PERSPECTIVES DE L'OCDE SUR L'ÉDUCATION NUMÉRIQUE 2021

Repousser les frontières avec l'IA, la blockchain et les robots

OCDE

Perspectives de l'OCDE sur l'éducation numérique 2021

REPOUSSER LES FRONTIÈRES AVEC L'IA, LA BLOCKCHAIN ET LES ROBOTS

OCDE
DES POLITIQUES MEILLEURES POUR UNE VIE MEILLEURE

Cet ouvrage est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE. Les opinions et les arguments exprimés ici ne reflètent pas nécessairement les vues officielles des pays Membres de l'OCDE.

Ce document, ainsi que les données et cartes qu'il peut comprendre, sont sans préjudice du statut de tout territoire, de la souveraineté s'exerçant sur ce dernier, du tracé des frontières et limites internationales, et du nom de tout territoire, ville ou région.

Merci de citer cet ouvrage comme suit :
OCDE (2022), *Perspectives de l'OCDE sur l'éducation numérique 2021 : Repousser les frontières avec l'IA, la blockchain et les robots*, Éditions OCDE, Paris, https://doi.org/10.1787/d5fe6bd0-fr.

ISBN 978-92-64-96278-1 (imprimé)
ISBN 978-92-64-99864-3 (pdf)
ISBN 978-92-64-40764-0 (HTML)
ISBN 978-92-64-51314-3 (epub)

Crédits photo : Couverture © Gerhard Richter 2022 (02112022).

Les corrigenda des publications sont disponibles sur : www.oecd.org/fr/apropos/editionsocde/corrigendadepublicationsdelocde.htm.

© OCDE 2022

L'utilisation de ce contenu, qu'il soit numérique ou imprimé, est régie par les conditions d'utilisation suivantes : https://www.oecd.org/fr/conditionsdutilisation.

Éditorial

L'apprentissage est devenu numérique au début de 2020 lorsque les pays ont fermé les établissements scolaires pour faire face à la pandémie de COVID-19. Au cours de l'année qui a suivi, les enseignants, les élèves et les responsables scolaires ont dû suivre des cours accélérés pour apprendre à utiliser les technologies numériques. De multiples problèmes ont alors émergé : de la fatigue générée par l'utilisation des écrans d'ordinateur au stress lié à la nouveauté des outils, en passant par le manque d'équipement approprié ou impréparation à apprendre par soi-même. La réalité a forcé les systèmes d'éducation à saisir la balle au bond et à rapidement progresser vers un enseignement intelligent, cheminement qui aurait été autrement bien plus long.

On ne peut, cependant, assimiler l'enseignement à distance à l'enseignement intelligent. L'enseignement à distance a plutôt été un pis-aller qui a permis de maintenir l'apprentissage à flot et de conserver les pratiques éducatives existantes plutôt que de réellement les transformer. En d'autres mots, l'enseignement à distance a rarement été du même niveau que l'enseignement en présentiel. Et une fois encore, ce sont les élèves qui n'étaient pas prêts, d'un point de vue mental ou technologique, qui ont pâti des cours en ligne.

Deux ans avant la pandémie, l'enquête TALIS de l'OCDE a révélé que seule la moitié des enseignants invitait les élèves à utiliser souvent la technologie pour des projets ou des travaux en classe. Mais la nécessité est mère de l'invention et, en l'absence de cours en présentiel, les enseignants ont pris le train du numérique en marche.

C'est au tour des établissements scolaires de sauter aujourd'hui dans ce train en marche. Les possibilités de cours à distance « à tout moment et en tout lieu » ont été fortement appréciées. De plus en plus de professionnels de l'éducation sont prêts à bouger, est-ce le cas également pour les technologies ?

Elles sont bel et bien dans les « starting blocks ». Le rapport Perspectives de l'éducation numérique de l'OCDE nous informe sur trois domaines technologiques qui sont déjà utilisés dans les systèmes éducatifs : l'intelligence artificielle (IA) ou l'apprentissage automatique, les robots et la blockchain.

Ce sont les logiciels et les robots sociaux alimentés par des flux constants de données qui risquent de bouleverser l'enseignement et l'apprentissage. Il ne s'agit pas uniquement de technologie mais d'une révolution pédagogique. Si nous étudions les mathématiques en utilisant un ordinateur, celui-ci peut désormais analyser notre façon d'étudier et rendre notre expérience d'apprentissage beaucoup plus fine, adaptative et interactive. Grâce à des capteurs et à des systèmes de gestion de l'apprentissage, l'intelligence artificielle peut aider les enseignants à mieux comprendre comment chacun de leurs élèves apprend : ce qui les intéresse, ce qui les ennuie, les domaines où ils progressent ou ceux qui les bloquent. La pédagogie intelligente permet d'adapter l'apprentissage aux différents besoins des élèves et donne aux apprenants une plus grande maîtrise de ce qu'ils apprennent, de la manière dont ils apprennent, du lieu et du moment où ils apprennent.

L'IA peut aider les enseignants, en particulier ceux qui débutent, à mieux évaluer ce qu'il se passe dans la salle de classe et s'il faut ralentir ou accélérer le rythme, ou encore à poser une question surprise lorsqu'il y a une baisse d'attention. Les données provenant de l'analyse de l'apprentissage peuvent indiquer à un enseignant qui prépare son cours du lendemain quels élèves ont bien fait le devoir sur les dérivés de l'acide carboxylique et lesquels présentent des lacunes. Un robot peut prendre Gabriel et Ishita à part dans un coin de la classe et avoir une conversation de 10 minutes en espagnol avec eux pendant que le reste de la classe travaille sur les verbes d'action.

L'IA permet aussi d'améliorer les évaluations et les examens. On pense aux évaluations sous forme de simulations, aux évaluations pratiques dans des contextes professionnels ou encore aux algorithmes d'apprentissage automatique qui notent les dissertations. Au cours de la démocratisation de l'apprentissage, le monde de l'éducation a commis une erreur lourde de conséquences en dissociant l'apprentissage des évaluations. Les élèves devaient emmagasiner de nombreuses connaissances puis, parfois des années plus tard, étaient évalués sur de petites parties de cet apprentissage dans un court laps de temps. La technologie peut désormais combiner l'apprentissage et les évaluations, en s'appuyant sur des données et un retour d'information en temps réel pour aider les élèves à mieux apprendre, les enseignants à mieux enseigner et les systèmes éducatifs à devenir plus efficaces.

Cela étant dit, si l'on veut que la pédagogie intelligente prenne son envol, elle doit être conviviale et facile d'utilisation. Les données portant sur le degré de maîtrise d'Hanzou de la leçon sur les équations quadratiques ou le désintérêt d'Emilia envers l'histoire de l'aide sociale d'après-guerre ne présentent aucun intérêt si l'enseignant doit interrompre son cours pour consulter lesdites données. Les données doivent être intuitives. Les ministères de l'éducation peuvent encourager les développeurs à cocréer avec les enseignants et les élèves des outils numériques pertinents, abordables, interopérables et faciles à utiliser. La technologie ne sera vraisemblablement pas utile à l'apprentissage sans la participation du corps enseignant à la conception de ces outils.

Les élèves ayant des besoins spécifiques constituent un groupe d'élèves qui peut bénéficier tout particulièrement des outils éducatifs intelligents. Des logiciels intelligents ou des robots tuteurs peuvent s'adapter aux besoins d'apprentissage d'Hector ou au rythme de Farid. Ils permettent de détecter et de diagnostiquer des problèmes qui passent trop souvent inaperçus, surtout à l'école primaire. Ils permettent aussi de déterminer le contenu des cours afin de mieux répondre aux besoins de chaque élève.

Cette technologie alimentée par les données permet d'équilibrer les chances des uns et des autres dans la salle de classe et présente des applications qui vont au-delà des besoins des élèves présentant des difficultés spécifiques. Il est vraisemblable que les jeunes élèves ayant eu des difficultés scolaires pendant la pandémie vont devoir rattraper leur retard. Identifier les domaines dans lesquels ils ont besoin d'aide et ceux dans lesquels ils ont excellé est une tâche que les technologies éducatives personnalisées peuvent accompagner.

Parmi les trois domaines technologiques couverts dans ce rapport, la blockchain est le plus avancé, même si, jusqu'à présent, les applications ne concernent pas l'enseignement ou l'apprentissage. La blockchain semble prometteuse en tant que système d'accréditation fiable et convivial. À terme, ce système pourrait remplacer les vieux diplômes coûteux, et aider à défaire les monopoles institutionnels qui souvent les accompagnent. Les certificats authentifiés d'achèvement de programmes d'éducation et de formation en dehors des établissements universitaires traditionnels - comme la formation sur poste et les cours en ligne ouverts et massifs (MOOC) - sont un élément important qui nous fait progresser vers l'apprentissage tout au long de la vie. Si chacun d'entre nous, indépendamment de son poste actuel, peut se perfectionner et se recycler tout en ayant à portée de main des qualifications vérifiées par la blockchain, le changement d'emploi sera plus rapide et plus fluide, et beaucoup moins anxiogène.

Mais pour en revenir à l'enseignement et à l'apprentissage, une plus grande utilisation de la technologie ne se traduit pas automatiquement par de meilleurs résultats d'apprentissage. Et de fait, les résultats de la dernière évaluation PISA de l'OCDE ont révélé une relation négative entre l'intensité de l'utilisation des technologies en classe et les compétences en lecture numérique, en mathématiques et en sciences chez les élèves de 15 ans. Les élèves qui passaient plus de temps à publier leurs travaux sur le site web de leur établissement, à jouer à des simulations dans le cadre scolaire, à utiliser des applications et des sites web d'apprentissage ou à faire leurs devoirs sur un ordinateur de l'établissement avaient tendance à obtenir de moins bons résultats à l'évaluation.

Bien entendu, de nombreuses raisons peuvent expliquer le lien entre une utilisation accrue des technologies dans le cadre scolaire et de moins bonnes performances cognitives. Peut-être que les élèves les moins performants passent simplement plus de temps à faire leurs devoirs. Ou bien ils passent plus de temps sur l'ordinateur parce qu'ont les oriente vers des travaux numériques plus pratiques. Il se peut également que les outils numériques actuels contribuent à développer des connaissances et des compétences que les évaluations

actuelles n'appréhendent pas facilement. Restons réalistes, nous ne devons pas écarter la possibilité que des outils d'apprentissage numériques de mauvaise qualité remplacent des activités pédagogiques profitables sans dispositifs numériques, ou se substituent à des activités que les enseignants savent simplement mieux réaliser dans le monde traditionnel. Les exigences qu'un apprentissage numérique efficace impose au fonctionnement autonome des élèves - leur capacité d'apprentissage indépendant ainsi que leur (auto)contrôle - sont souvent sous-estimées. Ne l'oublions pas. Les réflexions qui précèdent s'inspirent d'un élément factuel : la relation entre l'utilisation de la technologie et les résultats d'apprentissage varie très largement d'un pays à l'autre.

Il est évident que les robots, les didacticiels, et les analyses prédictives fonctionneront de manière efficace pour autant que le rôle des enseignants soit repensé. La technologie et l'IA ne tiennent pas de la magie, ce ne sont que des amplificateurs et des accélérateurs extraordinaires qui ajoutent de la vitesse et de la précision. L'IA pourra avoir un rôle positif dans le monde de l'éducation. Son impact pourra aussi être négatif. L'IA peut contribuer à éliminer les préjugés et la discrimination dans les pratiques éducatives. De la même manière, elle peut répandre et amplifier les préjugés dans les pratiques éducatives. Par exemple, elle peut donner aux enseignants les moyens d'identifier les enfants à risque ou les empêcher d'exercer un jugement humain. L'IA peut clairement introduire un changement de paradigme. Les enseignants n'essaieront plus de faire comprendre aux élèves qui ils sont et qui ils veulent devenir. L'enseignement cherchera à établir, grâce à la technologie, des liens, des corrélations entre les élèves avec un profil identique. La technologie est, certes, éthiquement neutre, mais elle sera toujours entre les mains de professionnels de l'éducation qui ne le sont pas. Les véritables risques ne sont pas inhérents à l'IA. Ils sont liés aux conséquences de son utilisation. Lorsque les systèmes d'alerte précoce signalent qu'un élève est en difficulté, un être humain doit évaluer les causes et l'aider à se remettre sur la bonne voie.

L'être humain a toujours été plus doué pour inventer de nouveaux outils que pour les utiliser à bon escient. En investissant dans la formation des enseignants, la technologie peut les libérer des tâches administratives et pédagogiques routinières, et leur donner la possibilité et le soutien nécessaires pour devenir de véritables coachs, tuteurs, modèles et leaders inspirants. L'éducation fonctionnera toujours mieux lorsque les humains sont impliqués dans les processus de changement et ne sont pas laissés à eux-mêmes.

La pandémie a entraîné nos systèmes éducatifs vers de nouveaux horizons et les a fait passer à la vitesse de la lumière du XIXe au XXIe siècle. D'établissements scolaires standardisés, presque de type industriel, nous sommes passés à un apprentissage plus personnalisé et flexible. En fait, la pandémie a fait apparaître au grand jour l'énorme potentiel d'innovation qui sommeillait dans les systèmes éducatifs, si souvent dominés par des structures hiérarchiques qui valorisaient le conformisme.

Mais pour sortir de la crise, il faudra créer des conditions plus équitables pour faciliter l'innovation dans les établissements. Les pouvoirs publics peuvent contribuer à renforcer l'autonomie professionnelle des enseignants et des chefs d'établissement. Ils peuvent aider à mettre en place une culture collaborative où les grandes idées sont peaufinées et partagées. Ils peuvent également participer au financement de mesures incitatives qui permettent de mieux communiquer sur ce qui fonctionne et d'en accroître la visibilité. Mais s'ils sont seuls, les pouvoirs publics ne peuvent pas faire grand-chose. La Silicon Valley est performante parce que les pouvoirs publics ont mis en place des conditions favorisant l'innovation, et non parce que ce sont eux qui innovent. De la même manière, les pouvoirs publics ne peuvent pas innover dans les salles de classe ; ils ne peuvent qu'apporter leur soutien en ouvrant les systèmes de manière à créer un climat favorable à l'innovation, fondé sur des données probantes, où les idées transformatrices peuvent s'épanouir. Cela signifie qu'il faut encourager l'innovation au sein du système et l'ouvrir aux idées créatives qui viennent de l'extérieur.

Mais comment savoir si les systèmes éducatifs sont ouverts à l'innovation ? S'ils communiquent par rapport aux changements nécessaires et suscitent un soutien en leur faveur. S'ils investissent dans le développement des capacités et des compétences en matière de gestion du changement. S'ils indiquent que les enseignants ne mettent pas passivement en œuvre les innovations technologiques et sociales, mais qu'ils s'impliquent également dans leur conception. S'ils offrent la possibilité aux innovateurs de prendre plus facilement des risques et d'apporter de nouvelles idées. Et enfin, s'ils aident les innovateurs à trouver des moyens plus efficaces pour transposer et diffuser leurs technologies.

Nous avons appris beaucoup de choses pendant la pandémie. Le tout est de ne pas les oublier lorsque la situation reviendra à la « normale ». L'intelligence artificielle, les robots et la blockchain sont appelés à transformer la façon dont nous enseignons, apprenons et gérons les établissements. La technologie est prête mais le sommes-nous ? Les fermetures d'établissements nous ont forcés à nous familiariser avec les outils numériques et pour certains élèves et enseignants, cela s'est plutôt bien passé. Grâce à l'évolution rapide des outils éducatifs intelligents évoqués dans ce rapport, beaucoup d'entre nous sont peut-être prêts à faire le grand saut.

Andreas Schleicher

Directeur de la Direction de l'éducation et des compétences
Conseiller spécial du Secrétaire général de l'OCDE, chargé des politiques d'éducation

Remerciements

Stéphan Vincent-Lancrin (analyste principal et chef de division adjoint, OCDE) a dirigé la publication de l'ouvrage.

Ryan S. Baker (professeur associé, Université de Pennsylvanie) a été conseiller scientifique, veillant à ce que cet ouvrage intègre les dernières connaissances scientifiques dans le domaine.

Certains des auteurs ont fourni des graphiques, des photos et des vidéos afin de rendre ces développements technologiques plus visibles et concrets pour le lecteur.

Ce livre est l'un des résultats du projet « Smart data and Digital Technology in Education: AI, Learning Analytics and Beyond » du Centre pour la recherche et l'innovation dans l'enseignement (CERI) de la Direction de l'éducation et des compétences de l'OCDE. Stéphan Vincent-Lancrin a conceptualisé ce projet et le dirige.

Au sein de l'OCDE, Andreas Schleicher, Directeur de la Direction de l'éducation et des compétences et conseiller du Secrétaire général de l'OCDE pour les politiques de l'éducation, a fourni des commentaires, des contributions et un apport intellectuel inestimables à la rédaction de ce rapport. Nos remerciements vont également à Dirk Van Damme (Conseiller principal et Directeur par intérim du CERI, OCDE) pour son soutien. Carlos González-Sancho (Analyste, OCDE) a joué un rôle clé dans la mise en place des bases du projet avant d'assumer d'autres responsabilités au sein de l'OCDE. Vivien Liu (stagiaire), Mathias Bouckaert, Cassie Hague, Koen Van Lieshout, Quentin Vidal et Reyer van der Vlies (analystes, OCDE) ont identifié de nombreux exemples de situations nationales dans le rapport et ont rédigé certains des encadrés du rapport. Gwénaël Jacotin (statisticien), Tirso Martin et Yunze Xie (anciens stagiaires, OCDE) ont également contribué de différentes manières, notamment par des analyses du secteur des technologies de l'éducation. Madeleine Gereke a été une excellente assistante au projet tout au long du processus, et nous la remercions particulièrement pour la finalisation du projet et le lancement de l'ouvrage. Cassandra Davis, Sophie Limoges, Della Shin, Henri Pearson, Jason Fallow et Alexis Cheney ont supervisé le processus de publication et/ou de communication. Clara Young a révisé le livre, et parfois même plus (avec l'aide de Jennifer Allain pour le chapitre 5). Nous remercions également d'autres collègues pour leurs commentaires et suggestions : Glenda Quintini (Direction de l'emploi, du travail et des affaires sociales de l'OCDE) et Marieke Vandeweyer (Centre de compétences de l'OCDE).

