

ASSISTANCE À L'ENSEIGNEMENT DES MATHÉMATIQUES EN CYCLE 2 BASÉE SUR L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET LA PSYCHOLOGIE COGNITIVE

Richard CABASSUT

Formateur de mathématiques, INSPE - Université de Strasbourg

Laboratoire LISEC EA2310

richard.cabassut@unistra.fr

Résumé

Différents partenaires réunissent leurs compétences dans différents domaines (intelligence artificielle, psychologie cognitive, enseignement des mathématiques, design ...) pour développer un assistant à l'enseignement des mathématiques en cycle 2, sous forme d'exerciceurs mis individuellement à la disposition de chaque élève, pour qui est construit un parcours individuel s'appuyant sur les résultats de la recherche. Dans cette communication nous présentons l'organisation du projet et ses articulations avec les résultats de la recherche en intelligence artificielle et en psychologie cognitive. Nous interrogerons l'efficacité d'un tel projet en précisant enjeux et questions, notamment par rapport à la didactique des mathématiques.

Le Ministère de l'Education Nationale Français lance en 2017 un appel d'offres pour un partenariat d'innovation pour l'acquisition d'un assistant pédagogique basé sur l'intelligence artificielle à destination des enseignants et des élèves du cycle 2. Les candidats doivent décrire les conditions dans lesquelles les partenaires effectuent la recherche, le développement, et la pré-industrialisation liés au projet. Pour la partie mathématique, une équipe répond en 2018 à l'appel d'offre et propose un projet, ADAPTIV' MATH. Le Ministère choisit en juillet 2019 ce projet, dont le déroulement pour la fabrication de l'exerciceur dure 18 mois. Dans cette communication il s'agit donc d'une description avant réalisation sur la base d'un projet. Bien entendu d'autres descriptions, en cours de réalisation ou en bilan de projet, pourront faire l'objet d'autres communications.

I - LE PROJET ADAPTIV' MATH

1 Le projet

Pour répondre à l'appel d'offre, le projet ADAPTIV' MATH propose de concevoir un assistant pédagogique générant une base de plus de 5000 exercices ou activités pour les programmes actuels de mathématiques de cycle 2, à partir de parcours d'exercices ou activités proposés aux élèves. Un exercice est un item proposé aux élèves, et qui constitue avec les autres items enchaînés un parcours proposé par l'algorithme basé sur l'intelligence artificielle. Une activité est une forme d'exercice particulière qui permet de mobiliser une situation d'apprentissage plus large que l'exercice, et qui peut permettre des manipulations au-delà de la simple interface numérique. Cet assistant pédagogique aiderait les enseignants à repérer les difficultés des élèves et à y remédier. Le moteur d'intelligence artificielle, à partir des premières réponses des élèves, présélectionne les activités les plus adaptées, en affinant la sélection avec les réponses suivantes. A partir d'une banque de ressources d'exercices et d'activités seraient construits des parcours personnalisés.

2 L'équipe du projet

L'équipe du projet est composée de plusieurs partenaires aux compétences complémentaires. Elle est coordonnée par la société EvidenceB (2019) qui apporte ses compétences et son réseau de chercheurs et collaborateurs en pédagogie, en intelligence artificielle, en sciences cognitives et en design. Parmi les

partenaires pédagogiques : la maison d'édition NATHAN-SEJER (2019) mettra à disposition son expérience dans l'édition scolaire mathématique à l'école primaire, notamment numérique, et plus particulièrement en matière de banques d'exercices et d'activités ; l'association des professeurs de mathématiques (APMEP 2019), dont l'auteur de cette communication est un représentant, contribuera avec son expertise et ses réseaux dans l'enseignement et l'apprentissage des mathématiques à l'école primaire.

Pour ce qui concerne l'intelligence artificielle : l'équipe de recherche FLOWERS (2019) de l'INRIA participera à partir de ses recherches, sur les systèmes tutoriels intelligents personnalisés par des algorithmes, expérimentées dans des écoles primaires de l'académie de Bordeaux ; l'équipe de recherche MOCAH (2019) du laboratoire LIP6 de Sorbonne Université, spécialisée en Environnements Interactifs d'Apprentissage Humain dans un contexte d'intelligence artificielle, contribuera notamment à l'élaboration de diagnostics cognitifs pour les exercices de mathématiques ; la société ISOGRAD (2019) offrira son expertise comme spécialiste de l'évaluation adaptative des élèves en début et en fin d'activités.

