI) and learning analytics (LA) are growing rapidly in society: the AI Index (Zhang et al. 2022) from Stanford University, which shares data on artificial intelligence around the world, announces a private investment in AI in 2021 of about \$93.5 billion. That's more than double the total private investment in 2020. These technologies linked to digital technology, to data collection and processing, to learning algorithms (deep learning, machine learning...) necessarily question the world of teaching. If didactics has long been interested in issues related to AI (Balacheff, 1994), these last years have changed the deal thanks to the combination of computing power and the availability of massive data. The objective of this EEDM round table is to question AI from a didactic point of view by bringing together researchers from different backgrounds: mathematics didactics and computer science, French and North American.

Keywords: artificial intelligence, learning analytics, mathematics education

## INTRODUCTION

Dès l'émergence des technologies numériques, dans la société comme à l'école (dans les années 1970 en France), la question des relations entre recherche en informatique (notamment l'Intelligence Artificielle - IA) et la didactique (Balacheff, 1994) s'est posée. Définir et modéliser la connaissance y est central. Par ailleurs, la collecte et le traitement des réponses des élèves sont des tâches de l'enseignant qui prend des décisions en fonction des informations recueillies sur les apprentissages de l'élève de façon formelle ou informelle. Les technologies numériques permettent de collecter des traces de l'activité des élèves, à l'école comme en dehors, et ouvre la porte à une nouvelle forme d'analyse, assistée par l'ordinateur : les *learning analytics* (LA). Si la question n'est pas récente, ces dernières années ont changé la donne grâce à la combinaison de la puissance de calcul, la disponibilité de données massives due notamment à l'accès facilité aux technologies numériques (smartphone dans la poche des élèves, tablettes, ordinateurs...). En marge du travail du thème 3 sur les technologies numériques, nous avons voulu faire le point sur les questions vives liées à l'IA sous la forme d'une table ronde regroupant des chercheurs en didactique des mathématiques et en informatique travaillant sur ces questions en France et dans d'autres pays. Nous avons, alors, posé quatre questions à quatre chercheurs : d'abord, (1) qu'est-ce que l'IA pour vous, pour quoi et par qui ? Ensuite, (2) quelles sont les interactions et les « responsabilités » réciproques entre l'informatique et la didactique ? En troisième lieu, (3) quelle peut être la relation entre les savoirs / connaissances et l'IA ? Enfin, (4) quels cadres théoriques mobiliser ?

Ce compte rendu vise à donner un aperçu des échanges, sans en être une retranscription. Il est suivi d'un texte complémentaire fourni par Philippe R. Richard permettant d'approfondir spécifiquement certains aspects.

---

\* Université de Reims Champagne Ardenne – URCA – CEREP – IREM de Reims

## LES INTERVENANTS

Comme nous l'avons annoncé, notre intention est de mettre en dialogue des chercheurs travaillant en didactiques des mathématiques et en informatique.

Nicolas Balacheff est directeur de recherche émérite au CNRS, membre du Laboratoire d'Informatique de Grenoble (LIG). Chercheur en didactique des mathématiques, il travaille à l'interface de l'informatique et de la didactique sur la question des EIAH (Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain). Il nous apporte un regard englobant sur la problématique grâce à l'expérience des collaborations avec les chercheurs en IA depuis la fin des années 1980.

Philippe R. Richard est Professeur titulaire à la Faculté des sciences de l'éducation - Département de didactique de l'université de Montréal. Il est éditeur et promoteur de l'ouvrage *Mathematics education in the digital area of artificial intelligence. How Artificial intelligence can serve Mathematical Human learning* (Richard, Vélez et Van Vaerenbergh, 2022). Cet ouvrage de synthèse permet de faire le point sur les rapports entre IA et didactique des mathématiques. Il nous permet d'avoir un point de vue extérieur, nord-américain, sur le système éducatif français qu'il connaît, de plus, très bien.

Ernesto Exposito est Professeur des Universités en Informatique à l'Université de Pau et des Pays de l'Adour. Il est responsable d'un *Work Package* dans le projet ANR Hype 13 (HYbrider et Partager les Enseignements) porté par un consortium de 12 universités françaises, lauréates de l'appel à projet « Hybridation des formations de l'enseignement supérieur » dans le cadre du Programme d'Investissement d'Avenir (PIA) de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Sa contribution nous permet de mettre en dialogue les recherches en informatique et en didactique des mathématiques grâce à son expérience de pilotage d'un projet pluridisciplinaire.