Nous remercions le Comité directeur du CERI pour ses commentaires très utiles sur le projet initial de l'ouvrage et pour ses remarques sur le manuscrit final. Nous remercions tout particulièrement Osama Rahman (Royaume-Uni), qui a fait des suggestions très utiles pour clarifier (et simplifier) le cadre de l'analyse, et Aune Vaulk (Estonie) pour ses commentaires approfondis sur le projet initial.

Des collègues extérieurs à l'organisation ont également été invités à donner leur avis sur le rapport. Pour Microsoft, Alexa Joyce et Maria Langworthy ont fourni des commentaires détaillés et très utiles sur le manuscrit.

Enfin, un tout grand merci à Gerhard Richter (et à son atelier), qui a généreusement autorisé l'utilisation de son célèbre tableau de 1971 sur la couverture de cet ouvrage. Ce tableau évoque non seulement le monde binaire et pixellisé de la numérisation, mais il montre aussi comment l'extrême rigueur peut coexister avec la couleur, la fantaisie, l'énergie et la beauté.

Table des matières

ÉDITORIAL . . . 3
REMERCIEMENTS . . . 7
SYNTHÈSE . . . 15

CHAPITRE 1. FRONTIÈRES DES TECHNOLOGIES ÉDUCATIVES INTELLIGENTES : OPPORTUNITÉS ET DÉFIS
par Stéphan Vincent-Lancrin

Les données intelligentes et les technologies numériques dans l'éducation . . . 19
Les frontières actuelles de la transformation numérique dans le monde de l'éducation . . . 20
Principales opportunités . . . 24
Recommandations politiques . . . 30
Conclusions . . . 42

CHAPITRE 2. L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DANS L'ÉDUCATION : RASSEMBLONS LES PIÈCES DU PUZZLE
par Ryan S. Baker

Introduction . . . 47
Les technologies éducatives intelligentes : définitions et contexte . . . 48
Utilisation de l'intelligence artificielle dans les salles de classe et les systèmes éducatifs . . . 51
Perspectives d'avenir . . . 56

PARTIE 1

CHAPITRE 3. PERSONNALISATION DE L'APPRENTISSAGE : VERS UNE FORME HYBRIDE DES TECHNOLOGIES D'APPRENTISSAGE COMBINANT L'HUMAIN ET L'IA
par Inge Molenaar

Introduction . . . 63
Les systèmes hybrides humains-IA : le rôle des enseignants et de la technologie . . . 64
Réflexion prospective : le rôle ultime de l'IA . . . 68
La personnalisation en fonction des connaissances des élèves . . . 72
Personnalisation de l'apprentissage grâce à l'apprentissage autorégulé . . . 78
Les défis qui attendent la personnalisation de l'apprentissage à l'avenir . . . 80

CHAPITRE 4. TECHNOLOGIES D'APPRENTISSAGE NUMÉRIQUES : COMMENT AMÉLIORER L'IMPLICATION DES ÉLÈVES ?
par Sidney K. D'Mello

Introduction 87
La valeur de l'implication 88
Définition de l'implication 89
Mesure de l'implication 91
Renforcer l'implication 97
Conclusions et orientations futures 105

CHAPITRE 5. ANALYSE DES DONNÉES DE LA CLASSE : DU GROS PLAN SUR L'ÉLÈVE À UNE VUE GÉNÉRALE DE LA CLASSE
par Pierre Dillenbourg

Introduction 115
La vision : Les salles de classe comme un système numérique 116
Comment en sommes-nous arrivés là ? 117
La classe : source de données d'entrée 119
La classe : sortie des résultats d'analyse 121
Fonctions des systèmes 123
Perspectives 131

CHAPITRE 6. MIEUX AIDER LES ÉLÈVES AYANT DES BESOINS SPÉCIFIQUES : L'APPORT DES TECHNOLOGIES
par Judith Good

Introduction 135
Sciences de l'éducation, technologies et besoins spécifiques 136
Exemples d'approches des technologies intelligentes axées sur l'apprenant 138
Regards sur le futur 149

CHAPITRE 7. LES RÔLES DES ROBOTS SOCIAUX DANS LE DOMAINE DE L'ÉDUCATION
par Tony Belpaeme et Fumihide Tanaka

Introduction 159
Pourquoi des robots comme professionnels de l'éducation ? 160
Les différents rôles des robots dans l'enseignement 161
Les robots en tant que dispositifs de téléprésence dans l'enseignement et l'apprentissage 163
Efficacité des robots : âge et domaines d'apprentissage 166
Les aspects techniques des robots en éducation 168
Attitudes des enseignants 169
Les offres du marché 170
Perspectives d'avenir 172

PARTIE 2

CHAPITRE 8. ANALYSE DES DONNÉES DE L'APPRENTISSAGE POUR LES ÉTABLISSEMENTS ET LA GESTION DES SYSTÈMES ÉDUCATIFS
par Dirk Ifenthaler

Introduction 179
Les avantages organisationnels liés à l'analyse de l'apprentissage 180
Trois exemples 182
Les défis de l'analyse de l'apprentissage pour les organisations 184
Faire évoluer l'analyse de l'apprentissage 186
Conclusion 187

CHAPITRE 9. SYSTÈMES D'ALERTE PRÉCOCE ET INDICATEURS DE DÉCROCHAGE SCOLAIRE DANS LE DEUXIÈME CYCLE DE L'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE : LE RÔLE ÉMERGENT DES TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES
par Alex J. Bowers

Introduction 193
Systèmes et indicateurs d'alerte précoce 194
Précision des variables prédictives du décrochage scolaire 196
Application des technologies numériques émergentes : analyse des modèles et science des données 199
Conclusions et orientations futures 205

CHAPITRE 10. DES ÉVALUATIONS ÉDUCATIVES PAR LE JEU
par Jack Buckley, Laura Colosimo, Rebecca Kantar, Marty McCall et Erica Snow

Introduction 217
Pourquoi proposer des évaluations éducatives par le jeu ou par simulation ? 218
Comment élaborer des évaluations par le jeu ? 221
Quelques exemples d'évaluations éducatives par le jeu 224
Quelles sont les perspectives à long terme de cette approche et que doit-on mettre en œuvre pour parvenir à destination ? 226

CHAPITRE 11. LA BLOCKCHAIN ET LE MONDE DE L'ÉDUCATION : UN NOUVEL ÉCOSYSTÈME DE DÉLIVRANCE DE TITRES ET DIPLÔMES
par Natalie Smolenski

Introduction 231
Comprendre la technologie blockchain 232
Avantages de la blockchain pour la vérification des titres et diplômes 243
Déploiement dans la vie réelle 249
Promouvoir le changement 255
Conclusion 258
Annexe 11. A. Glossaire technique 260

LES AUTEURS 271

ENCADRÉ

Encadré 1.1 Description des technologies numériques 21
Encadré 1.2 Intégrer l'IA et l'analyse des données de l'apprentissage dans le cadre scolaire : exemples qui nous viennent de Chine 25
Encadré 1.3 La personnalisation des devoirs de mathématiques peut contribuer à réduire l'écart de résultats : une étude réalisée aux États-Unis 29
Encadré 1.4 Deux exemples concrets de controverses concernant les notes de fin d'année durant la pandémie de COVID-19 37
Encadré 1.5 Deux exemples de controverses liées à l'acceptation sociale des technologies intelligentes dans les établissements scolaires 38

Encadré 2.1 Systèmes d'évaluation formative 52
Encadré 2.2 Rapports à destination des parents 55

Encadré 3.1 Le système Snappet : un exemple de technologie d'apprentissage adaptif mise en œuvre à grande échelle aux Pays-Bas 74
Encadré 3.2 Le tuteur cognitif MATHia : un modèle de technologie d'apprentissage adaptif largement répandu en mathématiques (États-Unis) 75
Encadré 3.3 Mindspark : Un exemple de technologie d'apprentissage adaptif en Inde 76

Encadré 4.1 Encourager le bon comportement et l'apprentissage social grâce à des jeux vidéo au Canada et aux États-Unis 99
Encadré 4.2 L'utilisation d'environnements numériques dans la recherche sur les émotions liées à l'apprentissage aux Philippines 102

Encadré 5.1 Logiciel de groupe à affichage unique : un outil peu coûteux qui permet à l'enseignant de suivre l'activité de l'élève (Chili) 120

Encadré 6.1 Besoins spécifiques et handicap : définitions 137
Encadré 6.2 Trouble de l'attention avec hyperactivité (TDAH) : les technologies en renfort 139
Encadré 6.3 Les technologies intelligentes au secours de la dyslexie et de la dyscalculie 145
Encadré 6.4 Les technologies au secours des élèves aveugles et malvoyants 146

Encadré 7.1 Apprentissage d'une langue à l'aide d'un robot tuteur aux Pays-Bas 162
Encadré 7.2 Le robot partenaire dans un cours de langue en Iran 163
Encadré 7.3 Attending class via a telepresence robot in Norway and France 164
Encadré 7.4 Des robots pour développer des compétences en écriture au Kazakhstan 168

Encadré 9.1 Système d'alerte précoce en Inde 195
Encadré 9.2 Promouvoir l'obtention d'un diplôme dans l'enseignement et la formation professionnels (EFP) à Helsinki (Finlande) 195
Encadré 9.3 Modèle de croissance à mélange de distribution (GMM) 197

Encadré 10.1 Simulations pour la formation et l'évaluation des compétences professionnelles en Allemagne 220
Encadré 10.2 L'importance du choix de la technologie pour l'égalité entre les sexes : aperçu d'une expérience au Chili 223

Encadré 11.1 Public/privé, ouvert/fermé - Où est la différence ? 235
Encadré 11.2 Preuve de participation 238

GRAPHIQUE

Graphique 1.1 La numérisation en action à l'école primaire centrale Luwan N°1 à Shanghai 26
Graphique 1.2 Le système de la « classe numérique » au lycée expérimental rattaché à l'université de Tongji 26

Graphique 3.1 Six niveaux d'automatisation pour un véhicule autonome 65
Graphique 3.2 Six niveaux d'automatisation de l'apprentissage personnalisé 66
Graphique 3.3 Vers une éducation performante avec l'IA : trois défis à relever 68
Graphique 3.4 Des sources de données multimodales pour le traçage des apprenants et de leur environnement. . 69
Graphique 3.5 Trois types d'interventions dans les actions indépendantes de la matière 71
Graphique 3.6 Les problèmes et les tableaux de bord du système Snappet 74
Graphique 3.7 Les exercices et tableaux de bord dans MATHia 75
Graphique 3.8 Activités correctives personnalisées pour apprendre les décimales en fonction des schémas d'erreurs 76
Graphique 3.9 L'algorithme d'apprentissage Moment-by-Moment. 79

Graphique 4.1 Les dimensions de l'implication 90
Graphique 4.2 Élément temporel de l'implication et influence du contexte 91
Graphique 4.3 Les grandes catégories de mesure de l'implication illustrées par des exemples (dernière rangée) . 93
Graphique 4.4 Vue d'ensemble de l'approche AAA 94
Graphique 4.5 Utilisation d'un traceur oculaire grand public (à gauche) pour suivre l'attention visuelle pendant que les élèves interagissent avec Guru (à droite) dans la classe. 96
Graphique 4.6 Exemple de vidéo (à gauche) sur la plateforme Algebra Nation avec un questionnaire d'auto-évaluation de l'implication (à droite) 97
Graphique 4.7 Organisation des activités en fonction des objectifs d'implication et d'apprentissage (de la gauche en montant) selon le cadre ICAP 100
Graphique 4.8 Exemple de problème et de solution de pendule dans Physics Playground 101
Graphique 4.9 L'interface GazeTutor avec agent animé (0), tableau d'images (1) et fenêtre de saisie (2). Les zones d'écran vides en bas ne sont pas affichées 103
Graphique 4.10 L'oculométrie pendant la lecture. Les cercles pleins montrent les fixations du regard (quand les yeux sont focalisés) et les lignes montrent les saccades (les mouvements oculaires rapides entre les fixations) 104
Graphique 4.11 L'interface SEAT : vue d'ensemble de la classe (à gauche) et vue sur un élève particulier (à droite) 105

Graphique 5.1 Le flou entre physique et numérique 118
Graphique 5.2 Une souris par élève pour les maths 120
Graphique 5.3 Estimation du niveau moyen d'attention dans une classe grâce à l'analyse des mouvements de la tête 121
Graphique 5.4 Les tableaux de bord répartis en classe 123
Graphique 5.5 Le tableau de bord d'un cours sur la logistique 124
Graphique 5.6 L'utilisation du tableau de bord pour augmenter les gains d'apprentissage 125
Graphique 5.7 Utilisation de tableaux de bord pour former des équipes dynamiques 127
Graphique 5.8 Diagramme de l'évolution du gain de prolongation de temps 128
Graphique 5.9 Diagramme de l'évolution du gain de prolongation de temps 129
Graphique 5.10 Montrer aux enseignants leurs déplacements dans la classe 130

Graphique 6.1 L'environnement ECHOES 140
Graphique 6.2 Faire pleuvoir avec ECHOES 141
Graphique 6.3 Un enfant interagissant avec ECHOES partage sa joie avec l'un des chercheurs 142
Graphique 6.4 Une capture d'écran de l'application Dynamico 144
Graphique 6.5 Utilisation d'une combinaison de rétroactions auditives et vibratoires pour transmettre une information graphique 148

Graphique 7.1 Enseignement de l'anglais comme deuxième langue à l'aide d'un robot social 162
Graphique 7.2 Une classe avec un robot assistant 163
Graphique 7.3 Des classes en Australie et au Japon connectées via un robot de téléprésence en temps réel 165
Graphique 7.4 Un robot de téléprésence a facilité l'apprentissage d'une deuxième langue 165
Graphique 7.5 Des retraités peuvent faire cours depuis leur domicile grâce à un robot de téléprésence 166
Graphique 7.6 Configuration expérimentale 168
Graphique 7.7 Le TELESAR VI. (2019) 171

Graphique 8.1 Flux de travail et information du TDSS 183
Graphique 8.2 Le processus LAPS 184
Graphique 8.3 Stratégie de gestion du changement pour la mise en œuvre d'analyses d'apprentissage exploitables 186

Graphique 9.1 La classification hiérarchique des notes dans toutes les matières, de la maternelle à la terminale, permet de déterminer le décrochage scolaire 203
Graphique 9.2 Seule une petite partie des systèmes d'alerte précoce d'un établissement scolaire est liée à l'identification de variables prédictives 206

Graphique 10.1 SimCityEDU : Pollution Challenge (GlassLab) 224
Graphique 10.2 Crisis in Space (ACTNext) 225
Graphique 10.3 PEEP - Project Education Ecosystem Placement (Imbellus) 226

TABLEAU

Tableau 8.1 Exemple d'avantages de l'analyse de l'apprentissage au niveau de la gouvernance et de l'organisation 181

Synthèse

La transformation numérique ouvre de nouveaux horizons à l'éducation. Si l'éducation n'a jamais manqué de données, qu'il s'agisse des notes ou des renseignements administratifs autour de l'absentéisme scolaire, ce n'est que depuis peu que celles-ci sont mises au service d'un meilleur apprentissage, d'un meilleur enseignement et des prises de décisions administratives. La relation des acteurs de l'éducation avec la technologie, loin d'être un long fleuve tranquille, oscille entre enthousiasme et scepticisme. Les technologies numériques, et tout particulièrement les technologies intelligentes axées sur l'intelligence artificielle (IA), l'analyse de l'apprentissage ou la robotique, sont-elles susceptibles de changer la face de l'éducation de la même façon qu'elles révolutionnent le reste de la société ? Si oui, comment ? Cet ouvrage tente d'apporter des éléments de réponse.

Après une vue d'ensemble des possibilités et des défis que représente la technologie numérique (Chapitre 1) et des solutions de technologie intelligente de pointe, en évoquant celles qui ne seront pas abordées plus en détails dans la suite de l'ouvrage (Chapitre 2), l'ouvrage s'attache à déterminer de quelle façon les technologies intelligentes peuvent changer l'éducation en classe et épauler les organisations et systèmes pédagogiques en matière de gestion.

Les technologies intelligentes en classe

Les technologies pédagogiques adaptatives comme les systèmes de tutorat intelligent offrent la possibilité de personnaliser l'apprentissage à l'aide d'approches similaires : elles détectent les connaissances (ou les lacunes) des élèves, diagnostiquent les mesures à prendre pour les faire progresser, proposent de nouveaux exercices, de nouveaux modules d'enseignement ou des éléments d'instruction, ou se contentent d'assurer la liaison avec l'enseignant. Cette approche va désormais au-delà de la simple acquisition de connaissances et tient compte de dimensions inhérentes au comportement, par exemple l'autorégulation ou le style d'apprentissage (Chapitre 3).

Garder les élèves motivés et les amener à participer sont deux piliers d'un apprentissage efficace. Dans cette perspective, de nouvelles innovations technologiques se concentrent sur l'évaluation de la participation et des interventions des élèves, dans des environnements d'apprentissage en personne et virtuels. Évaluer la participation n'a rien d'évident mais une multitude de nouvelles approches automatiques est en train de voir le jour, de capteurs de mouvements des yeux jusqu'au suivi et à l'analyse d'autres caractéristiques du visage. Deux voies sont possibles pour améliorer la participation : d'une part, des approches proactives qui s'efforcent de stimuler les élèves au moyen de mesures d'incitation ou de ludification, etc. et d'autre part, les approches réactives qui procèdent avec plus de subtilité en assurant un suivi constant de la participation, en détectant les baisses de régime des élèves et en adaptant l'enseignement en conséquence (Chapitre 4).

Si les technologies intelligentes qui mettent l'accent sur la personnalisation de l'apprentissage individuel sont sans nul doute les plus répandues, une autre option consiste à axer l'analyse de l'apprentissage sur la salle de classe, ou plutôt sur ce qui s'y déroule. Cette démarche a pour objectif d'aider les enseignants à orchestrer l'apprentissage dans leur classe et à proposer des scénarios d'apprentissage efficace d'une grande richesse à leurs élèves. Certaines techniques d'analyse en classe donnent aux enseignants des données en temps réel pour les aider à mieux passer d'une tâche à l'autre lorsque leurs élèves travaillent seuls, en petits groupes ou tous ensemble, par exemple. Elles donnent aussi des informations aux enseignants sur leur comportement en classe afin qu'ils puissent en prendre note et adapter leurs méthodes (Chapitre 5).