Pour ce qui concerne le design et la robotique, les sociétés DAESIGN (2019), SCHOOLAB (2019), et BLUE FROG ROBOTICS (2019) mettront à disposition leurs compétences en design pédagogique, en création graphique et multimedia, en développement numérique et en robotique pour aider le déploiement technologique des différents dispositifs auprès des enseignants et des élèves. Le cabinet de conseil COPILOT PARTNERS - AMOA (2009) accompagnera le projet fort de ses expériences dans l'enseignement supérieur et l'animation de partenariats éducatifs et numériques. La dotation du Ministère permettra aux différents partenaires d'assumer les frais de fonctionnement liés au projet.

On voit donc que s'établit une collaboration entre différents partenaires aux compétences complémentaires. Et le contenu de cette communication est le fruit de la collaboration à la présentation du projet de chaque partenaire, qui en est en quelque sorte le co-auteur, et dont la contribution est illustrée par la variété de la bibliographie et de la sitographie.

3 L'organisation en modules

Adaptiv'Math est organisé en cinq modules distincts :

1. Sens du nombre et calcul : décomposition additive, système décimal et construction de la droite numérique
2. Calcul mental, calcul posé
3. Résolution de problèmes arithmétiques
4. Résolution de problèmes, grandeurs et mesure
5. Reconnaissance des formes et des figures géométriques.

Ces cinq modules couvrent 3 domaines du programme de mathématiques pour le Cycle 2 : nombres et calcul (modules 1, 2, 3), grandeurs et mesures (module 4) et espace et géométrie (module 5).

4 Mise en place d'un parcours adaptatif pour chaque élève

Pour chaque module, l'organisation d'un parcours commence par un test initial de données constitué par une quinzaine de questions élaborées par des chercheurs en sciences cognitives. Il permet de constituer des groupes (appelés encore classes en statistique ou cluster en anglais) initiaux d'élèves, regroupés en fonction de leurs réponses au test initial grâce à des algorithmes de classification (équipe MOCAH). A partir de recherches en sciences cognitives dont nous détaillerons plus loin quelques résultats, des exercices et des activités sont élaborés pour chaque groupe initial, constituant le début du parcours adaptatif de chaque élève. Dès la réponse de l'élève au premier exercice du parcours un algorithme de personnalisation (mis au point par l'équipe de l'INRIA) permet de personnaliser le parcours de l'élève (choix des variables didactiques des prochains exercices et choix de nouveaux exercices pour la suite du parcours). C'est ici que l'intelligence artificielle intervient puisqu'elle permet en fonction des réponses aux questions antérieures de choisir les questions suivantes et de mettre en place un parcours personnalisé pour chaque élève, en fonction de ses besoins d'apprentissage déterminés par les algorithmes de personnalisation. Régulièrement les groupes d'élèves sont

reconfigurés par les algorithmes de groupement (ou classification, ou clustering) en fonction des réponses aux nouveaux exercices. En fin de parcours une évaluation finale permet de déterminer le niveau de maîtrise des notions abordées dans le module. Nous illustrerons plus loin des exemples possibles d'exercices sans pour autant montrer un parcours d'élève, qui n'a pas encore été produit puisque le projet vient de démarrer. L'analyse des parcours personnalisés est communiquée aux enseignants à chaque étape sous forme d'un tableau de bord, et un retour est effectué auprès de chaque élève ainsi que de ses parents.

Illustrons plus précisément le rôle de l'intelligence artificielle.

II - L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Nous résumons ici les éléments saillants du projet relatifs à l'intelligence artificielle et qui ont été présentés par les équipes FLOWERS de l'INRIA et MOCAH du laboratoire LIP6 de Sorbonne Université.

1 Groupement d'élèves

Il s'agit de concevoir un parcours personnalisé pour chaque élève, ce qui est d'habitude effectué par l'enseignant de la classe. Le projet ADAPTIV' MATH assiste l'enseignant en concevant ces parcours personnalisés. On regroupe les élèves ayant les mêmes caractéristiques par rapport aux réponses apportées aux exercices dans un même groupe d'élèves (ou encore « cluster » en anglais) qui suivront momentanément le même parcours d'exercices. La répartition en clusters se fait d'après des méthodes d'analyse des données (constituées par les caractéristiques des réponses des élèves).

La constitution de classes d'élèves se fait à l'aide d'un ensemble d'algorithmes de classification standards utilisés par l'équipe MOCAH (Martin 2016, Bourrier & al. 2018) relevant de l'analyse des données statistiques en classes. Lors de la première itération les caractéristiques des élèves transmises par la plateforme et relatives au test initial effectué via la plateforme (réponses correctes/incorrectes, nature des erreurs effectuées, temps de réponse, ...) sont prises en compte pour former les clusters initiaux.