Vanda Luengo, est Professeure des Universités en informatique et responsable de l'équipe MOCAH du laboratoire LIP6 à Sorbonne Université. Elle travaille dans le domaine de l'IA pour l'éducation, notamment en lien avec la chirurgie orthopédique (projet Teleos), l'apprentissage des connaissances non techniques en situation critique dans la conduite automobile, l'anesthésie et la gynécologie obstétrique (projet MacCoy Critical), l'apprentissage des mathématiques en primaire (AdaptivMath) ou au collège (MindMath). Ces nombreux projets en lien avec la didactique des mathématiques et son parcours d'ingénieure puis de chercheuse en informatique la place à l'interface entre les deux champs de recherche.

Les projets auxquels ces chercheurs et chercheuses ont contribué permettront d'illustrer le propos.

## INTRODUCTION ET GENERALITES SUR L'IA

### 1. Qu'est-ce que l'IA pour vous ? Pour qui ? Par qui ?

La question de l'IA est problématisée du point de vue de l'informatique et de l'apprentissage des mathématiques, depuis longtemps, au niveau international. Par exemple, les premiers tuteurs cognitifs (*cognitive tutors*®) de *Carnegie Learning* dans la décennie 80 ont été développés dans le domaine de la géométrie ou de l'algèbre (Anderson et al., 1995).

De quoi parle-t-on quand on évoque l'IA ? Est-ce un effet de mode (le fait que des travaux portent sur cette question depuis plusieurs dizaines d'année nous amène à répondre plutôt non) ? est-ce une histoire de machine ? un prolongement modélisé de l'humain ? un partenariat humain-machine ?

En tous cas, parmi les questions, semblent apparaître celles des interactions (Homme  $\leftrightarrow$  machine), celle de l'intelligence et de la modélisation (de la connaissance, des processus d'apprentissage, de l'élève...).

Vandebrouck, F., Emprin, F., Ouvrier-Buffet, C. & Vivier, L. (dir.) (2023). Nouvelles perspectives en didactique des mathématiques - Preuve, Modélisation et Technologies Numériques. Volume des ateliers des actes de EE21.

Des premières pistes sur la question de l'intelligence nous renvoient à la théorie des intelligences multiples (Gardner, 1983), à l'intelligence augmentée dans l'interaction (Engelbart, 1962) et à l'intelligence collective avec le succès de Sapiens (Henrich, 2021). Nous revenons, dans la suite du texte, sur les deux autres termes.

## 2. Du point de vue de l'informatique

L'IA peut être définie comme « L'étude et la conception de systèmes informatiques qui perçoivent leur environnement et agissent comme des êtres humains » McCarthy (Dartmouth Conference, 1956 dans McCarthy et al. 2006).

Cependant, il y a des multiples définitions de l'intelligence artificielle. Russel et Norvig proposent de tenir compte des deux dimensions : la pensée et l'action. Ainsi, pour eux, ils existent quatre grands types de système d'IA, comme décrit dans le tableau 1.

	Humain	Rationnel
Pensée	Systèmes qui pensent comme les humains	Systèmes qui pensent rationnellement
Action	Systèmes qui agissent comme des humains	Systèmes qui agissent rationnellement

**Tableau 1.** – Tableau issu de (Russell & Norvig – *Artificial Intelligence: A Modern Approach*) En Français : *Intelligence artificielle 3ème édition, 2010.*

Cette différenciation proposée par les auteurs montre bien les aspects interdisciplinaires qui ont construit le domaine. Ainsi, par exemple, les systèmes « qui pensent comme un humain » font référence plus spécifiquement aux approches cognitives qui combinent les modèles informatiques de l'IA et les approches psychologiques. « Les systèmes qui agissent comme des humains » associent des nombreuses branches de l'IA tels que le traitement du langage naturel (TAL), la représentation des connaissances, le raisonnement automatisé, l'apprentissage automatique, la vision par ordinateur et la robotique et associent des domaines tels que la linguistique pour le TAL ou la mécanique pour la robotique.