À leur tour, de plus en plus de robots sociaux voient le jour à des fins pédagogiques. Reposant généralement sur les systèmes de personnalisation cités ci-dessus, ils aident les enseignants de différentes manières : en faisant office d'instructeurs ou de professeurs particuliers pour les cours individuels ou en petits groupes, ou à l'inverse en se plaçant à leur tour à la hauteur des élèves afin de déclencher un apprentissage par l'enseignement des pairs. En outre, les robots de téléprésence offrent aux enseignants ou aux élèves la possibilité d'enseigner ou d'étudier à distance, avec à la clé de nouvelles perspectives pour les élèves malades qui ne peuvent assister aux cours en personne. Ils donnent aussi la possibilité de faire appel à des enseignants à distance, par exemple à des enseignants qui vivent à l'étranger pour l'enseignement des langues (Chapitre 7).

La technologie permet de surcroît de scolariser les élèves ayant des besoins spécifiques et de faire de l'éduction inclusive une réalité. Forte d'applications ayant fait leurs preuves comme la conversion de texte par synthèse vocale, la reconnaissance vocale et le sous-titrage automatique, l'IA permet aux élèves aveugles, déficients visuels, sourds et malentendants d'intégrer les environnements scolaires classiques et de profiter de leurs pratiques pédagogiques. Des technologies intelligentes favorisent le diagnostic de certains besoins spécifiques et permettent ainsi d'y remédier (à l'image de la dysgraphie). Elles favorisent également l'apprentissage socio-émotionnel des élèves autistes et leur donnent plus de clés pour participer à l'enseignement classique (Chapitre 6).

Ces technologies intelligentes ne peuvent généralement se passer d'un intervenant humain, à savoir l'enseignant. Le niveau d'automatisation des actions et des décisions doit être envisagé sur un spectre qui va d'actions purement automatiques d'une part à des actions entièrement du ressort des humains de l'autre. À l'heure actuelle, les systèmes d'IA restent des hybrides qui exigent une intervention humaine à un stade ou à un autre.

Les technologies intelligentes au niveau des organismes et des systèmes

Les technologies intelligentes qui reposent sur l'IA et l'analyse de l'apprentissage facilitent également la gestion des structures éducatives. Leur utilité est multiple ; elles servent par exemple à améliorer le programme de cours d'un établissement à la faveur de l'analyse du parcours d'apprentissage et du cursus des élèves. Bien que cette démarche en soit à ses balbutiements, l'adoption de l'analyse de l'apprentissage à l'échelle de la structure éducative pourrait bien révolutionner la culture des établissements d'enseignement (Chapitre 8).

Les systèmes d'alerte précoce qui identifient les élèves susceptibles de décrocher du deuxième cycle du secondaire mettent à profit les micro-données administratives toujours plus souvent recueillies par les systèmes et organismes d'éducation. S'il reste difficile d'identifier un ensemble pertinent d'indicateurs précoces, quelques systèmes font preuve d'une grande précision et ainsi, d'une réflexion poussée sur les raisons qui poussent les élèves à décrocher. Pour ne pas tomber dans le piège du profilage des élèves, des algorithmes ouverts et transparents s'imposent (Chapitre 9).

Les évaluations standardisées basées sur un jeu vidéo s'appuient elles aussi sur les technologies intelligentes et les techniques d'analyse des données intelligentes pour étendre les évaluations aux compétences difficiles à évaluer d'après des tests traditionnels (sur papier ou ordinateur), à l'image des compétences de haut niveau (comme la créativité) ou des compétences émotionnelles et comportementales (la collaboration ou la stratégie comportementale, par exemple). Les tests dispensés via jeux vidéo peuvent analyser des données de suivi des mouvements des yeux et des enregistrements audio, traiter le langage naturel et des informations comme le temps consacré à une tâche, ou encore se servir de simulations (Chapitre 10).

Enfin, en tant que « infrastructure de vérification », la technologie de la blockchain (chaîne de blocs en anglais) ouvre des horizons en matière de reconnaissance des diplômes et certificats. Cette technologie permet de confirmer ce qu'avance un individu ou un établissement, que ce soit en matière de compétences ou de qualifications, et ce de manière instantanée et fiable. Elle élimine la fraude aux diplômes (et autres qualifications), facilite la mobilité géographique et institutionnelle des apprenants et du personnel et émancipe les individus en leur accordant plus de contrôle sur les données qui les concernent. De nombreuses initiatives en ce sens ont vu le jour dans le monde. Elles pourraient bien changer la façon dont les systèmes d'éducation et d'apprentissage tout au long de la vie gèrent les diplômes et les qualifications (Chapitre 11).

Recommandations politiques

De nombreuses raisons portent à croire que les technologies intelligentes sont susceptibles d'améliorer l'efficacité, l'équité et la rentabilité des systèmes d'éducation. Cela étant, il convient de garder à l'esprit quelques points importants relatifs aux technologies intelligentes afin d'en tirer le meilleur parti :

- Les technologies intelligentes sont des systèmes hybrides qui conjuguent IA et intervention humaine. Impliquer les utilisateurs finaux à leur conception, donner aux humains le dernier mot pour les décisions importantes et négocier leur usage avec transparence sont autant d'éléments essentiels pour les rendre à la fois utiles et acceptables aux yeux de la société.
- Les technologies intelligentes aident les humains de différentes façons, sans pour autant être parfaites. Faire preuve de transparence sur leurs capacités réelles en matière d'évaluation, de diagnostic et d'action est un impératif. Cela étant, leurs limites doivent être envisagées à l'aune des limites humaines pour des tâches analogues.
- Il convient de financer des études visant à déterminer l'efficacité pédagogique des technologies intelligentes dans un cadre à la fois scolaire et extrascolaire, et leur efficacité à des fins de gestion des systèmes, sans s'intéresser exclusivement à la technologie. Des critères pourraient aussi être définis afin de produire rapidement ces études.
- L'adoption des technologies intelligentes repose sur des mécanismes fiables de protection et de réglementation des données confidentielles, eux-mêmes basés sur l'évaluation des risques. Des considérations éthiques s'imposent en l'absence de directives officielles. Par exemple, le niveau d'impartialité des algorithmes suscite toujours plus de réserves. Il pourrait être vérifié par l'intermédiaire d' « algorithmes ouverts » par des tiers.
- Les technologies intelligentes ont un coût, et leur adoption doit reposer sur une analyse coûts-avantages reconnaissant que leurs atouts surpassent de simples avantages pécuniaires. Dans bien des cas, identifier des tendances en matière de données permet de mieux concevoir les politiques et favorise les interventions propices à l'équité ou l'efficacité. Les responsables politiques doivent également encourager la conception de technologies abordables et durables grâce aux normes libres et à l'interopérabilité.

1 Frontières des technologies éducatives intelligentes : Opportunités et défis

Stéphan Vincent-Lancrin
OCDE

Ce premier chapitre est une introduction générale et présente quelques conclusions et recommandations politiques. Après avoir souligné l'importance de la numérisation en tant que tendance sociétale pour l'éducation, il présente l'axe principal de l'ouvrage : nous partons à la découverte des frontières de la technologie éducative. L'intelligence artificielle et l'analyse des données de l'apprentissage ont déjà commencé à transformer les pratiques éducatives, tout comme d'autres technologies intelligentes de pointe telles que la robotique et la blockchain. Comment peuvent-elles améliorer l'enseignement en classe et la gestion des établissements et des systèmes éducatifs ? Après avoir présenté les objectifs et les différents chapitres de l'ouvrage, ce premier chapitre met en évidence les possibilités offertes par les technologies intelligentes à destination des systèmes éducatifs et passe en revue certaines questions et dimensions politiques émergentes à prendre en compte avant de formuler quelques conclusions tournées vers l'avenir.

Les données intelligentes et les technologies numériques dans l'éducation

La transformation numérique ouvre de nouveaux horizons à l'éducation. Si l'éducation n'a jamais manqué de données, qu'il s'agisse de notes d'élèves ou de renseignements administratifs, ce n'est que depuis peu que celles-ci sont mises au service d'un meilleur apprentissage, d'un meilleur enseignement et de prises de décisions administratives mieux étayées. Il faut reconnaître néanmoins que les parties prenantes dans l'éducation ont toujours prêté attention aux évolutions technologiques et à leur capacité à révolutionner le monde de l'éducation. Ce constat avait déjà été posé avec l'invention de la radio, de la télévision ou plus récemment des ordinateurs et de l'internet. Mais ces technologies innovantes ont été utilisées pour maintenir les choses en l'état ou parfois pour les améliorer, mais très rarement pour les transformer. Les technologies numériques, et tout particulièrement les technologies intelligentes axées sur l'intelligence artificielle, l'analyse des données de l'apprentissage ou la robotique, sont-elles susceptibles de changer la face de l'éducation de la même façon qu'elles révolutionnent le reste de la société (OECD, 2019[1] ; OECD, 2019[2])? Et si oui, comment ?

Le débat sur la « transformation numérique » dans l'éducation s'inscrit dans une double perspective.

En premier lieu, il faut se pencher sur les changements que les technologies pourraient apporter aux modes de transmission de l'apprentissage, de la prime enfance à l'âge adulte. Cet ouvrage aborde ces questions. Comment la numérisation va-t-elle transformer le monde de l'éducation, à court, moyen et long terme ? Comment les avancées

rapides dans le développement de l'intelligence artificielle, de l'analyse de l'apprentissage, de la robotique vont-elles modifier l'apprentissage et l'enseignement ? Quelles sont les tâches actuelles des enseignants que les ordinateurs ou les robots pourraient effectuer eux-mêmes ? Ces avancées technologiques peuvent aussi se matérialiser en nouveaux processus de travail et de gestion à l'échelle des établissements et des systèmes éducatifs. Tantôt elles permettront une plus grande efficacité à un moindre coût et une productivité accrue, tantôt elles rendront les systèmes éducatifs plus performants dans la réalisation de leurs objectifs traditionnels (résultats de l'apprentissage, équité, réussite des études ...). La transformation numérique va-t-elle avoir un impact sur la scolarité, l'enseignement supérieur ou l'apprentissage tout au long de la vie ? Les tâches automatisées ou informatisées dans tout le continuum d'apprentissage vont-elles modifier les processus éducatifs ? Les infrastructures numériques mises à la disposition des élèves, des étudiants, des enseignants, des responsables éducatifs ou encore des responsables politiques seront-elles identiques ? Le monde de l'éducation va-t-il devenir plus équitable, plus efficient, plus productif grâce à l'utilisation accrue des ordinateurs, des données, des dispositifs intelligents, des robots (et de toute la technologie qui les sous-tend) ? Les résultats de l'apprentissage vont-ils s'améliorer à leur tour ? Quels sont les possibilités, les opportunités et les défis qui se profilent à l'horizon ? Toutes ces questions revêtent une dimension stratégique depuis plusieurs années pour les responsables politiques. Entre 2015 et 2019, 17 pays de l'OCDE ont publié une stratégie numérique pour l'éducation (et 16 autres pays ont inclus un chapitre consacré à l'éducation dans leur stratégie numérique nationale) (van der Vlies, 2020[3]).

En second lieu, il convient de se demander dans quelle mesure le monde de l'éducation répond aux nouveaux besoins sociétaux liés au marché de l'emploi à la lumière de la transformation numérique. Cette question renvoie aux discussions concernant les compétences du XXIe siècle. La créativité, l'esprit critique, la communication et la collaboration prennent de plus en plus d'importance. Il s'agit de compétences qui favorisent l'innovation, mais qui sont plus difficiles à automatiser (Vincent-Lancrin et al., 2019[4]). La transformation numérique et les besoins changeants sur le marché du travail mettent encore plus l'accent sur l'importance des contenus éducatifs. Quels sont les savoirs, les compétences, les attitudes et les valeurs qui permettront aux individus d'évoluer dans un monde hautement numérisé et marqué par l'IA ? Bien que ce ne soit pas l'objet principal de cet ouvrage, certaines analyses montreront comment les technologies intelligentes peuvent également favoriser l'acquisition et l'évaluation de ces compétences, par exemple par la ludification ou de nouvelles formes d'évaluation.

Après avoir présenté les objectifs et les chapitres de l'ouvrage, ce chapitre met en évidence les possibilités offertes par les technologies intelligentes à destination des systèmes éducatifs et passe en revue certaines questions et dimensions politiques émergentes à prendre en compte avant de formuler quelques conclusions porteuses d'avenir.

Les frontières actuelles de la transformation numérique dans le monde de l'éducation

L'objectif de cet ouvrage étant de cerner les limites actuelles de l'utilisation des technologies nouvelles dans le monde de l'éducation et de faire le point sur la situation aujourd'hui, nous nous limiterons à évoquer ce que la technologie est déjà capable de réaliser maintenant dans certains établissements, laboratoires ou dans certaines régions. Lorsque la situation s'y prête, des exemples concrets de l'efficacité de ces outils sont fournis.

L'ouvrage est organisé d'après les différentes questions éducatives qui y sont traitées, plutôt qu'en fonction des nouvelles technologies. En effet, un même sujet éducatif peut concerner plusieurs technologies (qu'elles offrent une autre solution ou soient complémentaires). Trois grands types de technologie sont abordés ici : l'intelligence artificielle (dans son acception actuelle) et l'analyse des données de l'apprentissage, la robotique (qui ajoute une dimension physique à l'IA) et enfin, la chaîne de blocs. L'Encadré 1.1 fournit des définitions de ces technologies. L'ouvrage se concentre sur deux domaines où la technologie aura, et a déjà, un effet transformateur : l'enseignement et l'apprentissage en classe, et la gestion des établissements d'enseignement et des systèmes éducatifs.

Encadré 1.1 Description des technologies numériques

L'intelligence artificielle (IA) : Un système d'intelligence artificielle (ou système d'IA) est un « système automatisé » qui, pour un ensemble donné d'objectifs définis par l'homme, est en mesure d'établir des prévisions, de formuler des recommandations, ou de prendre des décisions influant sur des environnements réels ou virtuels. Les systèmes d'IA sont conçus pour fonctionner à des niveaux d'autonomie divers. Le cycle de vie d'un système d'IA comporte les phases suivantes : i) une phase de planification et de conception, de collecte et de traitement des données, de construction du modèle (la séquence de ces différentes étapes dépend du contexte) ; ii) une phase de vérification et de validation ; iii) une phase de déploiement ; et iv) une phase d'exploitation et de suivi. Ces phases se déroulent souvent de manière itérative et ne sont pas nécessairement séquentielles. La décision de mettre un système d'IA hors service peut intervenir à n'importe quel moment de la phase d'exploitation ou de suivi (OECD, 2019[1]).

Analyse des données de l'apprentissage : L'analyse des données de l'apprentissage est l'une des nouvelles disciplines de la science des données. Elle étudie comment utiliser la fouille de données, l'apprentissage automatique, le traitement du langage naturel, la visualisation et les interactions « être humain-machine » pour fournir aux professionnels de l'éducation et aux apprenants des informations susceptibles d'améliorer les processus d'apprentissage et les pratiques d'enseignement.

L'Internet des objets/dispositifs intelligents : L'Internet des objets concerne tous les dispositifs et objets dont l'état peut être modifié grâce à l'Internet, avec ou sans la participation directe d'individus. Les dispositifs « intelligents », qu'ils s'agissent d'appareils, de machines ou d'infrastructure, permettent l'automatisation et l'interaction en temps réel. Les applications et services conçus pour l'Internet des objets, alimentés avec les informations fournies par l'analyse des données, devraient devenir omniprésents et les établissements d'enseignement et les salles de classe pourraient à leur tour devenir « connectés ».

Les robots : Les robots sont des machines physiques dotées de capacités de détection, de calcul et de manœuvre ; ils sont capables d'effectuer des actions automatiquement. En règle générale, les robots peuvent prendre des décisions autonomes et adapter ces décisions en fonction des connaissances préalables et des données fournies par les capteurs. Dans le monde de l'éducation, il s'agit principalement de « robots sociaux » qui interagissent avec les apprenants.

La chaîne de blocs (blockchain) : En fait, une chaîne de blocs est la combinaison de technologies déjà existantes qui, ensemble, peuvent créer des réseaux instaurant la confiance entre des personnes ou des parties qui, autrement, n'auraient aucune raison de se faire confiance. La combinaison de ces technologies confère aux réseaux blockchain des caractéristiques essentielles qui peuvent supprimer le besoin de confiance, et donc permettre un transfert sécurisé de valeur et de données directement entre intervenants. Plus précisément, la chaîne de blocs utilise la technologie des registres distribués pour stocker des informations qui sont vérifiées par cryptographie au sein d'un groupe d'utilisateurs et sont approuvées par un protocole de réseau prédéfini, souvent sans le contrôle d'un organe central. Un registre peut être assimilé à un livre de comptes : il enregistre et stocke toutes les transactions entre les utilisateurs dans l'ordre chronologique. Ce grand livre n'est pas soumis au contrôle d'un organe (p. ex. une banque). En revanche, une copie identique du grand livre est détenue par tous les utilisateurs du réseau, appelés nœuds. En plus de son propre hachage, chaque bloc stocke le hachage du bloc qui le précède. Un hachage est une chaîne unique de lettres et de chiffres créée à partir d'un texte à l'aide d'une formule mathématique. Les blocs sont donc « enchaînés » les uns aux autres, ce qui rend le registre (presque) immuable, c'est-à-dire qu'il ne peut être modifié (OECD, 2017[5]).

Source: ECHOES, base de données d'images et de vidéos (reproduit avec autorisation).

Les différents chapitres présentent la manière dont les technologies intelligentes abordent (ou pourraient aborder) un certain nombre de problèmes éducatifs, comment elles fonctionnent, ce qu'elles peuvent déjà bien faire, quelles sont leurs lacunes actuelles et quel rôle elles pourraient jouer à l'avenir dans les systèmes éducatifs à l'échelle nationale. La sélection des applications a été faite dans des domaines où la technologie est suffisamment développée et où ses avantages sont patents, mais aussi dans des domaines où les percées récentes sont peut-être moins connues des décideurs politiques et d'un public plus large. Les analyses se concentrent sur l'éducation formelle, de l'enseignement primaire à l'enseignement supérieur, et ne concernent pas les applications destinées à l'éducation informelle et non formelle. Sont également laissées de côté les applications axées sur l'enseignement et l'apprentissage de matières spécifiques (p. ex., les langues étrangères, les mathématiques, la lecture, etc.), ainsi que sur l'enseignement et l'apprentissage de la technologie elle-même (codage, etc.).