Lors des utilisations ultérieures, d'autres caractéristiques sont utilisées, notamment la liste et la nature des exercices traités, l'évolution des compétences déterminées par l'algorithme ZPDES de l'INRIA (Clement & al. 2015), ainsi que des informations contextuelles collectées par le dispositif sur lequel la plateforme est installée.

2 Usage pédagogique des groupes

La nature des clusters est donc propre à la classe dont ils sont élèves et à un instant donné, et non nécessairement statique dans le temps. La constitution de nouveaux groupes d'élèves peut se faire à tout moment, à la demande du professeur, ou automatiquement à intervalles réguliers dépendant principalement de la fréquence d'utilisation de la plateforme par l'ensemble des élèves. L'enseignant reçoit les informations relatives à chaque groupe d'élèves constitué. Un élève parangon, le plus représentatif du groupe d'élèves, est proposé par l'algorithme et les informations le concernant (en termes notamment de compétences acquises/non-acquises) sont communiquées à l'enseignant pour caractériser le groupe d'élèves et aider l'enseignant à mieux comprendre les caractéristiques de ce groupe. L'algorithme permet de caractériser chaque groupe en fournissant des informations qui différencient ce groupe des autres (par exemple en précisant si un type de réponse est significativement plus important dans ce groupe, ou une durée de réponse est significativement plus longue, ou un type de caractéristique d'élèves ...). L'algorithme permet également à l'enseignant de repérer l'évolution de chaque élève et par exemple de remarquer un changement de groupes pour un élève donné qui signalerait par exemple une difficulté ou une amélioration. L'enseignant peut d'ailleurs décider d'affecter un élève à un autre groupe que celui proposé par l'algorithme : il s'agit bien d'un assistant à l'enseignement, l'enseignant gardant la main sur les choix.

3 L'algorithme de personnalisation dynamique des parcours pédagogiques

L'équipe FLOWERS a développé des algorithmes d'apprentissage (notamment l'algorithme ZPDES (Ibidem)) pour lesquels un logiciel éducatif repère au cours des interactions avec un apprenant quelles séquences d'exercices sont optimales. Ces algorithmes utilisent l'analogie entre les machines à sous (bandits-manchots) d'un casino : le problème consistant à identifier parmi plusieurs machines à sous celle qui offre la meilleure espérance de gain initialement inconnue. Pour trouver la machine à sous la plus pertinente, il faut miser sur toutes les machines pour explorer leurs performances avant d'identifier la meilleure et de l'exploiter. Par analogie, lors de l'apprentissage, on doit essayer de nouvelles activités avant de savoir lesquelles sont les meilleures pour l'apprentissage.

Machines à sous	Activités d'apprentissage
Recherche de la machine avec la meilleure espérance de gain	Recherche des activités avec la meilleure progression de l'élève
Joueur	Enseignant
Choix des machines	Choix des activités d'apprentissage
Gain de la machine	Progression de l'élève

4 L'enseignant peut prendre en main l'algorithme

L'enseignant garde la possibilité de sélectionner et d'organiser les exercices de son choix au sein de listes proposées par l'assistant. L'enseignant peut ainsi choisir le domaine et la compétence à aborder. Il peut également modifier la composition d'un groupe. L'enseignant a la possibilité d'adresser un message personnalisé (message texte, sonore, vidéo ou image - connexion nécessaire) à un élève ou à un groupe d'élèves. L'enseignant peut également paramétrer l'algorithme : investigation guidée ou non, moment de la séquence où l'assistant est utilisé, découverte de la notion ou renforcement par des exercices ...

III - LES SCIENCES COGNITIVES

Quatre des cinq modules proposés sont construits à partir des résultats de recherches en sciences cognitives ; les différents modules sont coordonnés par les chercheurs collaborant avec EvidenceB. Nous allons détailler dans ce qui suit quelques résultats des recherches pris comme point d'appui et quelques exemples de types d'exercices qui pourraient être proposés.

1 Module 1 : sens du nombre et calcul

Ce module traite de la décomposition additive, du système décimal et de la construction de la droite numérique et est coordonné par André Knops (2019) du CNRS-Université Paris-Descartes. Une communication d'André Knops au prochain colloque de la COPIRELEM précisera les fondements de ce module basés sur différents résultats de la recherche (Dehaene 2010, Sarnecka, Wright 2013, Lyons, Ansari 2015). Différents exercices seront proposés.