L'interaction entre ces quatre types de systèmes d'IA et l'éducation existe depuis la naissance de l'IA. Le premier tuteur intelligent, nommé Scholar, est développé dans le cadre de la thèse de Carbonnell (1970), qui propose un système générant des réponses adaptées à l'apprenant en navigant sur un réseau sémantique sur des connaissances en géographie. Un autre exemple emblématique est celui de Clancey (1987) qui propose un tuteur intelligent en médecine, nommé Guidon, en s'appuyant sur le système experte Mycin (Buchanan & Shortliffe, 1984) qui est un système de connaissances expertes pour le diagnostic en médecine et en rajoutant des règles

Ces travaux sont précurseurs de la communauté de l'IA en éducation, communauté qui traite les spécificités du domaine de l'éducation. Ainsi, à partir des travaux sur les tuteurs intelligents trois types des modèles sont étudiés (Wenger 1987) : le modèle du domaine à enseigner, le modèle de l'apprenant et le modèle pédagogique.

- Le modèle du domaine fait référence aux domaines de connaissances à enseigner, comme c'est le cas de Mycin dans le cas précédemment cité.
- Le modèle pédagogique fait référence aux connaissances et expertises d'enseigner (type d'interaction pédagogique, rétroactions, suivi).
- Le modèle de l'apprenant fait référence aux connaissances sur l'apprenant comme l'état de connaissances, ses réussites et difficultés, son état émotionnel ou méta cognitif.

Ces modèles restent d'actualité, les évolutions sont relatives à leurs représentations, leurs usage (comme le modèle ouvert de l'apprenant) ou les techniques de raisonnement (algorithmes) utilisant les modèles. Toutefois, l'évolution la plus importante est liée aux

méthodes et algorithmes s'appuyant sur les données, en particulier des données d'interaction entre les apprenants et des systèmes numériques (Luckin et al., 2016).

Dans tous ces systèmes nous pouvons donc distinguer trois types d'approches de modélisation. Les approches d'IA symbolique basées sur des connaissances expertes, tels que les modèles logiques, règles expertes ou ontologies ; les approches numériques basées sur des données, tels que le clustering ou les techniques de *deep learning* et, enfin, les approches mixtes combinant les deux, tels l'apprentissage des règles à partir des données combinées à des règles expertes ou la conception d'un modèle de décision basé sur un algorithme par renforcement utilisant des connaissances expertes et évoluant à partir des données.

Ainsi, l'IA pour l'éducation est une thématique de recherche spécifique qui se distingue de l'IA générale. Elle est développée depuis plus de 40 ans (<https://iaied.org/>) de recherches pluridisciplinaires avec les SHS, la psychologie, la didactique, la linguistique, la sociologie visant à construire des théories et des modèles. Cette approche pluridisciplinaire pose la question de la définition d'objets communs.

### 3. Du point de vue de la didactique

L'intelligence artificielle pose la question de la modélisation de la connaissance, de l'élève, des interactions didactiques et du raisonnement ce qui la distingue des points de vue des autres sciences de la connaissance et de l'apprentissage.

Dans ce contexte, on peut se demander :

### 4. Comment l'IA peut-elle aider l'enseignant ? à enseigner ? à se former ?

Quelle est la place de l'IA dans l'accompagnement et l'évaluation des étudiants ? Peut-elle être facteur d'individualisation, d'adaptation des apprentissages ?

Une piste de réponse vient du projet Hype 13 dont un des *Work package* porte sur une transformation durable des pratiques d'enseignement et d'apprentissage soutenue par l'intelligence artificielle au service de l'expérience humaine. Si la relation entre humains (professeurs et élèves) est primordiale et est d'ailleurs réaffirmée dans la conférence de consensus sur l'IA en éducation (ONU-UNESCO, 2019) quelle automatisation est permise par l'IA pour l'aide à la décision ? Nous l'avons vu, les tuteurs intelligents et l'individualisation sont au cœur des définitions et des concepts de l'IA en éducation ce qui apporte une première réponse à cette question.

L'hybridation des formations (notamment en raison de la crise du COVID 19), permet le recueil et le traitement des traces d'apprentissage. Ces dernières sont présentes de façon non homogène dans les plateformes d'enseignement à distance (LMS – *Learning Management System* type Moodle), les logiciels de visio conférence (type Zoom), les plateformes d'interactions (type Wooclap). La présence de ces traces renvoie au *data mining*, au traitement et à la visualisation mais aussi à la question de la formation des enseignants à l'usage de ces outils. Le projet Hype13 allie développement d'outils et formation des enseignants universitaires D'autres initiatives existent comme le MOOC « l'Intelligence Artificielle... avec intelligence ! ». de la Higuera (2020) propose un aperçu des questions clef sur la formation.