Le chapitre 2, rédigé par Ryan Baker (Université de Pennsylvanie, États-Unis), donne un aperçu général de l'utilisation de l'intelligence artificielle dans l'éducation. Après avoir clarifié différents termes et définitions pour aider le lecteur à comprendre les relations et parfois les chevauchements entre différents termes technologiques et techniques, Baker donne une vue d'ensemble des technologies actuellement utilisées dans l'éducation, de leurs applications principales et de leur potentiel au profit du monde de l'éducation. Cet aperçu présente certaines des applications de base qui sont étudiées de manière plus approfondie dans ce rapport et qui pourraient transformer l'enseignement et l'apprentissage (p. ex., la personnalisation de l'apprentissage). Il souligne également le potentiel des technologies intelligentes dans d'autres domaines tels que l'évaluation formative, les jeux et simulations numériques ou plus simplement l'utilisation des données dans le développement des pratiques pédagogiques. Le chapitre 2 évoque l'utilisation de ces technologies dans la gestion des établissements et des systèmes éducatifs (p. ex., les systèmes d'alerte précoce), mais il se penche également sur un vaste éventail d'autres applications potentielles, telles que l'information en temps réel des parents, les systèmes d'admission ou les systèmes de supervision.

La première partie de l'ouvrage se concentre principalement sur l'utilisation des technologies intelligentes *en classe*. Plusieurs applications de technologies intelligentes sont passées en revue, des plus courantes (systèmes de tutorat intelligents) aux nouveaux développements (orchestration de la classe, robots sociaux, implication dans l'apprentissage).

Le chapitre 3, rédigé par Inge Molenaar (Université Radboud, Pays-Bas), traite des récentes innovations en matière de personnalisation de l'apprentissage. La technologie d'apprentissage adaptatif est sans doute l'un des champs d'application les plus anciens de la technologie dans l'éducation et a depuis lors fait ses preuves. Les technologies d'apprentissage actuelles s'attachent à diagnostiquer l'état des connaissances des élèves et à adapter le feed-back ou à traiter les problèmes au niveau de la tâche (quelle est la tâche suivante ?), au niveau de l'étape (quelle est la prochaine étape d'une tâche donnée ?) ou du programme d'études (quel sujet ou quelle unité du programme d'études ?). Les frontières dans ce domaine sont délimitées par un vaste éventail de caractéristiques propres à l'apprenant comme l'autorégulation, la motivation et l'émotion. Un modèle composé de « 6 niveaux d'automatisation » décrit les dernières avancées en matière d'apprentissage personnalisé. Il articule les différents rôles de l'IA, des enseignants et des apprenants et montre comment les solutions hybrides être humain-IA font appel aux qualités des deux pour mettre en œuvre l'apprentissage personnalisé.

Le chapitre 4, rédigé par Sidney D'Mello (Université du Colorado Boulder, États-Unis), porte sur un domaine de pointe de l'apprentissage personnalisé, à savoir l'implication dans l'apprentissage. Il donne un aperçu général de quelques pistes prometteuses pour mesurer, grâce aux technologies numériques, le niveau d'implication des élèves et étudiants dans le cadre de l'apprentissage de manière automatisée. Il examine également comment ces technologies peuvent être conçues pour renforcer l'implication au début de l'apprentissage ou détecter le décrochage des apprenants. Après avoir expliqué pourquoi la participation est importante dans le cadre de l'apprentissage, ce chapitre présente différents types d'approches pour renforcer l'engagement et l'apprentissage des apprenants en utilisant des données et des technologies, par exemple l'analyse des caractéristiques faciales, l'analyse du regard ou le suivi oculaire, parfois en ligne, mais souvent dans des environnements en présentiel.

Le chapitre 5, rédigé par Pierre Dillenbourg (École polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse), met l'accent sur l'utilisation de l'analyse de l'apprentissage et de l'intelligence artificielle pour aider les enseignants à organiser l'enseignement et l'apprentissage des élèves dans leur classe. L'analyse considère ici la classe dans son ensemble et les interactions qui s'y déroulent. Équipées de capteurs, de caméras ou d'appareils connectés, les salles de classe

deviennent un espace mixte physique-numérique dans lequel les ordinateurs analysent les comportements des élèves et des enseignants, et donnent aux enseignants un retour d'information par rapport à différents paramètres. Grâce à différents types de tableaux de bord et d'affichages, les enseignants obtiennent des informations en temps réel, par exemple pour savoir quand passer au point suivant de la leçon, ou reçoivent un retour d'information après le cours pour favoriser leur développement professionnel ou préparer les prochaines leçons.

Le chapitre 6, rédigé par Judith Good (Université du Sussex, Royaume-Uni, et Université d'Amsterdam, Pays-Bas), montre comment la technologie peut accompagner les apprenants qui souffrent de handicaps physiques et de problèmes de santé mentale. La technologie permet de contourner les obstacles à l'apprentissage pour les élèves aveugles ou malvoyants grâce à la synthèse vocale ou la conversion de la parole en texte. Des applications simples aident les adultes à établir un premier diagnostic des besoins spécifiques, comme dans le cas de la dysgraphie. Ce chapitre souligne l'importance des systèmes hybrides être humain-IA, tant dans le processus de diagnostic que d'apprentissage. Les technologies intelligentes étant encore limitées par rapport aux capacités de l'être humain, elles permettent parfois de mettre en relation des élèves ayant des besoins spécifiques avec des enseignants ou d'autres personnes (p. ex., l'opérateur d'un environnement d'apprentissage numérique qui aide les élèves atteints de troubles autistiques). Ces initiatives montrent l'intérêt d'impliquer les élèves ayant des besoins spécifiques dans l'élaboration des technologies destinées à les soutenir dans leur apprentissage.

Le chapitre 7 de Tony Belpaeme (Université de Gand, Belgique) et Fumihide Tanaka (Université de Tsukuba, Japon) présente le rôle des robots en tant que vecteurs d'éducation. Même si les robots sont basés sur un type différent de technologie (la robotique), ceux-ci peuvent intégrer des technologies intelligentes présentées dans les chapitres précédents. Deux rôles principaux sont présentés : les robots peuvent être soit des éducateurs et des tuteurs (généralement en tête-à-tête), soit des apprenants à l'image des élèves (ceux-ci enseignant alors aux robots ce qu'ils sont en train d'apprendre). En général, les robots sociaux sont conçus pour un environnement d'apprentissage supervisé par des enseignants. Les robots peuvent également être des dispositifs de téléprésence qui permettent aux enseignants de faire cours à une classe à distance (ou aux étudiants d'assister à un cours) et offrent plus de possibilités que les systèmes de vidéoconférence. Les travaux de recherche montrent que les robots sont plutôt efficaces dans les tâches qu'ils accomplissent, mais il semble peu probable qu'ils puissent remplacer les enseignants à court terme. Le coût actuel de leur utilisation est aussi un frein à la généralisation des robots dans l'enseignement.

La deuxième partie de l'ouvrage se concentre principalement sur l'utilisation des technologies intelligentes dans l'optique de la gestion des établissements d'enseignement et des systèmes éducatifs.

Le chapitre 8 de Dirk Ifenthaler (Université de Mannheim, Allemagne, et Université Curtin, Australie) commence par un aperçu des différentes utilisations possibles de l'analyse des données de l'apprentissage pour gérer les établissements d'enseignement supérieur et fournir des informations aux décideurs sur une variété de processus de gouvernance et d'organisation, qui vont de l'amélioration actuelle de la productivité aux développements à venir en matière d'éducation. L'analyse de l'apprentissage a fait ses preuves au niveau organisationnel, mais très peu de cas s'inscrivant dans une approche holistique ont fait l'objet de rapports. Les défis qui concernent le niveau organisationnel s'appliquent également au niveau du système en lui-même. Plusieurs recommandations en faveur d'une utilisation plus poussée de l'analyse de l'apprentissage à l'échelle des organisations et des systèmes sont donc présentées dans ce chapitre. La plupart des recherches sur l'analyse de l'apprentissage dans le cadre de la gestion des organisations concernent les établissements d'enseignement supérieur. Les défis spécifiques aux établissements du primaire et du secondaire restent encore à explorer.

Le chapitre 9, rédigé par Alex Bowers (Université de Columbia, États-Unis), montre comment les données et les technologies intelligentes permettent de comprendre et de combattre un problème important dans la plupart des pays de l'OCDE : le décrochage scolaire. Le recours aux technologies intelligentes est dans ce cas relativement courant, du moins dans certains pays. Il s'agit de l'une des utilisations les plus immédiates et sans cesse croissantes des données administratives. Dans cette perspective, il est primordial de disposer de variables prédictives fiables. En effet, il arrive que certains indicateurs d'alerte précoce (et les systèmes qui les utilisent) ne remplissent pas leur objectif. Le chapitre 9 passe en revue des techniques plus poussées d'analyse des données qui permettent d'identifier de manière plus précise les élèves qui présentent un risque de décrochage. La qualité et l'équité des algorithmes pourront être vérifiées par des tiers si les données et les algorithmes sont communiqués en toute transparence. Une analyse récente montre que les élèves qui décrochent ont des profils divers. Il faut donc diversifier les mesures prises jusqu'à présent à destination des élèves qui risquent de quitter l'école.

Le chapitre 10, rédigé par Jack Buckley, Laura Colosimo, Rebecca Kantar, Marty McCall et Erica Snow (Imbellus Inc., États-Unis), explique comment les progrès récents des technologies numériques pourraient déboucher sur une nouvelle génération d'évaluations standardisées basées sur le jeu et fournir aux systèmes éducatifs des informations sur les compétences socioémotionnelles des élèves qui sont difficiles à évaluer au moyen des tests standardisés traditionnels, qu'ils soient informatisés ou non. Les tests basés sur le jeu peuvent analyser des données de suivi du mouvement des yeux et des enregistrements audio, traiter le langage naturel et analyser des informations comme le temps consacré à une tâche, ou encore se servir de simulations. Compte tenu de leur coût, de la complexité de leur développement et aussi de certaines de leurs limites intrinsèques, ils viendront compléter plutôt que remplacer les tests standardisés traditionnels, qui ont leurs avantages pour évaluer certaines connaissances et compétences.

Le chapitre 11 de Natalie Smolenski (Hyland, États-Unis) se concentre sur l'utilisation de la technologie blockchain pour rendre l'authentification et la reconnaissance de diplômes plus efficaces - et aussi éventuellement certains autres processus administratifs nécessitant une procédure de vérification. Le chapitre commence par un historique de la blockchain dans les cryptomonnaies afin de mettre en perspective le fonctionnement de la technologie en question. La technologie blockchain peut s'avérer particulièrement utile dans la délivrance de diplômes et de titres. De nombreuses initiatives faisant appel à cette technologie sont en cours à l'échelle mondiale. La blockchain permet un partage sécurisé et transparent des qualifications, des crédits et des certificats. À l'échelle nationale (mais plus encore au plan international), elle pourrait contribuer à mettre fin aux faux diplômes et aux fausses certifications, à faciliter le transfert des dossiers scolaires ainsi que la délivrance de certificats de compétences dans le cadre de petites unités d'apprentissage telles que les MOOC ou du développement professionnel dispensé dans les entreprises. L'infrastructure humaine et juridique nécessaire à leur généralisation reste à développer, notamment des normes ouvertes et l'interopérabilité. Par rapport aux processus actuellement en place, le chapitre soutient qu'il s'agirait d'une solution rentable.

Principales opportunités

Les technologies intelligentes peuvent améliorer, de différentes manières, les systèmes éducatifs et l'offre de services éducatifs. Elles peuvent améliorer l'accès à l'éducation, sa qualité pour les apprenants et son rapport coût-efficacité pour les sociétés. Cette section met en évidence la manière dont les technologies intelligentes contribuent à la réalisation de ces objectifs, ou pourraient y contribuer.

Efficacité

La fréquentation d'un établissement d'enseignement ne se traduit pas toujours par un apprentissage académique aussi complet qu'on pourrait l'espérer. Le Programme international pour le suivi des acquis des élèves (PISA) de l'OCDE a montré que la fréquentation d'un établissement scolaire peut en fait conduire à des résultats d'apprentissage très différents selon les pays. Les données concernant l'enseignement supérieur sont certes encore lacunaires, mais on peut raisonnablement penser qu'il en va de même à ce niveau d'enseignement. Rendre l'enseignement et l'apprentissage plus efficaces est assurément un des espoirs principaux des technologies intelligentes.

En classe, les applications qui soutiennent directement l'apprentissage des élèves sont prometteuses. L'apprentissage personnalisé vise à proposer à tous les élèves un programme de cours ou une tâche appropriée, et à les guider dans cette tâche, en fonction d'un diagnostic de leurs connaissances et de leurs lacunes. Cette démarche n'intervient pas seulement au niveau scolaire, en se concentrant sur le « quoi », mais elle prend de plus en plus en compte la manière dont les élèves apprennent et s'intéressent à des facteurs tels que l'autorégulation, la motivation ou l'effort (Molenaar, 2021[8]). L'implication personnelle est essentielle dans le processus d'apprentissage et des solutions visant à maintenir l'implication des élèves dans des environnements d'apprentissage numériques ou physiques sont en cours d'élaboration pour identifier leurs états affectifs pendant l'apprentissage et les inciter à rester motivés lorsqu'ils semblent perdre pied (D'Mello, 2021[9]). Les robots sociaux accomplissent des tâches similaires de différentes manières : ils peuvent utiliser l'apprentissage adaptatif pour encadrer les élèves en langage ordinaire, mais ils peuvent aussi enseigner, ou les motiver à apprendre en jouant le rôle d'un condisciple. Ils soutiennent les enseignants en mettant en œuvre différents types de stratégies d'enseignement et d'apprentissage (Belpaeme et Fumihide, 2021[10]). Enfin, les technologies intelligentes permettent aux élèves souffrant d'un handicap ou ayant des besoins spécifiques d'avoir accès au matériel de cours et de participer aux activités d'apprentissage dans une mesure qui n'était pas possible auparavant. Les technologies intelligentes renforcent clairement l'efficacité de l'éducation à cet égard (Good, 2021[11]).

Ces solutions peuvent être utilisées en dehors de la salle de classe également, que ce soit pour les devoirs, sous la forme d'un tutorat privé automatisé ou d'entraînement pratique, ou encore pour l'apprentissage tout au long de la vie. En fait, les débouchés les plus importants pour les entreprises de technologie éducative résident auprès du grand public, autrement dit les apprenants et leurs parents, soit pour des activités d'apprentissage récréatives, soit pour l'encadrement personnel ou la préparation aux examens.

L'analyse des données qui proviennent de la salle de classe va aider les enseignants à améliorer leurs pratiques pédagogiques. C'est là le deuxième espoir que recèlent les technologies intelligentes. Les travaux de recherche en sont encore à leurs balbutiements, mais de nombreuses applications montrent déjà comment diverses solutions pourraient aider les enseignants à mieux utiliser leur temps en classe, par exemple en leur suggérant le moment opportun pour passer à l'activité suivante, en identifiant les personnes qui requièrent le plus leur attention, ou en indiquant la manière dont ils pourraient faire participer l'ensemble de la classe à des activités d'apprentissage collaboratif. Si les solutions d'orchestration de la classe peuvent aider les enseignants en temps réel, elles fournissent également un retour d'information sur leur propre pratique, par exemple sur leur activité verbale, sur les personnes auxquelles ils s'adressent ou sur la manière dont ils répartissent leur temps entre différents types d'activités (Dillenbourg, 2021[12]). Le feed-back en temps réel et le feed-back post-hoc s'apparentent à des opportunités d'apprentissage professionnel pour l'enseignant en question, et présentent l'avantage significatif de concerner l'enseignant qui a été observé plutôt que la pratique d'enseignement théorique ou générale. Dans cette perspective, les technologies intelligentes offrent un réel potentiel pour améliorer les pratiques pédagogiques de tous les enseignants et, par conséquent, les résultats d'apprentissage de leurs élèves.

Encadré 1.2 Intégrer l'IA et l'analyse des données de l'apprentissage dans le cadre scolaire : exemples qui nous viennent de Chine

Les bâtiments scolaires vont être de plus en plus équipés de capteurs, de caméras et d'ordinateurs pour remplir certaines fonctions administratives ainsi que leur rôle en matière d'enseignement et d'apprentissage. Certains établissements expérimentent déjà des méthodes innovantes pour intégrer les technologies intelligentes dans leur fonctionnement au quotidien. Voici quelques exemples en provenance de Shanghai (Chine).

L'école primaire centrale Luwan n° 1 (district de Huangpu, Shanghai) est un établissement d'enseignement public qui intègre l'IA dans la gestion de ses ressources scolaires ainsi que dans ses pratiques pédagogiques - un modèle numérique qui pourra ensuite être étendu à d'autres établissements. Tant la gestion du campus que l'enseignement en lui-même reposent désormais sur des technologies intelligentes. Grâce à la technologie de détection basée sur l'Internet des objets, le « campus numérique » a pour objectif de récolter et d'analyser les données prélevées sur le campus pour assurer le contrôle et la gestion de facteurs tels que la sécurité, l'éclairage, la qualité de l'eau et de l'air, mais aussi pour collecter des données sur l'activité du campus ; par exemple, la densité de personnes dans les couloirs, etc. Grâce à des dispositifs portables, l'établissement collecte également des données physiologiques telles que la température corporelle et le rythme cardiaque des élèves, ainsi que des données sur les processus d'apprentissage afin de soutenir les enseignants et les apprenants. L'application « élèves numériques » analyse les données personnelles des élèves pour établir un portrait détaillé et holistique de ceux-ci. La collecte de données permet de mieux comprendre le niveau d'apprentissage des élèves et leur progression, et fournit aux enseignants des données leur permettant d'adapter leurs pratiques pédagogiques. Les données portent sur la discipline, le niveau scolaire, la santé physique et mentale, les goûts esthétiques et le comportement social. Les aspects socioémotionnels tels que l'implication dans l'apprentissage et la situation affective sont mesurés par des applications de reconnaissance vocale et faciale. Enfin, un système d'« enseignement numérique » aide les enseignants à cinq niveaux : la préparation des cours, l'orchestration de la classe, les devoirs, le tutorat et les évaluations - avec des fonctionnalités telles que « orchestration de la classe », « évaluation intelligente » et « révision intelligente des devoirs ». Le système de tutorat intelligent aide directement les élèves à accéder aux ressources, outils, parcours et conseils personnalisés. Depuis juin 2021, ce modèle a été adopté par plus de 250 établissements à Shanghai, Qinghai, Shaanxi, Guizhou, etc.