Par exemple pour aider un maçon à construire un mur de longueur 5 briques (5 est ici le nombre cible), différents camions livrent des blocs de briques correspondant à différentes décompositions du nombre cible (dans l'illustration 4+2 ou 3+2). Pour varier les difficultés les variables nombre cible, type de décomposition additive du nombre cible, type de représentation des nombres (figurée avec des briques ou seulement avec une écriture chiffrée) ... sont utilisées.



Extrait du projet ADAPTIV'MATH

2 Module 3 : résolution de problèmes arithmétiques et module 4 : grandeurs et mesures

Ces deux modules sont coordonnés par Emmanuel Sander (2019) de l'Université de Genève. Nous présentons ici un résumé de la contribution, sur la place des sciences cognitives dans le projet, d'Emmanuel Sander, qui précisera sa contribution dans une communication au prochain colloque de la COPIRELEM.

Concernant le module 3 sur la résolution des problèmes arithmétiques, les apports récents de la psychologie cognitive montrent l'importance des concepts arithmétiques dans la résolution de problème arithmétiques à énoncés verbaux (DeWolf, Bassok, & Holyoak, 2015; Hofstadter & Sander, 2013 ; Richland, Stigler & Holyoak, 2012). L'encodage et le recodage sémantiques d'une situation problème, permet le passage de connaissances quotidiennes à un codage plus abstrait (Gamo, Sander & Richard, 2010 ; Gros, Thibaut & Sander, 2015). Une reformulation de « Paul a 7 billes, il en perd 4, combien lui en reste-t-il ? » en « Paul avait 4 billes, il en gagne, maintenant il en a 7, combien en a-t-il gagnées ? » met en valeur la notion d'écart dans chacune de ces deux situations pour faire comprendre la relation entre une addition à trou et une soustraction (Baroody, 1999).

Dans la résolution de problème, les élèves appréhendent un problème via les objets mis en scène, qui activent les connaissances reliées (par exemple, on attribue des objets aux personnes plus souvent que des personnes aux objets (Bassok, Wu, & Olseth, 1995). Dans les manuels scolaires les types de problèmes mathématiques proposés aux enfants sont associés à des types d'objets reliés par des relations sémantiques très spécifiques (Bassok, Chase et Martin 1998). Dans 97% des problèmes à résoudre par addition, les objets additionnés appartenaient à des catégories de même niveau (par exemple des pommes et des poires, ou des billes rouges et noires) alors que 94% des problèmes demandant une division utilisaient des objets reliés fonctionnellement (par exemple des fleurs et des pots). Le fait que la sémantique du monde dise que les fleurs vont dans les pots va rendre plus difficile la traduction mathématique d'un problème dans lequel il faut diviser le nombre de pots par le nombre de fleurs (par exemple si on demande combien de fois il y a plus de pots que de fleurs) qu'un problème dans lequel il faut diviser le nombre de fleurs par le nombre de pots (Martin et Bassok, 2005). Un énoncé de problème référant à des oranges et des pommes se prêtera facilement à la résolution d'un problème à structure additive, c'est-à-dire soluble par des opérations d'addition et de soustraction, alors qu'un problème référant à des oranges et des paniers évoquera spontanément une structure multiplicative (Ibidem). Les conceptions initiales des élèves reposeraient sur des notions de la sémantique quotidienne, telle que l'ajout pour une addition, la recherche d'une quantité restante pour une soustraction, une addition réitérée pour une multiplication, un partage équitable pour une division (Fischbein, 1989 ; Lakoff & Nunez, 2000 ; Hofstadter & Sander, 2013). Une conséquence de ce phénomène est que les élèves vont voir leurs résolutions facilitées lorsqu'il y a coïncidence entre la notion scolaire et la connaissance intuitive, et qu'elles sont rendues plus difficiles dans le cas inverse. Il s'agit d'aboutir à un recodage en termes d'une sémantique mathématique de l'énoncé, qui conduirait, par exemple, l'élève à percevoir une structure partie-tout dans une situation de problème impliquant des pommes et des oranges, mais aussi des pommes et des paniers, autrement dit au-delà de ce que lui dicte sa sémantique du monde (Bassok, Wu & Olseth, 1995 ; Gamo, Sander, Richard, 2010). Des travaux auprès d'élèves scolarisés en éducation prioritaire ont déjà donné des résultats probants (Gamo, Nogry & Sander, 2014). En règle générale, il est important dans la construction de progressions d'apprentissage de distinguer les énoncés avec congruence sémantique de ceux pour lesquels il y a non-congruence. Dans les cas congruents, la sémantique du monde induit une structure compatible avec une sémantique mathématique et permet une résolution correcte, mais cette performance satisfaisante peut masquer une sémantique mathématique insuffisante ou erronée chez l'élève, qui échouera dans les problèmes avec non-congruence.