Nous abordons, à présent, la question des interactions entre les champs disciplinaires.

## QUELLES SONT LES INTERACTIONS ET « RESPONSABILITES » RECIPROQUES ENTRE INFORMATIQUE ET DIDACTIQUE ?

Pour aborder les échanges entre informatique et didactique, commençons par regarder les implications côté machine et côté humain.

Côté machine, l'IA peut être la simulation de processus d'intelligence humaine par une phase d'apprentissage, c'est-à-dire l'acquisition d'information et ses règles d'utilisation, une phase de raisonnement, soit l'utilisation de règles pour tirer des conclusions approximatives ou définitives, et enfin une phase d'autocorrection.

Nous pouvons distinguer une approche symbolique où l'ordinateur agit en fonction de règles entrées par un Humain (possibilités de lien causal tout en posant le problème d'une résolution à croissance exponentielle) et une approche numérique qui s'appuie sur une analyse de données pour prendre des décisions (stratégie de résolution efficace, mais avec un effet boîte noire sur le fonctionnement interne).

Côté humain, il s'agit d'une question d'idonéité interactive : perspective du concepteur (dispositif didactique, informatique) et celle de l'utilisateur (élève, enseignant, formateur)

Du point de vue de l'apprenant, cela renvoie au critère du degré d'initiative laissé à l'élève comme base de sa classification des EIAH (Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain). Dans les systèmes tuteur, l'initiative de l'élève est contrôlée le logiciel en fonction de l'analyse réalisée et de la stratégie de tutorat et à l'opposé dans les micromondes l'élève a toute liberté de sa démarche et de ses choix pour atteindre le but.

Du point de vue de la conception, tel que déjà proposé par Balacheff (1994), c'est la connaissance qui est à la croisée de la didactique et de l'IA. Concernant les trois modèles cités précédemment, le modèle du domaine est au centre entre didactique et IA, mais la modélisation de l'apprenant et de la pédagogie fait émerger également des questions de recherche à l'intersection entre la didactique et l'IA. En effet, la modélisation appelée pédagogique peut tenir compte des dimensions didactiques comme la fonction d'étayage ou la production des rétroactions épistémiques (Luengo, 2009).

Dans les approches symboliques, l'informatique doit proposer des modèles et des représentations suffisamment utilisables pour que la connaissance experte issue de la didactique soit aisément réifiable. D'autre part, les connaissances didactiques nécessitent d'être calculables et de garantir la pertinence et couverture du domaine représenté pour le bon fonctionnement du système. La modélisation des conceptions de l'apprenant en géométrie à partir du modèle *ckç* et d'une approche multi agent émergent (Weber, Pesty & Balacheff, 2002) est un des premiers exemple Français. Le modèle *ontoprax* (Chaachoua, Ferraton & Desmoulin, 2017), qui a été testé en algèbre élémentaire, est également un bon exemple de ce type d'interaction, s'appuyant sur le cadre praxéologique et la représentation sous forme d'ontologies.

Pour les approches purement numériques, plusieurs interactions semblent intéressantes. Ainsi, pour les algorithmes d'IA non supervisée certaines connaissances résultantes (par exemple les ensembles résultants d'un clustering) peuvent être expliquées à travers des analyses didactiques. Un exemple d'application réel, qui pourrait proposer une interaction intéressante est le projet *Adaptiv'Math* où des résultats scientifiques ont conduit à la proposition d'activités de résolution des problèmes sur les 4 opérations et des activités de modélisation. Ce projet associe deux algorithmes d'intelligence artificielle : (1) pour des parcours individualisés (ZPDES [2]) et (2) pour synthétiser les expériences individuelles de chaque élève (Harrak & Bouchet, 2021).

Par ailleurs, pour les algorithmes d'IA supervisée, « la labélisation des données » ou connaissances de démarrages des algorithmes peuvent être guidés par des connaissances didactiques.