Graphique 1.1 La numérisation en action à l'école primaire centrale Luwan N°1 à Shanghai

Remarque : La photo de gauche représente une vue d'ensemble du système de gestion du campus. La photo de droite montre un élève utilisant un tableau d'écriture numérique qui enregistre ses progrès.
Source: Avec l'aimable autorisation du gouvernement municipal de Shanghai.

Le lycée expérimental rattaché à l'université de Tongji (Chine) met également en place un nouveau système de « classe numérique » pour les cours d'anglais, de géographie et de biologie. Les données d'apprentissage des élèves recueillies par le système constituent la base de l'enseignement et de l'apprentissage. Avant les cours, les enseignants utilisent des outils numériques interactifs de « pratique » pour évaluer l'apprentissage des élèves ; ils effectuent également de temps en temps des petits tests en classe pour obtenir des données en temps réel sur l'apprentissage des élèves. Cette approche leur permet de modifier leurs stratégies d'enseignement pendant les cours, et de développer des stratégies individualisées après les cours. Sur la base de ces informations, les enseignants mettent au point des devoirs en ligne, qui sont automatiquement notés par le système et permettent de générer des rapports d' « analyse des connaissances » personnalisés (Graphique 1.2). Grâce à ces fiches individuelles, le système propose des vidéos et des exercices de microtutorat pour répondre aux besoins d'apprentissage individuels. Les enseignants reçoivent des conseils pour proposer des devoirs et des conseils ciblés après les cours et pour adapter leur enseignement aux besoins des élèves. Le système offre également un apprentissage collaboratif dans la mesure où les enseignants peuvent voir et commenter le travail des élèves, et ceux-ci le travail de leurs condisciples.

Graphique 1.2 Le système de la « classe numérique » au lycée expérimental rattaché à l'université de Tongji

Remarque : L'image de gauche représente le niveau de connaissances d'un élève dans un chapitre du cours de chimie. L'image de droite montre comment le système peut être utilisé dans le cadre de l'apprentissage coopératif : les élèves et l'enseignant peuvent visualiser et évaluer comment tous les élèves ont répondu à un devoir donné.
Source: Avec l'aimable autorisation du gouvernement municipal de Shanghai.

D'autres établissements expérimentaux envisagent comment les technologies numériques peuvent être utilisées.

- Le collège Xuhui à Shanghai accorde depuis longtemps la priorité à l'enseignement des matières scientifiques. Il dispose de 22 laboratoires en matière d'ingénierie et d'innovation. Après la mise en œuvre de la 5G sur le campus, le collège Xuhui a élaboré un modèle d'enseignement scientifique « holographique » basé sur la réalité mixte afin de rendre les sujets complexes plus directement compréhensibles, et de renforcer l'attention et l'enthousiasme des élèves pour ces matières. En juin 2021, deux leçons (« Explorer les mystères du système solaire » et « Comprendre les os du corps humain ») ont été mises au point avec une interaction en temps réel avec le collège Yuanyang n° 1 (préfecture de Honghe, province du Yunnan).
- L'Institut de technologie industrielle de Shanghai met à la disposition de ses élèves une technologie avancée de réalité mixte et de simulation pour enseigner des processus de fabrication industrielle. Les projets de formation par simulation sont réalisés dans un environnement virtuel en 3D, qui s'articule autour de postes de travail tels que le dessin graphique, la manipulation de pièces, et d'unités de travail telles que le chargement et le déchargement de machines-outils à commande numérique par ordinateur (CNO).

Tant au niveau des organisations que des systèmes, les technologies intelligentes recèlent de grandes potentialités pour rendre l'enseignement plus efficace. Même si cela reste relativement rare (Ifenthaler, 2021[13]), les technologies intelligentes peuvent être intégrées dans la plupart des activités des établissements, fournissant aux responsables, aux enseignants et aux apprenants des informations pour gérer les ressources de l'établissement ainsi que pour améliorer l'efficacité de l'enseignement et de l'apprentissage (voir Encadré 1.1). La nouvelle génération d'évaluations basées sur l'IA ouvre également de nouvelles perspectives pour l'identification et l'évaluation de compétences qui étaient difficiles à mesurer au moyen de tests sur papier. La transition vers la mise en avant des compétences (en plus de l'emphase mise traditionnellement sur les connaissances) pourrait s'en trouver facilitée à l'échelle des systèmes éducatifs. Les évaluations basées sur le jeu et les simulations permettent de concevoir des évaluations plus réalistes, mais aussi d'évaluer de façon inédite des compétences telles que la résolution de problèmes complexes, la créativité ou la collaboration (Buckley et al., 2021[14]).

Enfin, les systèmes de données longitudinales sur l'éducation qui suivent les apprenants tout au long de leurs études permettent de mieux cibler l'intervention des pouvoirs publics et d'élaborer une offre éducative davantage en phase avec notre époque. Par exemple, aux États-Unis, une analyse du taux de diplômés dans l'enseignement postsecondaire, du succès des stratégies de placement des étudiants dans des « cours de rattrapage » et de l'inscription à temps partiel ou à temps plein a conduit à revoir ce qu'est réellement l'expérience éducative des étudiants dans les établissements de l'enseignement postsecondaire et à adapter leur mode de fonctionnement (Bailey, Smith-Jaggars et Jenkins, 2015[15]). Comme pour d'autres secteurs (OECD, 2019[16]), l'utilisation des données soutient les approches conceptuelles et l'action publique en elle-même.

Équité

Les technologies intelligentes peuvent aider les systèmes d'éducation à renforcer l'équité dans l'apprentissage, mais dans les faits, ces technologies peuvent sembler ambivalentes. D'une part, il est clair qu'elles contribuent, à tout le moins en théorie, à réduire les inégalités, à la fois en facilitant l'accès aux possibilités d'apprentissage pour tous et en améliorant l'efficacité de l'apprentissage pour ceux qui en ont le plus besoin. D'autre part, en l'absence d'un accès généralisé et équitable aux technologies intelligentes, les inégalités pourraient également se creuser. Les écarts dans les résultats scolaires pourraient rester inchangés, voire s'accroître dans la mesure où l'impact des technologies intelligentes sur les apprenants ne sera pas le même.

Commençons par les difficultés évoquées ci-dessus. Il existe au moins deux raisons pour lesquelles la technologie peut avoir un effet négatif sur l'équité. La première raison, qui saute aux yeux, concerne l'accès inéquitable aux appareils et aux connexions à Internet : les élèves provenant de milieux socio-économiques défavorisés sont clairement moins bien lotis. Ces élèves peuvent ne pas disposer des appareils, de la connexion ou des ressources

permettant d'accéder aux technologies intelligentes et de les utiliser, que ce soit dans l'établissement qu'ils fréquentent ou à la maison. La deuxième raison a trait aux compétences préalables dont disposent les apprenants. Si l'on part du principe que la technologie (p. ex., celle en lien avec l'apprentissage personnalisé) fonctionne de la même manière pour tout le monde, les élèves qui maîtrisent mieux les nouvelles technologies risquent de conserver leur avantage par rapport à leurs condisciples moins compétents, voire de progresser plus rapidement que ceux-ci. En dépit du soutien apporté aux élèves ayant des compétences préalables moins développées, il est donc possible que la technologie aide davantage les élèves plus avancés. Au bout du compte, les écarts dans les résultats scolaires s'aggraveraient donc au lieu d'être comblés.

Cela étant dit, de nombreuses raisons poussent à croire que les technologies intelligentes peuvent contribuer à renforcer l'équité.

En premier lieu, les technologies éducatives permettent d'élargir l'éventail des possibilités d'acquérir des savoirs. Les plateformes éducatives proposant des ressources pédagogiques ouvertes (Orr, Rimini et van Damme, 2015[17]) ou des cours en ligne ouverts à tous (MOOC) constituent de bons exemples des technologies en question. Elles permettent aux apprenants d'accéder à des ressources pédagogiques d'une qualité généralement supérieure à celle à laquelle ils sont habitués. Même si de nombreuses études ont montré que l'accès à de meilleures ressources n'a pas réduit les inégalités sur une grande échelle, car le nombre d'utilisateurs reste faible et ceux qui y ont recours sont déjà bien instruits, un examen récent de l'impact sur l'équité donne à croire que ces ressources, notamment les MOOC ou les ressources éducatives libres non anglophones, offrent des perspectives plus enthousiasmantes (Lambert, 2020[18]).

De la même manière, les technologies intelligentes peuvent réduire les inégalités en facilitant l'inclusion des étudiants ayant des besoins spécifiques et en adaptant les ressources pédagogiques à des styles d'apprentissage variés. La technologie a, par exemple, permis de faciliter le diagnostic des difficultés d'apprentissage telles que la dysgraphie, et des solutions numériques de remédiation ont également été développées. Diverses technologies intelligentes permettent également aux étudiants malvoyants ou aveugles, ainsi qu'aux étudiants malentendants ou sourds, d'avoir accès à du matériel d'apprentissage et d'accomplir aisément les tâches demandées à leurs condisciples. L'intelligence artificielle qui permet de convertir la parole en texte (et vice versa) ou les sous-titres automatiques en sont les exemples les plus évidents. Les technologies éducatives traitent également des questions plus difficiles et soutiennent l'apprentissage socioémotionnel (et donc l'apprentissage scolaire ultérieur) des enfants autistes. Elles proposent de plus en plus de moyens d'aider les enfants souffrant de troubles de l'attention et d'hyperactivité (TDAH) afin qu'ils s'autogèrent et puissent mieux profiter de leur scolarité. Il faut cependant nuancer ce propos. En effet, l'inclusion ne vise pas seulement l'adaptation de ces personnes à leur environnement, mais veut aussi dire que la société doit être plus inclusive et ouverte aux différences (Good, 2021[11]). La technologie favorise cette attitude dans la mesure où les élèves ayant des besoins spécifiques ont l'opportunité d'étudier dans un environnement d'apprentissage traditionnel et inclusif, ce qui, à son tour, change la perception d'autrui sur le handicap et les besoins spécifiques de ces élèves.

Deuxièmement, les solutions telles que les systèmes d'alerte précoce sont entièrement axées sur la réduction des inégalités en aidant les apprenants qui risquent de décrocher du lycée ou de l'université à obtenir leur diplôme - les élèves qui décrochent sont généralement issus de milieux défavorisés ou de minorités. Les systèmes d'alerte précoce permettent également de concevoir des interventions appropriées en identifiant les facteurs ou les indicateurs les plus susceptibles d'anticiper le décrochage (Bowers, 2021[19]). L'analyse de l'apprentissage au sein des établissements permet d'évaluer l'implication des élèves ou d'adapter les programmes de cours. Cet outil pourrait aussi avoir des effets positifs s'il était utilisé dans la lutte contre les inégalités (Ifenthaler, 2021[13]).

Troisièmement, l'analyse des données de l'apprentissage, comme en témoigne l'approche personnalisée (que cela soit via un système de tutorat intelligent ou un dispositif qui motive les élèves à apprendre) a la capacité de réduire les inégalités, notamment en aidant les élèves qui ont des connaissances initiales plus rudimentaires à apprendre au bon rythme. L'Encadré 1.3 donne l'exemple d'une solution en ligne qui a réduit les écarts en matière de réussite scolaire au départ entre les élèves les plus forts et les plus faibles en mathématiques. Il existe, cependant, peu d'éléments probants selon lesquels l'apprentissage adaptatif réduise de manière généralisée les écarts de résultats entre élèves. L'analyse des données recueillies en classe peut également fournir des informations aux enseignants sur la manière dont ils peuvent améliorer leurs pratiques pédagogiques, en particulier sur la manière et le moment d'accorder plus d'attention aux différents groupes d'élèves de leur classe, en fonction de leur niveau scolaire, de leur sexe, de leur origine ethnique, etc. Les technologies utilisées dans l'apprentissage adaptatif peuvent aussi

aider les élèves à s'exercer et à progresser à la maison grâce à des systèmes de tutorat intelligents. Cet outil peut s'avérer particulièrement bénéfique pour les élèves issus de foyers où les parents ne sont pas en mesure de soutenir leurs enfants efficacement dans le travail scolaire, que cela soit de manière directe ou indirecte.

Encadré 1.3 La personnalisation des devoirs de mathématiques peut contribuer à réduire l'écart de résultats : une étude réalisée aux États-Unis

Peu d'études ont démontré que la technologie adaptative (ou l'apprentissage personnalisé) peut réduire les écarts en termes de réussite scolaire entre les élèves ayant plus ou moins de connaissances scolaires initiales. Et pourtant, pour que les systèmes de tutorat intelligents réduisent les écarts de résultats, il faudrait démontrer l'efficacité de la technologie adaptative en la matière. Sur la base d'un essai contrôlé randomisé, une expérience menée dans l'État du Maine (États-Unis) a montré que cela pourrait être le cas (Murphy et al., 2020[20]). Dans le cadre de l'expérience, on a demandé aux enseignants d'utiliser le logiciel 'ASSISTments' pour donner à leurs élèves des devoirs de mathématiques. Le système fournit un retour d'information aux élèves lorsqu'ils résolvent des problèmes de mathématiques et communique automatiquement des rapports aux enseignants sur les résultats des élèves à leurs devoirs quotidiens. Les enseignants participant à l'étude avaient reçu au préalable une formation et un accompagnement en matière d'évaluation formative. L'étude a révélé que les élèves des établissements qui ont bénéficié du programme ASSISTments ont appris davantage que leurs camarades des établissements témoins, avec des effets de grande ampleur, et que l'impact était plus important pour les élèves ayant des résultats antérieurs plus faibles en mathématiques. Cette étude confirme les résultats initiaux de Roschelle et al. (2016[21]), qui ont démontré que l'utilisation de la plateforme avait permis d'obtenir de bons résultats en mathématiques et aussi de réduire l'écart des scores.

Efficacité

Dans la plupart des secteurs autres que l'éducation, les technologies intelligentes sont utilisées pour améliorer le rapport coût-efficacité des opérations, notamment en automatisant un certain nombre de tâches et de processus, ce qui rend les services plus rapides et souvent moins chers (OECD, 2019[16]). Même si l'éducation peut sembler à la traîne par rapport à d'autres secteurs à cet égard, la numérisation rend également de nombreux processus éducatifs plus efficaces dans la mesure où les interactions entre les parties prenantes et les établissements sont de plus en plus automatisées. Comme indiqué ci-dessus, un certain degré d'automatisation gagne du terrain dans le domaine de l'enseignement et de l'apprentissage. La question est de savoir dans quelle mesure la numérisation permettra d'améliorer le rapport coût-efficacité et la productivité dans l'éducation.

Toute discussion sur le rapport coût-efficacité doit tenir compte des coûts d'investissement et de maintenance, qui doivent être mis en rapport avec les coûts des dispositifs actuels. Dans le passé, le coût des technologies numériques a parfois été sous-évalué, car au-delà des investissements initiaux, on a négligé les coûts liés à la maintenance, la mise à jour, etc.

Néanmoins, de nombreuses raisons portent à croire que les technologies intelligentes sont susceptibles d'améliorer le rapport coût-efficacité dans les systèmes d'éducation.

Les procédures de candidature et d'admission dans les établissements en sont un exemple concret. Elles se font de plus en plus via des plateformes numériques, notamment dans l'enseignement supérieur, où un processus de « mise en correspondance » (ou de sélection) est souvent de mise. Dans le cas des établissements à admission ouverte (où aucune sélection n'est requise), la mise en œuvre de processus automatisés transparents est encore plus facile. On estime que le déploiement du système national d'information sur l'éducation en Corée, système d'administration en ligne qui permet, entre autres choses, le transfert numérique des dossiers scolaires des étudiants d'un établissement à l'autre (ainsi que du lycée à l'université), a permis d'économiser 237 millions USD en 2010 (KERIS, 2010[22]).

La technologie de la blockchain pourrait aussi réduire certains coûts en facilitant la vérification de l'authenticité des diplômes et autres titres de compétences. Le développement progressif d'un cadre de référence pour les titres et diplômes sous format numérique et l'adoption de normes ouvertes permettront petit à petit de délivrer et de certifier autrement les diplômes, les individus pouvant gérer eux-mêmes leurs titres/qualifications. Parmi les différentes solutions numériques évoquées dans cet ouvrage, il s'agit vraisemblablement de celle qui permettra de réduire les coûts le plus rapidement et efficacement.

La collecte d'informations statistiques au niveau des systèmes est le troisième domaine où la réduction des coûts est manifeste. Alors que les données statistiques reposaient souvent sur la mise en place de panels statistiques (d'échantillons représentatifs d'individus ou d'institutions) et impliquaient souvent des traitements multiples des mêmes données, l'utilisation de données administratives combinée à l'interopérabilité de divers systèmes a permis d'obtenir beaucoup plus facilement des informations statistiques en provenance des services opérationnels en quasi-temps réel (González-Sancho et Vincent-Lancrin, 2016[23] ; s.d.[24]).

En fin de compte, une analyse coûts-avantages comparant les avantages de la technologie intelligente, y compris les avantages non financiers mentionnés ci dessus, à ceux d'une solution existante, permettra de déterminer dans quelle mesure la technologie intelligente est rentable pour un service ou un objectif éducatif déterminé.

Recommandations politiques

Les technologies ou solutions éducatives intelligentes alimentées par l'intelligence artificielle, l'analyse des données de l'apprentissage, les algorithmes et d'autres technologies encore présentent de nombreuses opportunités. Dans le même temps, elles soulèvent un certain nombre de questions de nature politique. Comment les gouvernements peuvent-ils exploiter au mieux les avantages de la technologie dans l'éducation tout en limitant ses risques éventuels ? Cette démarche requiert une bonne compréhension des opportunités et des risques, tant d'un point de vue technique que politique. Un facteur de réussite dépend du bon vouloir de la société à l'égard de ces technologies intelligentes. Cette section présente les principaux enseignements de cet ouvrage dans une perspective politique et met en évidence certaines caractéristiques clés des technologies intelligentes qui sont à prendre en compte lors de l'élaboration de mesures politiques et du déploiement efficace des technologies intelligentes dans l'éducation.