Le module 4 sur grandeurs et mesure permet, dans la résolution de problèmes arithmétiques à énoncés verbaux, de mettre en relation les notions mathématiques et les situations du monde réel. Parmi les facteurs de difficulté ou de choix, l'utilisation de la distributivité (Scheibling-Sève, Sander & Pasquinelli, 2017) ou l'existence de plusieurs étapes dans les problèmes additifs (Gros et al., 2015). Un enjeu est que

les élèves soient en mesure d'adopter des stratégies fondées sur des opérations de complémentation y compris lorsque les aspects saillants sont ordinaux, et vice versa.

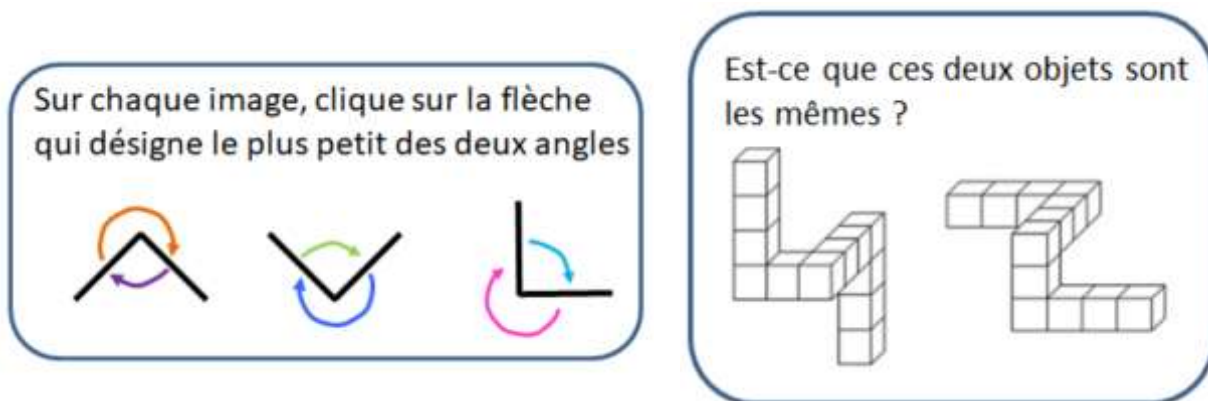
Sander propose des problèmes avec des variations de formulation qui ne sont pas sans rappeler les exemples de réussite attendus en fin d'année proposés par le Ministère (EDUSCOL 2018). Par exemple voici 4 variations à propos du calcul de la différence et proposés par Sander.

- 1) Le matin, Pierre a des billes rouges et des billes bleues. A la récréation, il perd ses 39 billes rouges. Maintenant il lui reste 3 billes bleues. Combien Pierre avait-il de billes avant la récréation ?
- 2) Anna prépare une salade de fruits. Il y a 3 fruits dans le saladier. Puis elle rajoute 39 fruits dans le saladier. Combien y a-t-il de fruits dans le saladier ?
- 3) Des filles et des garçons sont sur la scène du spectacle de fin d'année. Il y a 39 garçons sur la scène du spectacle. Au total, il y a 42 élèves sur la scène du spectacle. Combien y a-t-il de filles sur la scène de spectacle ?
- 4) Hugo a un petit train composé de 3 wagons. Il ajoute à ce train d'autres wagons. Il obtient un train composé de 42 wagons. Combien Hugo a-t-il ajouté de wagons ?

3 Module 5 : espace et géométrie

Ce module traite de la reconnaissance des formes et des figures géométriques, et des déplacements dans l'espace. Il est coordonné par Vagharchakian (2019) de l'Institut Max Planck de Berlin et André Knops (2019) du CNRS-Université Paris-Descartes. Nous présentons ici un résumé de leurs contributions au projet.

La capacité à visualiser et transformer la taille et l'orientation d'un objet est extrêmement prédictive des capacités arithmétiques. Pour se repérer dans l'espace le cerveau procède à une suite d'opérations semblables à un déplacement physique : suite de translations et/ou de rotations, qui font passer de la position initiale à la position finale. Pour apprendre à se repérer dans l'espace, l'enfant doit passer par deux étapes, reconnaître les angles et manipuler les rotations, dans différents contextes pour progressivement généraliser ces notions. Une des grandes difficultés pour les enfants est d'associer comme identique un même angle présenté dans différents contextes (Bryant, 2009). Dans les exercices proposés, les élèves cherchent des angles sur des figures dont les orientations sont variées mais aussi réalisent eux-mêmes des rotations (soit physiquement soit mentalement).