Enfin pour les approches mixtes, les modèles, théories et connaissances didactiques peuvent accompagner la modélisation informatique, les méthodes de raisonnement ou d'interaction. Ainsi, pour la modélisation informatique un exemple est le projet *TELEOS* où en le modèle *ckc* (Balacheff et Gaudin, 2003) est à la base de la structure du réseau bayésien (Chieu, Luengo, Vadcard et Tonetti, 2010) mais ensuite le système est capable d'évoluer à partir des données

d'interaction entre le système et l'apprenant (Toussaint et al., 2015). Aussi, les connaissances didactiques peuvent être utiles dans le raisonnement algorithmique pour atténuer le problème du démarrage à froid d'un l'algorithme d'IA, comme dans le cas du projet *MindMath* où les connaissances didactiques sur l'apprentissage d'algèbre élémentaire et la géométrie orientent deux algorithmes, l'un permettant la proposition des nouvelles situations d'apprentissage et l'autre permettant la prise de décisions afin de proposer des rétroactions épistémiques immédiates (Jolivet et al., 2021).

### 1. Des exemples de projets

Dans les projets pluridisciplinaires de recherche de type Hype 13 (Lamine Gueye et Exposito, 2022), les échanges entre les différents domaines de recherche apparaissent notamment au moment du développement d'outils. L'analyse du besoin et la définition du cahier des charges ne peut se faire qu'en interaction, au risque d'obtenir un outil techniquement fiable mais non adéquat. L'analyse des usages est aussi un moment extrêmement riche d'échanges entre les spécialités pour comprendre les détournements, les freins et les leviers à la diffusion d'un outil. Les phases de test permettent d'entrer dans une boucle d'adaptation et d'amélioration des outils.

Dans le projet QED-Tutrix associant notamment un doctorant en *computer science* et un chercheur en didactique, il s'agit d'équilibrer les interactions entre l'intelligence naturelle de l'utilisateur et l'intelligence artificielle du logiciel tuteur. On voit bien, ici, la nécessité d'interaction entre les domaines pour, plus spécifiquement, aborder « la problématique de la lisibilité et de l'accessibilité des preuves, et de l'adaptabilité des preuves aux raccourcis inférentiels. Cette exigence d'intégration des utilisateurs dès la conception du logiciel est cruciale » (Font et al., 2018, traduction libre). Par ailleurs, ce travail nécessite la mobilisation de cadres théoriques spécifiques à la didactique tels que la théorie des situations d'enseignement des mathématiques et plus particulièrement la notion de contrat didactique (Brousseau, 1990) et le modèle de l'espace de travail mathématique (ETM) (Kuzniak, 2011) mais aussi spécifiques aux sciences de l'informatique comme les études sur les preuves automatiques présentent dans GRAMY (Matsuda & Kurt, 2005) par exemple.

Dans *MindMath*, le concept de praxéologies de Chevallard (1999) permet une modélisation de l'apprenant vis-à-vis du savoir et ainsi raisonner sur le parcours d'apprentissage (Jolivet et al., 2021).

## LA QUESTION DES SAVOIRS ET DES CONNAISSANCES

Le rôle des connaissances et des savoirs apparaît dans les rétroactions visant à donner une information qui permette d'accéder à une solution correcte à la connaissance experte. L'IA permet de dépasser les rétroactions normatives vers une rétroaction centrée sur les représentations, connaissances (éventuellement erronées) des élèves. On peut distinguer les rétroactions sous forme de boucles longues (comme dans le projet TELEOS), permettant de mobiliser des savoirs de plusieurs natures : procéduraux, psychomoteurs, déclaratif et de boucles courtes (projet *MindMath*), avec une rétroaction immédiate basée sur un modèle de décision.

L'IA peut également avoir un effet boîte noire, comme nous l'avons mis en évidence plus haut en décrivant les approches statistiques. Il n'y a pas d'accès aux règles de décisions qui sont prises sur des calculs statistiques réalisés sur des quantités de données non accessibles à un humain.

Une proposition mise en œuvre dans QED-Tutrix est de mettre, au cœur des décisions, la combinaison des deux approches : statistique et symbolique.

## CADRES THEORIQUES ET CONCLUSION

Dans cette dernière partie a abordé les cadres théoriques permettant de questionner la modélisation des connaissances, du raisonnement, de l'apprenant, la problématique de l'erreur et de son traitement... Les traces, la mémoire et l'oubli par rapport à la biographie didactique de l'élève, de l'enseignement posent également la question de l'éthique par rapport à l'IA ?