Les technologies intelligentes dans leur dimension sociotechnique

Qu'elles soient déjà disponibles ou en cours de développement, la plupart des technologies éducatives intelligentes abordées dans cet ouvrage ne visent pas à remplacer les enseignants ou les êtres humains. Ces outils ont en fait été développés avec le modèle éducatif actuel en toile de fond. Toutes les analyses présentées dans cet ouvrage ont un point commun : la plupart des solutions d'enseignement et d'apprentissage sont conçues comme des systèmes hybrides être humain-IA et nécessitent des interactions entre l'enseignant et l'élève ainsi qu'une supervision humaine de la machine à différents moments. Molenaar (2021[8]) propose un modèle permettant de mieux comprendre le continuum entre l'enseignement réservé aux enseignants et l'enseignement entièrement automatisé. En règle générale, les solutions de personnalisation avancées nécessitent l'intervention de l'enseignant ou l'avertissent lorsqu'il doit intervenir, par exemple parce que les élèves ont encore des difficultés ou qu'ils doivent passer à une autre étape de leur processus d'apprentissage. La plupart des solutions de soutien à l'orchestration de la classe sont également des solutions hybrides qui ne font qu'accompagner les enseignants dans la mise en œuvre de scénarios d'apprentissage intéressants pour leurs élèves. Tel que le formule Dillenbourg (2021[12]), « il y a un enseignant dans la boucle » et l'analyse des données de la classe est conçue pour aider les enseignants à organiser l'enseignement et l'apprentissage et à leur fournir efficacement des scénarios d'apprentissage intéressants - et non à les remplacer.

Contrairement à la façon dont les robots sont souvent présentés dans d'autres domaines, les robots sociaux de Belpaeme et Tanaka (2021[10]) ne sont pas non plus destinés à remplacer les enseignants, mais à soutenir les élèves dans leurs tâches d'apprentissage spécifiques, dans le même esprit que les outils de personnalisation. Cela étant dit, cette perspective ne peut pas être écartée dans un futur lointain. Aujourd'hui, les robots sociaux sont surtout efficaces pour accomplir des tâches bien délimitées. Ils ont un rôle d'assistant pédagogique, tout comme le font les ordinateurs à leur manière. Quant aux robots de téléprésence, ils permettent aux enseignants humains d'être présents à distance. Good (2021[11]) illustre parfaitement comment les technologies intelligentes destinées aux élèves ayant des besoins spécifiques peuvent en fait créer de nouvelles relations sociales entre les apprenants et les enseignants - plutôt que de les faire disparaître.

Au niveau des systèmes et des organisations, l'utilisation des technologies intelligentes suit la même logique. Les systèmes d'alerte précoce aident à prévoir le décrochage scolaire, mais ils nécessitent une intervention humaine pour que les étudiants « à risque » ne décrochent pas (Bowers, 2021[19]). D'autres types d'analyses des données de l'apprentissage utilisés dans les établissements d'enseignement pour soutenir la prise de décision fournissent également des informations auxquelles il faut se fier ; ils ne prennent pas de décisions finales à la place des responsables scolaires ou des enseignants (Ifenthaler, 2021[13]).

Le constat ci-dessus ne veut pas dire que les technologies intelligentes ne prennent jamais de décisions ou ne sont pas conçues pour une automatisation complète. Les systèmes de personnalisation, les analyses des données de la classe et les systèmes d'alerte précoce prennent tous des décisions pour mettre en œuvre l'étape suivante ou en recommander une aux êtres humains. En fait, ces systèmes alimentent généralement la prise de décisions. Les évaluations standardisées basées sur le jeu font plus que fournir une suggestion : elles notent automatiquement les personnes testées et évaluent leurs compétences - comme c'est déjà le cas avec les évaluations standardisées traditionnelles qui sont informatisées. La technologie blockchain ne prend pas de décisions, elle ne fait qu'enregistrer de manière fiable ce qu'une variété d'acteurs (généralement) humains ont fait, en s'appuyant sur différents processus sociaux : accréditation des institutions, attribution d'un diplôme ou d'un titre, stockage du titre sur une blockchain, partage du titre avec d'autres parties, vérification de l'authenticité du titre, etc. (Smolenski, 2021[25]). Dans les deux cas, il en ressort que les technologies intelligentes sont des systèmes sociotechniques, c'est-à-dire des systèmes dont les caractéristiques sociales et techniques interagissent et sont conçues en parallèle.

L'un des défis des évaluations standardisées basées sur le jeu sera de susciter l'acceptation sociale, voire la confiance totale, comme ce fut le cas pour les évaluations standardisées traditionnelles. Buckley et al. (2021[14]) relèvent que la mise au point d'évaluations basées sur le jeu qui sont valides, fiables et équitables est considérablement plus complexe et difficile que la conception de tests standardisés traditionnels. La blockchain est certes une solution technologique efficace, mais son utilisation à grande échelle pour la délivrance de titres de compétences représente une évolution sociale et nécessitera des adaptations juridiques. Des procédures existent déjà pour certifier/valider les diplômes et il n'est pas certain que tout le monde soit disposé à modifier ces habitudes - ou à faire face aux incertitudes qui pèsent sur un nouveau modus operandi.

Il y a différentes approches pour faire comprendre que la plupart des technologies intelligentes sont des systèmes hybrides être humain-IA, ou de manière plus large, que ces technologies doivent être appréhendées comme des systèmes sociotechniques. L'une d'entre elles consiste à communiquer clairement que si la technologie est appelée à jouer un rôle plus important à l'avenir, elle doit actuellement être accompagnée et contrôlée par des actions humaines dans la plupart des cas. Les moyens de prendre acte de ces réalités actuelles seraient les suivants :

- L'implication des enseignants, apprenants et autres utilisateurs finaux en tant que co-concepteurs dans le processus de recherche et de développement garantirait l'utilité et l'utilisation des solutions numériques intelligentes. Cette approche aiderait également les personnes concernées à comprendre et à façonner le contexte social dans lequel les technologies éducatives intelligentes seraient le mieux utilisées (en classe, à la maison, etc.). Cet objectif doit être poursuivi même lorsqu'il est parfois compliqué d'impliquer les utilisateurs finaux, par exemple les élèves ayant des besoins spécifiques.
- Les partenariats public-privé, entre les pouvoirs publics, les chercheurs en technologie dans les universités et l'industrie des technologies de l'éducation, devraient être la pierre angulaire des projets de recherche et de développement dans ce domaine. Ces projets de collaboration ne devraient pas s'arrêter aux fonctionnalités mêmes des solutions technologiques. Ils devraient aussi se pencher sur la manière dont ces technologies sont utilisées dans les faits et appréhender les ajustements sociaux et juridiques que leur utilisation à grande échelle sous-tend.

La précision des algorithmes

Les technologies intelligentes ont très rapidement progressé, et cet ouvrage illustre leurs avantages potentiels dans un large éventail de domaines éducatifs, tant en termes d'enseignement et d'apprentissage que d'efficacité administrative. Les technologies intelligentes sont souvent plus performantes que les analyses de données et les technologies traditionnelles grâce à des algorithmes plus puissants. Les évaluations basées sur le jeu permettent d'évaluer des compétences difficiles à mesurer au moyen de tests traditionnels sur ordinateur ou support papier. L'approche personnalisée s'adapte aux caractéristiques de l'apprenant bien mieux que les méthodes de

personnalisation préexistantes - et cette approche est peut-être tout aussi efficace que la méthode traditionnelle faisant appel aux enseignants humains. Les nouveaux algorithmes des systèmes d'alerte précoce ont un meilleur pouvoir prédictif que les régressions statistiques traditionnelles. Ils permettent de distinguer, par exemple, des modèles de décrochage scolaire qui échappaient aux responsables scolaires ou aux enseignants.

Néanmoins, de nombreuses technologies intelligentes présentées dans cet ouvrage ne sont pas encore tout à fait au point. Par exemple, alors que certains systèmes d'alerte précoce offrent désormais un bon pouvoir prédictif, Bowers (2021[19]) explique que la plupart des systèmes d'alerte précoce reposent sur des variables prédictives qui ne sont pas meilleures qu'une hypothèse aléatoire. D'Mello (2021[9]), lui, fait état des nouvelles approches qui ont recours à l'analyse faciale pour mesurer l'implication des élèves dans le processus d'apprentissage. Cependant, il relève aussi la faible fiabilité de nombreux indicateurs utilisés dans ces analyses. Certaines solutions utilisées dans le cadre de l'analyse des données de la salle de classe parviennent à déterminer si les apprenants travaillent individuellement ou en groupe avec un très haut niveau de précision (90 %), mais l'identification du type d'activité pédagogique reste plus difficile à déterminer (67 % de précision). Ce ne sont là que trois exemples, qui sont encourageants en tant que tels, car les niveaux de précision peuvent être très élevés, mais qui montrent que cela n'est pas forcément le cas pour toute application éducative qui repose sur l'IA.

Vu l'évolution actuelle des technologies, il est primordial de veiller à ce que les solutions technologiques qui sont développées exécutent leurs tâches avec précision, ou d'avoir à tout le moins une idée claire du niveau de précision. Malgré les progrès très rapides des technologies intelligentes, les ordinateurs et les technologies éducatives intelligentes restent imparfaits - mais pas nécessairement plus que les humains. Certaines de ces imperfections devraient être rapidement résolues, tandis que d'autres pourraient prendre beaucoup plus de temps. Le contraire serait surprenant quand on sait qu'il s'agit de technologies qui se situent encore à la frontière des technologies éducatives. À vrai dire, on peut même envisager que les technologies intelligentes ne seront jamais parfaitement précises pour certaines tâches et produiront des résultats approximatifs, voire des faux positifs. Toutefois, la vraie question est de savoir comment elles se positionnent par rapport aux performances de l'être humain. Ne perdons pas de vue que l'être humain, quand il est confronté à ces tâches, les effectue avec un certain degré d'imperfection, car les problèmes traités sont généralement complexes. Est-ce que la norme attendue doit s'apparenter à une précision totale ? La question est posée. Et la réponse sera déterminée par les enjeux sociaux qui sont liés aux différentes tâches. Dans de nombreux cas, un diagnostic ou une décision « suffisamment précis » devrait faire l'affaire.

Étant donné que les technologies intelligentes ne sont pas encore tout à fait au point et présentent encore certaines limites intrinsèques, il est important que les utilisateurs et les gouvernements restent conscients de ces limites sans empêcher ces technologies de continuer à s'améliorer et à se développer grâce à leur utilisation concrète. Voici quelques pistes d'action possibles pour atténuer les limites des technologies intelligentes tout en tirant parti de leur potentiel :

- Dans la mesure où les technologies éducatives intelligentes peuvent déjà être utiles sans être totalement précises, elles devraient faire preuve d'un certain niveau de précision dans leurs prédictions et diagnostics lorsqu'elles accompagnent la prise de décision - ou être juste assez efficaces lorsqu'elles ont un rôle différent. On pourrait demander aux entreprises de technologie éducative de démontrer le niveau de précision ou d'efficacité de leurs solutions technologiques avec des exigences de précision différentes en fonction des enjeux de la décision pour laquelle elles interviennent. Ces exigences de précision devraient idéalement être comparées aux performances actuelles des enseignants et des responsables scolaires.
- Lorsqu'elles sont encore imparfaites en termes de précision, les technologies éducatives intelligentes devraient simplement guider la réflexion et la prise de décision humaine plutôt que de prendre des décisions entièrement automatisées ou de soutenir un processus de décision qui s'écartera rarement de leurs recommandations, en particulier pour les solutions à enjeu élevé. Ces exigences technologiques devraient reposer sur une politique d'atténuation des risques plutôt que sur une politique sans risque, ce qui revient à accepter le fait que les technologies intelligentes peuvent être bénéfiques même si elles ne sont pas totalement précises. On pourrait imaginer que l'être humain garde le contrôle dans les étapes finales lorsque les enjeux sociaux sont élevés.

Conçues pour être utilisées

Parfois, les solutions technologiques éducatives sont conçues et proposées parce qu'elles sont simplement en mesure de l'être plutôt que parce qu'elles sont utiles et apportent des avantages évidents à leurs utilisateurs. La plupart des produits technologiques éducatifs sont de simples dérivés éducatifs de solutions conçues au

départ pour d'autres domaines. Même lorsque les applications technologiques sont utiles et bénéfiques, certains enseignants, apprenants et utilisateurs peuvent n'avoir aucun intérêt à les utiliser. La non-utilisation des technologies de l'éducation et leur manque d'utilité ont généré des critiques (Cuban, 1986[26] ; Reich, 2020[27]) et cela même si l'utilisation accrue de la technologie dans l'enseignement représente l'un des plus grands changements dans les salles de classe des années 2010 (Vincent-Lancrin et al., 2019[28]).

Comment surmonter ce problème ? Plusieurs chapitres de cet ouvrage traitent de solutions technologiques intelligentes qui ne sont peut-être pas suffisamment utiles pour être exploitées à grande échelle (compte tenu des méthodes de travail habituelles des parties concernées). Une des raisons de ce manque d'utilisation réside dans la conception défaillante des solutions technologiques intelligentes ou dans une compréhension insuffisante de la façon dont les enseignants peuvent les utiliser dans leur pratique professionnelle de manière à les soutenir plutôt qu'à les distraire. Par exemple, les analyses des données de la classe sont utiles lorsqu'elles permettent aux enseignants de voir ce qui est invisible ou difficile à voir (en temps réel ou après la classe) et lorsqu'elles fournissent des informations sur lesquelles les enseignants peuvent agir ou qu'ils peuvent interpréter (Dillenbourg, 2021[12]).

La manière dont les technologies intelligentes présentent les informations à destination des utilisateurs finaux détermine souvent le degré d'utilité pour ceux-ci. L'interface entre les outils technologiques et l'être humain est essentielle. Des travaux de recherche ont montré que différents types de tableaux de bord peuvent être plus ou moins efficaces pour soutenir les enseignants et les apprenants, ou mieux convenir dans certains contextes que d'autres (Molenaar, 2021[8] ; Dillenbourg, 2021[12]). Les tableaux de bord affichent généralement le résultat final des analyses ; celles-ci peuvent se présenter de différentes manières (centralisée, partagée ou contextuelle) et avoir recours à différents dispositifs d'affichage. L'apparence des robots sociaux ne semble pas avoir beaucoup d'importance. En revanche, l'interaction des robots sociaux avec leurs utilisateurs est plus conviviale qu'avec des agents virtuels et facilite leur utilisation par rapport à une image virtuelle ou un ordinateur (Belpaeme et Fumihide, 2021[10]). L'environnement d'apprentissage ECHOES, qui favorise l'exploration et l'apprentissage des compétences en communication sociale chez les enfants autistes, s'avère efficace dans la mesure où les échanges interviennent dans un cadre qui favorise la communication entre l'enfant autiste et l'adulte qui surveille le logiciel et l'environnement d'apprentissage. Cet aspect important est en fait apparu lors de la phase test de l'outil et de son utilisation et n'avait pas été prévu lors de la conception initiale. Cela démontre combien il est important de concevoir et d'adapter les solutions technologiques avec l'aide des utilisateurs finaux (Good, 2021[11]).

Dans certains cas cependant, l'utilité d'une technologie éducative peut s'inscrire dans une perspective plus large que celle d'une solution technique à un problème spécifique. C'est la raison pour laquelle l'utilité et la précision algorithmique ne sont pas toujours liées : une solution reposant sur un algorithme qui accomplit sa tâche avec précision peut ne pas être très utile, alors que des algorithmes effectuant leur tâche de manière imparfaite peuvent, quant à eux, s'avérer utiles. Leur utilité peut provenir du changement d'état d'esprit des parties concernées ou de l'évolution des mentalités au sein des établissements ou des systèmes éducatifs qu'ils génèrent. De manière générale, l'innovation est un moteur de l'apprentissage professionnel et du changement (Avvisati et al., 2013[29] ; Vincent-Lancrin, 2016[30] ; Vincent-Lancrin et al., 2019[28]). Les technologies intelligentes peuvent assurément jouer ce rôle.

Ifenthaler (2021[13]) constate que de nombreuses universités introduisent l'analyse de l'apprentissage à l'échelle des établissements afin de modifier leur culture organisationnelle ou leurs processus, et parfois aussi pour favoriser de nouvelles collaborations et méthodes de travail entre les différentes parties concernées. Apporter une solution à un problème spécifique ou automatiser des processus peut n'être en fait qu'un objectif secondaire. Indépendamment de leur efficacité à réduire le décrochage scolaire, les systèmes d'alerte précoce (et les recherches connexes) ont permis d'avoir une compréhension plus fine et plus large des circonstances qui poussent les élèves à abandonner les études.

Bowers (2021[19]) a établi que dans les faits seuls 38 % des élèves qui abandonnent l'école correspondent aux critères traditionnels utilisés pour détecter les élèves à risque (p. ex., les élèves qui ont de faibles notes n'aiment pas l'école). Autrement dit, l'approche traditionnelle passe à côté de la majorité des élèves qui décrochent effectivement. Outre leur capacité à fournir des informations en temps réel, l'analyse des données de la classe donne un retour aux enseignants sur ce qui s'est passé en salle de classe. Elle favorise la réflexion et l'apprentissage chez les enseignants, et leur permet, on l'espère, d'adapter leur comportement et, in fine, d'améliorer leurs pratiques pédagogiques (Dillenbourg, 2021[12]).