IV - ENJEUX ET QUESTIONS

1 Didactique des mathématiques

Après avoir montré les apports de la recherche en intelligence artificielle et en sciences cognitives, nous allons montrer quelques articulations avec la didactique des mathématiques, en nous limitant dans notre illustration à la résolution des problèmes arithmétiques. La synthèse de Houdement (2018) permet de distinguer trois types de problèmes :

- les problèmes basiques qui à partir de deux données numériques recherchent un troisième nombre qui sera obtenu en mobilisant un modèle additif ou multiplicatif ;
- les problèmes complexes pour lesquels la recherche du modèle ne relève pas d'une reconnaissance de modèles basiques, par exemple parce qu'il faut décomposer le problème complexe en sous-problèmes basiques avec une stratégie de recombinaison pour résoudre le problème initial ;
- les problèmes atypiques qui ne relèvent pas des catégories précédentes, et pour lesquels le ou les modèles sollicités peuvent ne pas se ramener à des problèmes basiques, notamment dans des cas de modélisation en lien le domaine des grandeurs et mesures.

Houdement insiste sur l'importance de comparer tant au niveau des modèles que des stratégies « gagnantes » (Ibidem, p.117) les similarités dans la variété des problèmes pour mieux acquérir ce répertoire de problèmes basiques et de stratégies. Cela fait écho en psychologie cognitive aux préconisations de Sander, évoquées précédemment, sur l'importance de varier les sémantiques évoquées dans les énoncés de problèmes, ce qui n'est pas sans rappeler les travaux d'un autre psychologue cognitif, Duval (2006), qui souligne l'importance de varier les registres de représentations. L'intelligence artificielle, quant à elle, vient en appui à la didactique des mathématiques, pour repérer les difficultés des élèves et proposer des aides ou remédiations avec des parcours personnalisés sur la résolution de problèmes.

2 Efficacité

Dans la résolution de problèmes l'activité de recherche de la solution est centrale. Mais le rapport Villani-Torossian nous rend attentif à l'efficacité d'une telle activité : « La volonté de rendre les élèves chercheurs peut être pertinente, bien évidemment, mais l'on peut s'interroger, en termes d'efficacité, sur le choix des moments, des durées, des thèmes de ces recherches, voire la manière dont elles sont conduites » (Villani - Torossian 2018, p.23). Cette notion d'efficacité est appréhendée différemment suivant les champs de connaissances. L'intelligence artificielle sera sensible à une efficacité mise en évidence par l'algorithme choisi qui déterminera le parcours optimum ou à la classification statistique (clustering) qui proposera la classe optimale. Les sciences cognitives privilégieront les parcours d'exercices le plus en phase avec les résultats de la recherche en sciences cognitives, s'appuyant souvent sur des différences de performances entre groupes expérimentaux et groupes témoins. La didactique des mathématiques observera, souvent au travers d'une évaluation quantitative ou qualitative, le degré d'acquisition des compétences mathématiques visées, en termes d'apprentissage ou d'enseignement, en tenant compte des conditions institutionnelles. Dans chaque cas on pourra mettre en question les choix effectués : choix de l'algorithme de parcours ou de classifications, choix des conditions expérimentales, choix des compétences visées, des critères d'évaluation, et des conditions institutionnelles.

3 Questions et enjeux

Ce projet dessine plusieurs enjeux et questions, qui peuvent s'étendre à d'autres projets.

Concernant la complexité des facteurs à prendre en compte pour l'apprentissage et l'enseignement, la contribution de différents champs de connaissance, est nécessaire, comme ce projet l'illustre. Comment dans l'apprentissage, l'enseignement, la formation des enseignants, la recherche sur l'enseignement, et l'organisation de cet enseignement prendre en compte cette complexité ? Pour gérer cette complexité, comment assurer la maîtrise de connaissances spécifiques et l'ouverture à la contribution d'autres connaissances ?

Concernant le caractère multidisciplinaire de ce projet différents champs de connaissances contribuent : intelligence artificielle, psychologie cognitive, didactique des mathématiques. Pourquoi la didactique des mathématiques y a-t-elle une place assez marginale dans la conception et le développement ? Comment s'articulent les différentes approches de ces champs de connaissances ? Dans la période actuelle y a-t-il des champs de connaissances dominants par rapport à d'autres ? Si oui, quelles sont les conséquences de cette domination ?