Les cadres mobilisés par les chercheurs ont déjà en partie été évoqués dans les exemples ; il s'agit de la Théorie des situations didactiques en mathématique (TSDM) (Brousseau, 1998) et Théorie des espaces de travail mathématique (ThETM) (Kuzniak et Richard, 2014), le modèle cKç (Balacheff, 2011) mais aussi le modèle SMAR (Puentedura, 2012) permettant d'analyser les usages de l'IA.

Les « nouvelles technologies » pour l'éducation ont souvent suscité des contraintes et de grands espoirs (Emprin, 2018) et aucun des deux ne s'est complètement réalisé. La spécificité de l'IA est que dans certains cas les méthodes sont des boîtes noires et dont les informations ou connaissances produites sont difficiles à expliquer.

Cette table ronde permet de faire le point sur les relations entre didactique et IA ; on peut y noter que les cadres théoriques anciens tels de la TSD (Brousseau, 1998) ou la TAD (Chevallard, 1999) sont suffisamment robustes pour permettre des modélisations informatiques même si d'autres cadres ont dû être développés pour accéder à certains aspects du processus d'apprentissage avec les outils technologiques basés sur l'IA. Les projets qui y ont été présentés montrent également la richesse de la dynamique de travail entre sciences de l'informatique et didactiques. Les perspectives ouvertes sont nombreuses et montrent l'ampleur des travaux qui peuvent encore être développés.

## RÉFÉRENCES

- ANDERSON, J. R., CORBETT, A. T., KOEDINGER, K. R. & PELLETIER, R. (1995). Cognitive tutor: Lesson learned. *The Journal of the Learning Sciences*, 4 (2): 167–207. doi:10.1207/s15327809jls0402\_2.
- BALACHEFF N., GAUDIN N. (2003). Conceptual Framework. *Les Cahiers Du Laboratoire Leibniz*.
- BALACHEFF, N. (1994). Didactique et intelligence artificielle. *Recherches en didactique des mathématiques*, 14, 9-42.
- BALACHEFF, N. (2011). cKç, un modèle pour relier connaissance et preuve en didactique des mathématiques. dans J. BAILLE. *Du mot au concept : Preuve*, PUG, 9-32. (hal-01567192)
- BARQUERO, B., BOSCH, M., ROMO, A. (2018). Mathematical modelling in teacher education: dealing with institutional constraints. *ZDM Mathematics Education*, 50(1-2), 31-43.
- BROUSSEAU G. (1998). La théorie des situations didactiques. Recueil de textes de Didactique des mathématiques, 1970-1990 présentés par M. COOPER, N. BALACHEFF, R. SUTHERLAND ET V. WARFIELD. (*La pensée sauvage*, Grenoble)
- BROUSSEAU, G. (1990). Le contrat didactique : le milieu. *Recherches en didactique des mathématiques*, 9(9.3), 309-336.
- BUCHANAN, B. G., & SHORTLIFFE, E. H. (1984). *Rule based expert systems: the mycin experiments of the stanford heuristic programming project (the Addison-Wesley series in artificial intelligence)*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc..
- CARBONELL, J. R. (1970). AI in CAI: An artificial-intelligence approach to computer-assisted instruction. *IEEE transactions on man-machine systems*, 11(4), 190-202.
- CHAACHOUA, H., FERRATON, G., & DESMOULINS, C. (2013). Utilisation du modèle praxéologique de référence dans un EIAH. *Actes du 4e congrès pour la Théorie Anthropologique du Didactique*.
- CHEVALLARD, Y. (1999). L'analyse des pratiques enseignantes en théorie anthropologique du didactique. *Recherches en didactique des mathématiques*, 19(2), 221-266.
- CHIEU, V. M., LUENGO, V., VADCARD, L., & TONETTI, J. (2010). Student modeling in complex domains: Exploiting symbiosis between temporal Bayesian networks and fine-grained didactical analysis. *Journal of Artificial Intelligence in Education*.
- CLANCEY, W. J. (1987). *Knowledge-based tutoring: The GUIDON program*. MIT press.
- DE LA HIGUERA, C. (2020). *A report about Education, Training Teachers and Learning Artificial Intelligence: Overview of key issues*. Prepared for the Knowledge Societies Division, Communication and Information Sector of the UNESCO.
- EMPRIN, F. (2018, JUNE). Passé, présent et futur des formations aux usages numériques pour les enseignants de mathématiques. *In actes du 45ème colloque COPIRELEM*. ARPEME.
- ENGELBART, D. C. (1962). *Augmenting human intellect: A conceptual framework*. Menlo Park, CA, 21.
- FONT, L., RICHARD, P. R., & GAGNON, M. (2018). *Improving QED-Tutrix by automating the generation of proofs*. arXiv preprint arXiv:1803.01468.
- GARDNER, H. (1983). *Frames of mind: The theory of multiple intelligences*. New York, NY: Basic Book
- HARRAK, F. ET BOUCHET, F. (2021, JUNE). Aide au suivi de la progression de groupes d'apprenants pour la mise en place d'une pédagogie différenciée. *In 10e Conférence sur les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain* (pp. 312-317).
- HENRICH, J. (2021). *L'Intelligence collective*. Éditions MultiMondes.