L'aspect extérieur, y compris l'affichage des informations à destination des utilisateurs finaux, n'est pas le seul aspect dont il faut tenir compte quand on aborde la question de l'utilité des solutions technologiques intelligentes. L'analyse coûts-avantages n'est pas à négliger. Si l'on dispose d'autres solutions qui sont moins chères, moins chronophages, moins complexes à utiliser, les solutions technologiques intelligentes resteront peu intéressantes par rapport aux solutions anciennes ou humaines. Cette réflexion se comprend facilement quand il s'agit de solutions technologiques peu précises, mais elle s'applique également aux solutions numériques dont les algorithmes sont précis et efficaces. De nombreux outils numériques qui soutiennent les enseignants et les responsables scolaires les aident à résoudre des problèmes très spécifiques et parfois les solutions existantes peuvent être meilleures que les nouvelles. Par exemple, les évaluations et les simulations basées sur le jeu sont susceptibles de compléter plutôt que de remplacer les évaluations standardisées traditionnelles basées sur des batteries de questions. En effet, elles sont plus coûteuses à concevoir, sont moins facilement généralisables et ne conviennent que pour évaluer des compétences complexes qui sont plus difficiles (ou impossibles) à évaluer par des méthodes traditionnelles moins coûteuses (Buckley et al., 2021[14]). Smolenski (2021[25]) indique que la blockchain peut rendre le processus d'accréditation plus rentable et plus simple pour les individus. Cette technologie est plus efficace lorsqu'il est possible de frauder ou d'établir de faux documents, mais cette solution n'est pas nécessairement appropriée dans toutes les situations.

Un dernier point important reste à évoquer par rapport à l'utilité des solutions technologiques intelligentes. Elles doivent présenter un coût abordable pour les établissements publics et les particuliers. Dans le contexte des systèmes éducatifs, la technologie numérique doit généralement être abordable pour être achetée - et donc être utile et avoir une chance d'être réellement utilisée. Comme l'a relevé Good (2021[11]), dans le cas des élèves ayant des besoins spécifiques, les technologies intelligentes devraient être conçues pour fonctionner sur des plateformes (ou des appareils) peu coûteuses et largement disponibles. Ce n'est pas toujours le cas, mais cela reste l'une des conditions pour qu'elles soient utilisées - et pour que leurs avantages soient largement accessibles. Smolenski (2021[25]) souligne également l'importance des normes ouvertes dans le cas de la blockchain, en partie comme une solution pour faire baisser les coûts à long terme et garantir la pérennité de la solution pour les utilisateurs finaux (institutions et particuliers). Ceci est vrai pour de nombreuses autres technologies : les normes ouvertes permettent une plus grande interopérabilité, une plus grande pérennité, une plus grande concurrence entre les fournisseurs et, souvent, des coûts inférieurs pour les utilisateurs. Les solutions technologiques qui fonctionnent sur des plateformes largement disponibles coûtent moins cher et offrent plus de facilité d'utilisation que les dispositifs spécialisés.

Le renforcement de l'utilité et de l'utilisation des technologies éducatives intelligentes s'articule autour de plusieurs messages clés :

- L'analyse coûts-avantages devrait généralement guider la conception et l'adoption de solutions numériques intelligentes pour différents types de problèmes tout en sachant que les avantages et les coûts ne sont pas uniquement d'ordre pécuniaire.
- En gardant à l'esprit que les avantages d'une solution ne se limitent pas aux gains immédiats en termes d'apprentissage scolaire et que les coûts ne s'expriment pas uniquement en valeur financière, il faut néanmoins identifier et estimer les coûts et les avantages attendus des technologies intelligentes en se basant sur des éléments factuels et tangibles ou sur une bonne théorie d'action (ou théorie du changement).
- L'affichage (ou la communication) des informations fournies par l'analyse des données de l'apprentissage et d'autres technologies est important pour rendre les technologies intelligentes utiles aux apprenants, aux enseignants et aux décideurs. De manière plus générale, la conception de l'interface entre l'homme et l'enseignement intelligent est souvent un aspect essentiel de l'utilisabilité et de l'impact des solutions numériques sur l'apprentissage ou d'autres objectifs ciblés.
- Les solutions technologiques intelligentes doivent être peu coûteuses et fonctionner sur des plateformes/appareils largement disponibles afin de réduire le coût de leur utilisation autant que possible, éventuellement en utilisant des normes ouvertes (et des normes d'interopérabilité). Les pouvoirs publics peuvent apporter leur soutien dans l'élaboration de ces normes, de préférence au niveau international. La question du coût des technologies intelligentes est essentielle. Elles doivent en effet être accessibles à tous afin de ne pas accentuer la fracture numérique. L'équité et l'inclusion seront renforcées si les technologies intelligentes peuvent bénéficier à tous les apprenants et à tous les établissements.

Technologies intelligentes et gouvernance des données : transparence, équité et éthique

Un élément clé de tout système sociotechnique à prendre en compte concerne le contexte social plus large dans lequel le système fonctionne, y compris les valeurs et principes qui s'y rattachent. Dans la mesure où les technologies intelligentes traitent de grandes quantités de données éducatives, y compris, parfois, des données personnelles telles que des marqueurs biologiques, la reconnaissance faciale ou l'expression du visage, etc., ou qu'elles nécessitent une surveillance et un suivi permanents des apprenants, des classes ou des établissements, l'utilisation et le développement de ces technologies suscitent des préoccupations éthiques et politiques en matière de protection des données et de respect de la vie privée. L'amélioration des résultats d'apprentissage pourrait-il justifier l'avènement d'une nouvelle version de « Big Brother » à l'échelle des établissements d'enseignement et des systèmes éducatifs ? Peut-on croire que les gouvernements et les autres parties concernées utiliseront ces informations dans le seul but d'améliorer l'éducation, qu'ils mettront en place des mesures strictes pour protéger les données ? Quelles pourraient être les conséquences négatives si l'utilisation des données n'est pas strictement encadrée, que ce soit dans le présent ou dans le futur ? Les technologies éducatives fondées sur les données pourraient-elles, par exemple, perpétuer, voire renforcer les préjugés et les inégalités ? Pour que les technologies intelligentes soient acceptées, il faut accroître la confiance des individus dans la manière dont elles sont utilisées, fournir des garanties crédibles et renforcer la compréhension des processus mis en œuvre et de leurs résultats.

La plupart des pays de l'OCDE disposent d'un cadre réglementaire solide en matière de protection des données qui garantit que les données personnelles sur l'éducation ne peuvent être partagées avec (ou utilisées par) des tiers en dehors des traitements pour lesquels elles sont collectées, sauf si certaines conditions de confidentialité sont remplies. C'est le cas dans l'Union européenne avec le Règlement général sur la protection des données (RGPD) et aux États-Unis avec le Family Educational Rights and Privacy Act (FERPA), qui ont tous deux influencé de nombreuses autres lois sur la protection des données dans d'autres pays. Une grande partie de ces données sont des microdonnées administratives (González-Sancho et Vincent-Lancrin, 2016[23] ; s.d.[24]). Le régime de protection des données s'applique également aux prestataires qui fournissent des solutions technologiques aux établissements et aux institutions du monde de l'éducation. Toutefois, il convient de noter que l'application et la mise en œuvre des réglementations en matière de protection des données peuvent varier d'un pays à l'autre (ou même d'un endroit à l'autre au sein d'un même pays). Les garde-fous évoqués ci-dessus sont certes solides et efficaces, mais il n'en demeure pas moins que la vivacité du débat public concernant la protection des données et le respect de la vie privée peut refléter un manque de confiance dans la manière dont les données sont utilisées (ou pourraient être utilisées) au sein du système éducatif.

La protection des données n'est toutefois qu'un aspect de la gouvernance des données. Une question importante concerne la relation entre les gouvernements, les personnes concernées par les données (qui sont généralement les utilisateurs de services éducatifs) et le secteur privé qui développe généralement les technologies éducatives intelligentes. La propriété des données et la réalité de la concurrence dans le monde numérique sont des sujets sensibles. Comment les données administratives et autres données relatives à l'éducation doivent-elles être partagées entre les entreprises de technologies éducatives et les chercheurs d'institutions publiques pour permettre les avancées et favoriser une concurrence suffisante dans le secteur des technologies éducatives intelligentes ? Comment préserver au mieux les intérêts des apprenants et des autres individus concernés dans un contexte concurrentiel ? Les différentes solutions proposées pour d'autres secteurs que l'éducation pourraient probablement être adaptées à l'éducation (OECD, 2019[31] ; 2019[1]).

Les discussions éthiques doivent normalement porter sur ce qui ne fait pas l'objet de réglementations à l'échelle nationale et donc sur des aspects pour lesquels les individus et les autorités ont une plus grande liberté d'action. C'est ainsi que nous appréhendons la question éthique dans le domaine de l'IA éducative.

Le cadre réglementaire qui s'applique aux algorithmes est en règle générale moins strict que celui qui concerne la protection des données. Les algorithmes pourraient être biaisés et avoir un impact social indésirable pour certains groupes (en fonction du sexe, de l'origine ethnique, du statut socio-économique, etc.), mais ils pourraient aussi être défectueux ou simplement renforcer les biais humains du passé plutôt que de refléter les valeurs sociétales actuelles. On exige des algorithmes qu'ils soient transparents et ouverts. Il faut veiller à ce que leurs « décisions » puissent être expliquées et aussi contestées lorsqu'elles sont automatisées. Dans le cas du règlement général sur la protection des données de l'UE, la terminologie réglementaire concernant les algorithmes est

ambiguë (articles 13-15, 22 et considérant 73) et les juristes débattent toujours de ce que ces articles impliquent en termes de « droit à l'explication » (transparence) et de possibilité pour les citoyens de refuser ou de contester les « décisions automatisées ». Au sein de l'Union européenne, seuls le droit français et le droit hongrois disposent de textes explicites sur le « droit à l'explication » (la loi française exigeant une explication à la fois ex ante et ex post de manière intelligible, et la loi hongroise demandant un certain niveau d'explication) (Malgieri, 2019[32]). Aux États-Unis, il n'existe pas de réglementation sur les algorithmes et leurs exigences dans le cadre de la FERPA (ou d'une autre réglementation). En 2021, la plupart des pays de l'OCDE n'ont pas de dispositions réglementaires claires en la matière.

Dans la mesure où les algorithmes basés sur l'apprentissage automatique sont entraînés avec des données historiques, de nombreux observateurs craignent qu'ils ne reproduisent des pratiques (humaines) biaisées du passé, comme cela a apparemment été le cas dans certains pays dans des domaines autres que l'éducation (finance, justice, etc.) (O'Neil, 2016[33]). Plusieurs directives ont été élaborées pour éviter ces écueils, qui peuvent survenir à différentes étapes du processus : la mesure (collecte de données ou échantillonnage), l'apprentissage de modèles (lorsque l'apprentissage automatique est impliqué) et l'action (lorsque les algorithmes détectent, diagnostiquent et fournissent des résultats, p. ex.). L'équité peut aussi être mesurée de différentes manières, ce qui rend la problématique encore plus complexe (Kizilcec et Lee, 2020[34] ; Baker et Hawn, 2021[35]). Ifenthaler (2021[13]) mentionne plusieurs listes de contrôle de bonnes pratiques et d'éthique dans le domaine de l'analyse de l'apprentissage. Bowers (2021[19]) évoque le mouvement des « algorithmes ouverts » dans le domaine des systèmes d'alerte précoce et notamment deux séries de critères qui se recoupent pour garantir la transparence, la vérification et la reproductibilité des algorithmes. Ils doivent être précis, accessibles, exploitables et redevables, d'une part (ces critères sont connus comme étant les « 4 A » en anglais, pour *accurate, accessible, actionable* and *accountable*) et repérables, accessibles, interopérables et reproduisibles, d'autre part (ces critères sont connus sous l'acronyme anglais *FAIR*, pour *findable, accessible, interoperable* and *reproductible*). Molenaar (2021[8]) souligne également l'importance de la transparence pour régir l'analyse de l'apprentissage et les algorithmes. En 2019, les procédures d'admission à l'université basées sur les technologies intelligentes ont montré leurs limites (Encadré 1.3). Quand il est question de décisions automatisées à fort enjeu, la transparence consiste également à initier un premier dialogue sur les critères, les résultats sociaux attendus, la pertinence et l'acceptabilité des algorithmes intelligents avec diverses parties prenantes, des experts aux utilisateurs finaux et autres organismes sociaux. Dans certains cas, il est préférable que les algorithmes soient codés par des êtres humains plutôt que par des techniques d'IA.

Par exemple, dans la mesure où les variables prédictives précises des systèmes d'alerte précoce ne peuvent s'appuyer que sur des informations minimales qui ne comprennent pas de renseignements sur le sexe, la race et le statut socio-économique (Bowers, 2021[19]), on pourrait considérer qu'il n'est pas éthique (ou même nécessaire) d'inclure ces types d'indicateurs pour diagnostiquer le décrochage scolaire dans les systèmes d'alerte précoce, à moins qu'ils n'améliorent considérablement la performance des algorithmes. Il faut relever, par ailleurs, que les résultats qui n'incluent pas d'informations personnelles sur les apprenants peuvent quand même conduire à des résultats biaisés ou socialement/politiquement indésirables. Dans une perspective éthique, les effets des technologies intelligentes sur différents groupes doivent donc être discutés et vérifiés. Il faut également veiller à ce qu'ils soient conformes aux principes sociaux et politiques des pays où les technologies sont utilisées. Étant donné que peu de personnes sont, en pratique, en mesure de vérifier les effets et les impacts des algorithmes, certains groupes indépendants de parties prenantes peuvent être chargés de cette tâche. Certes, tout le monde devrait être autorisé à mener ces contrôles dans le cadre d'une culture algorithmique ouverte (du moins lorsque les algorithmes conduisent à une décision ou à une quasi-décision), mais les chercheurs en éducation, les organisations non gouvernementales, et éventuellement, des agences gouvernementales indépendantes, pourraient jouer un rôle accru dans ce domaine.

Dans le cas des applications les plus avancées de l'analyse de l'apprentissage reposant sur un suivi continu des individus (p. ex., la motivation, l'autorégulation, l'orchestration de la classe, les évaluations basées sur le jeu), il faut aussi se demander si les parties prenantes se sentent à l'aise avec certains aspects des applications, même si elles sont légales. Si le suivi et la collecte de données nécessaires pour alimenter les analyses d'apprentissage axées sur l'implication des élèves, l'autorégulation ou la gestion de la classe doivent être conformes aux réglementations nationales en matière de protection des données (et à la réglementation des algorithmes, le cas échéant), la question est de savoir comment les rendre compatibles avec les valeurs politiques du pays où elles sont mises en œuvre. Dans ce cas-là, il faut vraisemblablement faire preuve d'un peu d'imagination pour adapter les dispositions

en termes de protection des données (comme la suppression immédiate des données une fois traitées). Autrement dit, cela peut vouloir dire qu'une forme de débat social qui inclut les parties concernées est nécessaire ; un débat qui concerne la transparence de la collecte des données et de leur utilisation. Il ne s'agit pas juste d'une question réglementaire ou éthique. Au sein d'un même pays, ce qui peut être acceptable dans certaines communautés peut ne pas l'être dans d'autres, en fonction de la manière dont les technologies intelligentes ont été présentées et mises en œuvre (Encadré 1.5).

Encadré 1.4 Deux exemples concrets de controverses concernant les notes de fin d'année durant la pandémie de COVID-19

Au cours de l'été 2020, l'Organisation du Baccalauréat International (IBO) et l'Office of Qualifications and Examinations Regulation (Ofqual) en Angleterre ont été confrontés à de sérieux problèmes liés à l'utilisation d'algorithmes. Les examens de fin d'études secondaires (A level anglais et baccalauréat international) ont été annulés en raison des mesures de confinement et des fermetures d'établissements pour enrayer la pandémie de COVID-19. Les résultats de ces examens servent à attribuer les places au sein des universités et il a donc fallu trouver un autre moyen pour donner des notes aux élèves.

L'IBO et l'Ofqual ont mis au point des algorithmes pour standardiser les notes sur la base de données provenant des évaluations des enseignants, des performances antérieures et de divers autres facteurs. Dans le cas de l'IBO, on a eu recours à des données provenant des sessions d'examens précédentes ainsi qu'à des données scolaires individuelles. En ce qui concerne les A levels, les enseignants ont dû fournir une note basée sur leur propre estimation correspondant à celle que les élèves auraient vraisemblablement obtenue si les cours avaient été dispensés normalement au lieu d'être perturbés par le COVID-19. On a également demandé aux enseignants de classer les élèves par ordre croissant en fonction des notes individuelles ainsi obtenues. Lorsque les notes basées sur l'estimation des enseignants ont été prises en compte, l'Ofqual a constaté que leur effet composé était susceptible d'entraîner une hausse allant jusqu'à 13 % des points pour certaines notes par rapport à 2019. Un modèle de normalisation statistique a donc été développé et testé pour produire des notes basées sur les performances historiques de l'établissement dans des matières particulières, ainsi que pour prendre en compte des facteurs tels que l'évolution des performances antérieures des candidats, les notes basées sur l'estimation des enseignants et les classements, et la taille de la cohorte (Ofqual, 2020[36]).

Dans le cas des A levels et de l'IBO, ce processus de normalisation a entraîné des différences substantielles entre les notes prévues et les notes effectivement attribuées, ce qui signifie que l'offre de places dans les universités pouvait être remise en cause, en particulier lorsqu'elles étaient conditionnées à l'obtention d'une note particulière par les étudiants. Lorsque les résultats du A level ont été communiqués aux étudiants en Angleterre le 13 août 2020, les médias ont indiqué qu'environ 40 % des résultats étaient inférieurs aux prévisions des enseignants, ce qui signifie que de nombreux étudiants n'ont pas satisfait aux exigences de sélection dans les universités de leur premier ou deuxième choix (BBC, 2020[37]). D'après certains observateurs, les élèves très performants scolarisés dans des établissements connus pour leurs résultats inférieurs à la moyenne, souvent situés dans des zones défavorisées, avaient été particulièrement touchés, car l'algorithme avait utilisé la moyenne des performances antérieures de ces établissements pour éviter une estimation trop élevée des notes. Cette situation a donné lieu à des pétitions, notamment de la part d'associations scientifiques telles que la Royal Statistical Society britannique, à des protestations et à des articles de presse dénonçant un manque de transparence concernant les algorithmes, les modèles et les processus utilisés. Qui plus est, le désavantage subi par ces élèves s'était aggravé en raison des effets négatifs de la pandémie et du confinement (p. ex. Studemann, 2020[38] ; Adams et McIntyre, 2020[39]).

À la mi-août 2020, il a été annoncé que les résultats du A level et du Baccalauréat International seraient ajustés pour refléter les estimations des enseignants plutôt que les résultats produits par les algorithmes, garantissant dans les deux cas que les élèves recevraient la note la plus élevée obtenue via les deux méthodes.