Concernant la notion d'efficacité en éducation, elle s'appuie en France essentiellement sur trois ressources : des évaluations internationales ou nationales (PISA, TIMSS, évaluations de la DEPP et de la DGESCO ...), des résultats de la recherche évoquées dans les parties précédentes de notre article, des études sur les pratiques (rapports des inspections, étude du CNESEO, ...). Par exemple en s'appuyant sur les bons résultats d'un pays à PISA, on pourra promouvoir l'efficacité d'enseignement des mathématiques aussi différents que ceux de la Finlande (Jost 2007, p.753) et de Singapour (Villani-Torossian 2018, p.19). Quels choix de points d'appui pour justifier l'efficacité ? Comment concilier, dans les projets multidisciplinaires, des approches différentes de chaque discipline ?

V - CONCLUSION

Nous avons décrit un projet sur la résolution de problèmes mathématiques au cycle 2. Il met à la disposition des enseignants de cycle 2 un exerciceur élaboré à partir d'une banque de données composée de plus de 5000 exercices ou situations proposées à partir des résultats de la recherche en didactique des mathématiques et dans les sciences cognitives. A partir des premières réponses de chaque élève l'intelligence artificielle permet de distinguer quelques groupes d'élèves de proposer à chaque groupe un parcours personnalisé. Ensuite en fonction des réponses des élèves le parcours est personnalisé, pouvant aboutir à un changement de groupe pour un élève. Ce projet illustre la complexité de l'enseignement des mathématiques, en tant qu'il mobilise plusieurs champs de connaissances. La mesure de l'efficacité d'un tel dispositif reste problématique et les choix effectués pour cette mesure devraient être explicités.

La poursuite de ce projet consiste à sa mise en œuvre dans des classes expérimentales où des évaluations pourront comparer les résultats des élèves des classes expérimentales à ceux des classes témoins. On pourra être en mesure de discuter de l'efficacité d'un tel dispositif d'assistant à l'enseignement et d'étudier le point de vue des enseignants des classes expérimentales. Les résultats de cette expérimentation et la réflexion sur son efficacité pourront faire l'objet de communications au prochain colloque de la COPIRELEM. Les collègues en charge de classes intéressées par cette expérimentation peuvent prendre contact avec les auteurs.

VI - BIBLIOGRAPHIE

APMEP (2019) <https://www.apmep.fr/> Site consulté le 2/8/19.

Baroody, A.J. (1999). Children's relational knowledge of addition and subtraction. *Cognition and Instruction*, 17, 3,137-175.

Bassok, M., Chase, V.M. et Martin S.A (1998). Adding apples and oranges: alignment of semantic and formal knowledge. *Cognitive Psychology* 35, 99-134.

Bassok, M., Wu, L.L., & Olseth, K.L. (1995). Judging a book by its cover: Interpretative effects of content on problem-solving transfer. *Memory and Cognition*, 23, 354-367.

Blue Frog Robotics (2019) <http://www.bluefrogrobotics.com/fr/home-fr/> Site consulté le 2/8/19.

Bourrier,Y., Francis, J. et Garbay, C. , LUENGO, V. (2018). A hybrid Architecture for Non-Technical Skills Diagnosis. Intelligent Tutoring Systems (ITS 2018), vol. 10858, Lecture Notes in Computer Science, Montreal, Canada, pp. 300-305

Bryant, P. (2009). Understanding space and its representation in mathematics. Key understandings in mathematics learning. Paper, 5, 1-40. <http://www.nuffieldfoundation.org/sites/default/files/P5.pdf>

Clement, B., Roy, D., Oudeyer, P.-Y. et Lopes, M. (2015). Multi-Armed Bandits for Intelligent Tutoring Systems. *Journal of Educational Data Mining (JEDM)*, 2015.

Copilot Partners – AMOA (2009) <http://copilotpartners.com/> Site consulté le 2/8/19.

Daesign (2019) <https://www.daesign.com/> Site consulté le 2/8/19.

De Wolf, M., Bassok, M. & Holyoak, K. J. (2015). Conceptual structure and the procedural affordances of rational numbers: Relational reasoning with fractions and decimals, *Journal of Experimental Psychology: General*, 144(1), 127-150.

Dehaene, S. (2010) *La Bosse des Maths*. Edition Odile Jacob.

Duval, R. (2006). A cognitive analysis of problems of comprehension in a learning of mathematics. *Educational Studies in Mathematics* (2006) 61: 103–13.

Eduscol (2018) *Attendus de fin d'année et repères annuels de progression du CP à la 3e* <http://eduscol.education.fr/pid38211/consultation-reperes-et-attendus.html> Site consulté le 2/8/19.