- JOLIVET, S., LESNES-CUISINIEZ, E., & GRUGEON-ALLYS, B. (2021). Conception d'une plateforme d'apprentissage en ligne en algèbre et en géométrie : prise en compte et apports de modèles didactiques. *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives. Revue internationale de didactique des mathématiques*, (26), 117-156.
- KUZNAK, A. (2011). L'espace de Travail Mathématique et ses genèses. *In Annales de Didactiques et de Sciences Cognitives*, 16, 9-24.
- KUZNAK, A., & RICHARD, P. R. (2014). Espacios de trabajo matemático. Puntos de vista y perspectivas. *Revista Latinoamericana de Investigación en Matemática Educativa, RELIME*, 17(4-1), 5-39.
- LAMINE GUEYE, M. & EXPOSITO, E. (2022). Education 4.0: Proposal of a model for autonomous management of learning processes, Service-Oriented Computing – *ICSOC 2022 Workshops – AI-PA, ASOCA, FMCIoT, WESOACS, and Satellite Events*, Seville, Spain.
- LUCKIN, R., HOLMES, W., GRIFFITHS, M. & LAURIE, B. (2016). *Forcier Intelligence Unleashed – an Argument for AI in Education*, Pearson Education.
- LUENGO, V. (2009). *Les rétroactions épistémiques dans les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain*. Note de synthèse pour l'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Joseph Fourier – Grenoble I
- LUENGO, V. ET BALACHEFF, N. (1998). Contraintes informatiques et environnements d'apprentissage de la démonstration en géométrie. Computational Constraints and Environments for Learning Proofs in Geometry. *Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Éducation et la Formation*, 5(1), 15-45.
- MATSUDA, N. & VANLEHN, K. (2004). Gramy: A geometry theorem prover capable of construction. *Journal of Automated Reasoning*, 32(1), 3.
- MCCARTHY, J., MINSKY, M. L., ROCHESTER, N., & SHANNON, C. E. (2006). A proposal for the dartmouth summer research project on artificial intelligence, august 31, 1955. *AI magazine*, 27(4), 12-12.
- PUENTEDURA, R. R. (2012). *Building upon SAMR*. Retrieved May, 6, 2014.
- RICHARD, P. R., VÉLEZ, M. P., & VAN VAERENBERGH, S. (2022). *Mathematics education in the age of artificial intelligence. How artificial intelligence can serve the mathematical human learning*, Springer International Publishing.
- RUSSELL, S. J. (2010). *Artificial intelligence a modern approach*. Pearson Education, Inc..
- TOUSSAINT, B. M., LUENGO, V., JAMBON, F., & TONETTI, J. (2015). From heterogeneous multisource traces to perceptual-gestural sequences: The PeTra treatment approach. *In Artificial Intelligence in Education: 17th International Conference, AIED 2015, Madrid, Spain, June 22-26, 2015*. Proceedings 17 (pp. 480-491). Springer International Publishing.
- WEBBER, C., PESTY, S., & BALACHEFF, N. (2002, July). A multi-agent and emergent approach to learner modelling. *In ECAI*, 98-102.
- ZHANG, D., MASLEJ, N., BRYNJOLFSSON, E., ETCEMENDY, J., LYONS, T., MANYIKA, J., NGO, H., NIEBLES J.-C., SELBITTO, M., SAKHAEI, E., SHOHAM, Y., CLARK, J. & PERRAULT, R. (2022). *The AI Index 2022 Annual Report*. AI Index Steering Committee. Stanford Institute for Human-Centered AI.