Evidencecb (2019) <http://www.evidencecb.com/> Site consulté le 2/8/19.

Fischbein, E. (1989). Tacit models and mathematical reasoning. *For the learning of mathematics*, 9(2), 9-14.

Flowers (2019) <https://flowers.inria.fr> Site consulté le 2/8/19.

Gamo, S., Sander, E., & Richard, J-F. (2010). Transfer of strategy use by semantic recoding in arithmetic problem solving. *Learning and Instruction*, 20, 400-410.

Gamo, S., Nogry, S., & Sander, E. (2014). Apprendre à résoudre des problèmes en favorisant la construction d'une représentation alternative chez des élèves scolarisés en éducation prioritaire. *Psychologie française*, 59(3), 215-229.

Gros, H., Thibaut, J.P., & Sander, E. (2015). Robustness of semantic encoding effects in a transfer task for multiple strategies arithmetic problems. In Noelle, D. C., Dale, R., Warlaumont, A. S., Yoshimi, J., Matlock, T., Jennings,

C. D., & Maglio, P. P. (Eds.), *Proceedings of the 37th Annual Meeting of the Cognitive Science Society* Austin, Tx: Cognitive Science.

Hofstadter, D. R., & Sander, E. (2013). *Surfaces and essences: analogy as the fuel and fire of thinking*. New York: Basic Books.

Houdement, C. (2018) Problèmes arithmétiques basiques : le cœur du problème ? , in Julia Pilet & Céline Vendaïra (ed.) (2018) *Préactes du séminaire de didactique des mathématiques*. ARDM.

Huber, S., Nuerk, H.-C., Willmes, K., & Moeller, K. (2016). A general model framework for multisymbol number comparison. *Psychological Review*, 123(6), 667-695.

Isograd (2019) <https://www.isograd.com> Site consulté le 2/8/19.

Jost, R. (2007) L'enseignement des mathématiques en Finlande. Bulletin de l'APMEP. Num. 472. p. 753-772.

Knops, A. (2019) <https://www.lapsyde.com/copie-de-andre-knops> Site consulté le 2/8/19.

Lakoff, G., & Núñez, R. (2000). *Where mathematics come from: How the embodied mind brings mathematics into being*. Basic books.

Lyons, I.M. & Ansari, D. (2015) Numerical Order Processing in Children: From Reversing the Distance-Effect to Predicting Arithmetic. *Mind, Brain and Education*, 9, 207-21.

Martin, B. (2016) *Diagnostic comportemental et cognitif des erreurs dans la résolution de problèmes arithmétiques*. Thèse. Université Paris 8.

Martin, S. A., & Bassok, M. (2005). Effects of semantic cues on mathematical modeling: Evidence from word-problem solving and equation construction tasks. *Memory & Cognition*, 33(3), 471-478.

Mocah (2019) <https://www.lip6.fr/recherche/team.php?acronyme=MOCAH> Site consulté le 2/8/19.

Nathan-Sejer (2019) <https://editions.nathan.fr/> Site consulté le 2/8/19.

Richland, L. E., Stigler, J. W., & Holyoak, K. J. (2012). Teaching the conceptual structure of mathematics. *Educational Psychologist*, 47(3), 189-203.

Sander, E. (2018) <https://www.unige.ch/fapse/idea/fr/equipe/sander/> Site consulté le 2/8/19.

Sander, E. (2018) Une approche interprétative de la résolution de problèmes, in Julia Pilet & Céline Vendaïra (ed.) (2018) *Préactes du séminaire de didactique des mathématiques*. ARDM.

Sarnecka, B., Wright, C. (2013) The Idea of an Exact Number: Children's Understanding of Cardinality and Equinumerosity. *Cognitive Science A Multidisciplinary Journal*. May 2013.

Scheibling-Sève, C., Sander, E., Pasquinelli, E. (2017). Developing cognitive flexibility in solving arithmetic word problems. In B. C. Love, K. McRae, & V. M. Sloutsky (Eds), *Proceedings of the 39th Annual Conference of the Cognitive Science Society*. London, UK: Cognitive Science Society.

Schoolab (2019) <https://theschoolab.com/> Site consulté le 2/08/19.

Vagharchakian (2019) <http://cvscience.aviesan.fr/cv/668/laurianne-vagharchakian> Site consulté le 2/8/19.

Villani, C., Torossian, C. (2018). *21 mesures pour l'enseignement des mathématiques*. Ministère de l'Education Nationale (rapport remis au ministère le 12 février 2018). Paris, France.