Ces exemples illustrent le caractère sociotechnique des technologies intelligentes et la nécessité pour les autorités d'engager un dialogue politique avec les parties concernées afin de rendre les résultats des technologies

intelligentes socialement acceptables. Dans les deux cas, personne n'a contesté la précision des algorithmes qui ont produit des résultats conformes à la programmation initiale. Les critiques portaient plutôt sur les paramètres utilisés pour prévoir ou ajuster les notes, la perception sociale des résultats obtenus grâce aux algorithmes (plus spécifiquement pour certaines sous-populations d'élèves) et aussi le manque de transparence du processus dans son ensemble. Les examens et l'attribution des notes sont des traditions sociales qui se sont développées au fil des décennies et des siècles pour devenir acceptables et faire partie du concept de « méritocratie » (Sandel, 2020[40]). L'acceptation sociale par rapport à l'utilisation des technologies intelligentes représente un des défis majeurs dans les années à venir. C'est d'autant plus vrai lorsque l'utilisation d'algorithmes concerne des décisions à enjeu élevé, comme dans les deux évoqués ci-dessus.

Encadré 1.5 Deux exemples de controverses liées à l'acceptation sociale des technologies intelligentes dans les établissements scolaires

Mesurer et surveiller l'attention, le comportement ou les émotions des élèves en classe peut aider les enseignants à les maintenir motivés dans leur apprentissage. Cela étant dit, la protection de la vie privée et la collaboration avec les parents et les autres parties concernées sont des facteurs clés de succès. Deux exemples en Chine montrent l'importance de l'acceptation sociale, de la collaboration avec les parties prenantes et de la transparence dans le déploiement de ces technologies.

En 2019, l'école primaire de Jinhua Xiaoshun (province du Zhejiang, Chine) a testé le casque FocusEDU. En combinaison avec une plateforme informatique, ces casques de suivi des ondes cérébrales utilisaient la technologie de l'électroencéphalographie (EEG) pour mesurer le degré d'attention des élèves en classe. Trois électrodes en hydrogel - une sur le front et deux derrière les oreilles - détectent les signaux électriques du cerveau qu'un algorithme d'IA convertit ensuite en un score d'attention. Le logiciel FocusEDU a permis aux enseignants d'obtenir en temps réel le degré d'attention de chaque élève dans la classe grâce à un tableau de bord. En outre, des lumières sur l'avant du casque affichaient différentes couleurs en fonction du degré d'attention, ce qui permettait aux enseignants d'identifier les élèves inattentifs. Les autorités locales ont suspendu l'essai en octobre 2019 en raison de problèmes de confidentialité.

Un autre projet de surveillance des élèves en fonction de leur comportement et de leurs émotions a été mené à la *Middle School* n° 11 de Hangzhou (province du Zhejiang, Chine). Hikvision, un fabricant d'équipements de vidéosurveillance basé à Hangzhou, a mis au point des caméras équipées de la technologie de reconnaissance faciale. Dans ce système intelligent de gestion du comportement, les caméras surveillent le comportement et les expressions faciales des élèves en classe. Un algorithme d'IA répertorie six comportements différents (lire, écrire, écouter, se lever et s'allonger sur le bureau) et distingue sept expressions faciales (neutre, heureux, triste, déçu, fâché, apeuré et surpris). Un score global d'attention est calculé à partir de ces classifications. Ces informations sont communiquées aux enseignants en temps réel sur un écran. Suite aux inquiétudes exprimées par certains parents, l'utilisation de la technologie d'évaluation des expressions faciales a été interrompue en mai 2018. Depuis lors, l'école n° 11 de Hangzhou utilise principalement les caméras de reconnaissance faciale pour contrôler les présences et les paiements effectués sur le campus.

Ces deux exemples indiquent que le recours aux technologies intelligentes à des fins de surveillance des individus ne va pas sans problème. D'un point de vue scientifique, un des problèmes majeurs concerne la qualité des modèles théoriques qui sont utilisés pour identifier les émotions et mettre celles-ci en lien avec les résultats d'apprentissage. (À notre connaissance, aucun travail de recherche n'a été publié sur ces projets pilotes et les modèles théoriques qui mesurent la motivation des élèves). Dans la mesure où les solutions technologiques proposées ne sont pas si différentes de celles utilisées dans d'autres établissements scolaires chinois (voir l'Encadré 1.1), il faut souligner plutôt les problèmes liés à l'acceptation et la communication à l'échelle locale, qui ont également leur importance lorsque la réglementation sur la protection de la vie privée et des données n'est pas aussi stricte que dans certains pays de l'OCDE.

Source: Focus EDU (Standaert, 2019[41]; Wang, Hong et Tai, 2019[42]); Hikvision (Li et Jourdan, 2018[43]; Yujie, 2019[44]; Lee, 2018[45]).

Une autre question d'ordre pratique et éthique concerne l'utilisation des informations générées par l'analyse des données sur les enseignants et les autres membres du personnel. En général, le personnel d'une organisation ne bénéficie pas de la même réglementation en matière de protection des données et de la vie privée que les élèves ou d'autres personnes. Les technologies intelligentes et l'analyse des données de l'apprentissage ont certes le potentiel de fournir des informations et un soutien aux enseignants et aux autres acteurs de l'éducation pour qu'ils prennent de meilleures décisions et améliorent leurs pratiques professionnelles, mais elles peuvent également être utilisées contre eux et entraîner involontairement des comportements sociaux indésirables. L'analyse des données de la classe peut être utilisée pour surveiller le comportement professionnel des enseignants, et parfois identifier des lacunes dans la façon dont ils organisent l'apprentissage dans leur classe (Dillenbourg, 2021[12]). Les informations récoltées doivent-elles être utilisées pour sanctionner les enseignants ou au contraire leur apporter un véritable soutien ? Une fois que des élèves présentant un risque de décrochage sont détectés, on peut très bien imaginer que leur établissement décide de les écarter, voire de les expulser, ce qui ne fait qu'augmenter la probabilité qu'ils finissent par quitter le système scolaire (Bowers, 2021[19]). Compte tenu de leur caractère potentiellement intrusif en matière de surveillance, l'utilisation des technologies intelligentes ne pourra se développer que si elle s'accompagne d'une confiance dans leur rôle positif et émancipateur. Si leur utilisation sur une base volontaire devait avoir des effets négatifs sur les enseignants, les directeurs d'établissement et les décideurs, elles pourraient apparaître comme moins acceptables et faire l'objet d'une résistance. Pour y remédier dans une perspective éthique, cela pourrait se traduire par une confidentialité totale concernant les résultats ou des explications claires sur les implications potentielles pour le personnel qui utiliserait ces technologies. (Ces arrangements/dispositions pourraient aussi être liés à la précision et l'efficacité des technologies en question). Comme dans le cas des informations fournies par les systèmes d'information longitudinale, deux philosophies différentes sont envisageables. Certains soutiennent que leurs informations devraient être utilisées pour récompenser et sanctionner les parties concernées en vertu d'un mécanisme de responsabilisation, ce qui est également un moyen de les inciter à prêter attention aux informations récoltées. D'autres estiment que les informations ne devraient pas être utilisées pour récompenser ou sanctionner les parties prenantes, car celles-ci pourraient induire une forme d'opposition par rapport à l'utilisation des informations ou les inciter à essayer de « déjouer le système » - et donc à adopter un comportement pas réellement éthique. La question de la meilleure stratégie n'est pas encore tranchée.

Les technologies intelligentes étant des systèmes sociotechniques, leur adoption et leur utilisation nécessiteront généralement un certain niveau de confiance de la part des enseignants, des établissements, des gouvernements et des autres parties prenantes, ainsi qu'une certaine attention à leurs éventuels effets négatifs. Pour instaurer la confiance, il faut s'appuyer sur une forme de réglementation et la mise en œuvre de pratiques éthiques, notamment de mécanismes de gouvernance :

- Une réglementation sur la protection des données et la vie privée, ainsi que des conseils pratiques sur la manière de mettre en œuvre ces dispositions quand différents types de données et différents niveaux de ressources et de compétences sont impliqués ;
- Une réglementation ou de bonnes pratiques sur la gouvernance des données, et notamment une stratégie qui met les données collectées via les technologies intelligentes à la disposition des chercheurs et éventuellement des entreprises concurrentes ;
- Une réglementation ou des directives sur la transparence, l'ouverture et la reproductibilité des algorithmes, ainsi que le financement et la mise en œuvre du processus indépendant qui examine la conception des algorithmes et leurs résultats ;
- La protection des données et le contrôle des algorithmes peuvent se faire dans une optique de gestion des risques : il convient de trouver un équilibre entre la prise de risques et la sensibilité des données (ou de leur utilisation), tout en sachant que des réglementations (ou des recommandations éthiques) trop restrictives en matière de risques entraveront le développement des technologies éducatives intelligentes et empêcheront les bénéficiaires potentiels de profiter de leurs avantages éventuels. Les réglementations évoquées ci-dessus doivent être mises à jour en fonction de la rapide évolution des technologies intelligentes, et une collaboration étroite entre les chercheurs en matière de protection des données et de technologies intelligentes peut contribuer à la conception commune de solutions efficaces.

Infrastructure et bien public

Les technologies intelligentes nécessitent en règle générale une solide infrastructure Internet, informatique et de données. Les systèmes d'intelligence artificielle, les systèmes d'apprentissage adaptatifs qui fournissent des informations en temps réel aux enseignants et aux apprenants, les évaluations basées sur le jeu, la blockchain, les robots sociaux, nécessitent tous un matériel informatique approprié dans les établissements scolaires et les universités (y compris le matériel apporté par les étudiants eux-mêmes), mais aussi chez soi à la maison. À cela s'ajoute une capacité de bande passante et de mise en réseau qui permet d'assurer des vitesses de transfert de données stables et acceptables. Il faut également investir dans du personnel informatique pour assurer la maintenance du matériel dans les établissements d'enseignement. Un bon matériel informatique est une condition de base, mais une infrastructure d'apprentissage numérique a d'autres exigences.

Les décideurs politiques doivent penser à l'infrastructure également en termes de ressources numériques, qu'il s'agisse du contenu et des outils, qui devraient être fournies par les pouvoirs publics aux citoyens, aux étudiants et aux établissements d'enseignement - soit directement ou indirectement par le biais de subventions ou de financement aux établissements. Les contraintes budgétaires peuvent limiter ces initiatives, mais il faut par ailleurs définir ce qui devrait constituer le noyau des ressources numériques destinées à tous, et ce qui devrait en revanche être accessible à titre privé. Une autre question surgit naturellement : dans quelle mesure les technologies intelligentes doivent-elles faire partie de l'infrastructure de base de l'enseignement numérique ? Suffit-il de mettre certaines ressources éducatives à la disposition du public ou doivent elles également être dotées des fonctions d'apprentissage personnalisé que proposent certains systèmes de tutorat intelligent ?

L'infrastructure numérique concerne également les « compétences numériques » des individus, c'est-à-dire leur capacité à utiliser les ressources numériques dans le cadre de leur pratique professionnelle. Dans le cas particulier des enseignants, les compétences numériques consistent moins à maîtriser la technologie elle-même qu'à pouvoir intégrer les outils, ressources et résultats technologiques dans leurs pratiques pédagogiques. Sauf si elles sont entièrement automatisées, les solutions technologiques ne sont en effet que de simples outils pour aider les êtres humains à améliorer l'enseignement, l'apprentissage ou la gestion des systèmes éducatifs. Les possibilités d'apprentissage professionnel pour le personnel, à la fois par le biais de formations et d'opportunités d'apprentissage professionnel continu, constituent donc un dernier aspect qui devrait faire partie intégrante d'une infrastructure numérique solide.

Les chercheurs universitaires et le personnel scientifique des agences technologiques publiques peuvent certes avoir les compétences nécessaires pour développer certaines de ces technologies intelligentes, mais les gouvernements, les établissements et les universités s'en remettront généralement à des entreprises privées de technologie éducative pour que celles-ci mettent au point les solutions technologiques et en assurent la maintenance (si possible dans le cadre de partenariats public-privé, comme indiqué ci-dessus).

Les pouvoirs publics doivent veiller à investir dans leur infrastructure numérique et à garantir des possibilités de connexion pour tous. Ils ont également deux autres responsabilités majeures par rapport au secteur privé :

Beyond this investment in its digital infrastructure and connectivity for all, governments still have two important responsibilities in dealing with the private sector:

- S'assurer, via les politiques de passation de marchés ou d'autres mesures incitatives, que les technologies intelligentes financées ou achetées par les pouvoirs publics sont accessibles aux établissements à des coûts abordables.
- Veiller à ce que certaines techniques ou découvertes clés dans le champ des technologies éducatives intelligentes deviennent ou restent un bien public international et permettent à davantage d'acteurs internationaux de développer de nouvelles solutions interopérables qui contribueront à améliorer l'éducation pour tous dans le monde entier.
- Veiller à ce que les personnels aient la possibilité d'apprendre à utiliser correctement les technologies intelligentes et les ressources numériques mises à leur disposition.

Recherche et développement

Cet ouvrage illustre comment les technologies intelligentes peuvent être utiles au monde de l'éducation. En même temps, les différents chapitres relèvent chacun qu'au stade actuel, nous manquons d'éléments factuels solides qui plaident en faveur de l'utilisation efficace des technologies intelligentes. La précision algorithmique réelle des solutions technologiques doit être étayée et mieux communiquée, mais il faudrait également produire davantage de preuves sur leur utilisation efficace dans des contextes éducatifs réels. Les robots sociaux sont l'un des rares domaines où des méta-analyses et quelques résultats probants ont pu être établis sur une utilisation spécifique de la technologie pour améliorer les résultats d'apprentissage (Belpaeme et Fumihide, 2021[10]).

Bien que la recherche et le développement en matière d'éducation soient nécessaires, de nouvelles approches peuvent être envisagées.

Les décideurs politiques et les soutiens financiers de la recherche doivent rester conscients que la technologie ne doit pas être testée juste pour ce qu'elle est en soi. En fait, la bonne question n'est pas de savoir si une application technologique spécifique est « efficace », mais plutôt d'identifier et de tester si certaines utilisations spécifiques produisent des résultats positifs. En général, lorsqu'il s'agit d'enseignement, la question de recherche portera sur la pédagogie et la façon dont la technologie renforce cette pédagogie plutôt que sur la technologie elle-même. Lorsqu'il s'agit de processus administratifs, la question peut porter sur les actions encouragées ou induites par la technologie intelligente plutôt que sur la technologie elle-même.

Des projets de recherche expérimentale se sont déjà penchés sur certaines applications technologiques spécifiques. Cependant, comme le développement des technologies intelligentes (et de la puissance de calcul) est rapide, les preuves de leur efficacité peuvent être vite dépassées et ne plus être pertinentes au fur et à mesure de l'évolution de la technologie.

Comme pour d'autres technologies numériques, les technologies intelligentes permettent de nouveaux types de recherches rapides lorsqu'elles sont effectuées en ligne, comme la recherche A/B. Cette méthode consiste à essayer deux conceptions différentes (A et B) d'une technologie donnée avec deux groupes différents pour identifier rapidement celle qui fonctionne le mieux (lorsqu'il y a une large utilisation en ligne). Cette approche peut être étendue à la salle de classe pour évaluer l'utilisation efficace de différentes conceptions d'une technologie intelligente donnée ou de l'utilisation de différentes technologies intelligentes poursuivant des objectifs similaires dans une salle de classe ou au niveau du système, en tenant compte des comportements humains complexes qui sont liés à leur utilisation.

Devons-nous attendre des preuves solides avant d'utiliser les technologies intelligentes dans le domaine de l'éducation ? Dans les faits, cette approche peut s'avérer trop restrictive. Exiger des preuves solides avant l'introduction de toute innovation est souvent un moyen de garder en l'état des pratiques dont l'efficacité est rarement prouvée. L'innovation peut être menée de manière rigoureuse aussi, notamment par l'utilisation raisonnable d'éléments factuels qui viennent à l'appui de l'efficacité des solutions technologiques. Dans le cas de certaines technologies intelligentes, les processus d'évaluation habituels peuvent ne pas être les plus appropriés et il peut parfois être difficile de les mettre en œuvre. Il serait, par exemple, difficile d'évaluer l'efficacité des systèmes d'alerte précoce par le biais d'un essai contrôlé randomisé - l'une des raisons étant que les systèmes peuvent être configurés différemment d'un site à l'autre parce qu'ils doivent tenir compte de la situation locale. Les développements technologiques étant tellement rapides, on pourrait très bien imaginer que les résultats des expériences valideront ou invalideront des solutions technologiques qui sont déjà dépassées par des versions ultérieures de la solution (ou tout simplement par de nouvelles technologies). On pourrait évaluer des familles ou des groupes de solutions technologiques qui sont utilisés dans des cas bien précis.

Le niveau des preuves requis pour différents types de solutions devrait probablement être lié à l'impact potentiel ou aux risques découlant d'une solution technologique donnée. Les technologies intelligentes qui s'appuient sur une bonne « théorie de l'action » ou une bonne « théorie sous-jacente » devraient pouvoir être utilisées même sans éléments de preuve solides lorsque leur utilisation a un faible impact. En revanche, lorsque la théorie sous-jacente est lacunaire ou que la théorie d'action n'est pas claire, qu'il n'y a pas d'éléments de preuve, les décideurs politiques et les parties prenantes devraient être plus réticents à autoriser l'utilisation des technologies intelligentes dans un cadre public. Lorsque l'enjeu est potentiellement élevé, il est impératif d'utiliser des critères très élevés sans perdre de vue qu'il faut également comparer l'efficacité des algorithmes à celle des êtres humains lors de l'exécution de tâches similaires.

Pour apporter des réponses concrètes, les pouvoirs publics pourraient :

- Investir dans des travaux de recherche sur l'utilisation de la technologie dans l'éducation dans des contextes réels en mettant l'accent sur la pédagogie ou les processus administratifs plutôt que sur la technologie elle-même ;
- Mettre au point des référentiels nationaux et éventuellement internationaux qui contiennent des éléments probants sur les différents types d'utilisation des technologies dans l'éducation et les différents types de familles de technologies éducatives ;
- Élaborer des normes communes concernant une R-D efficace en matière de technologies éducatives, en gardant à l'esprit que certaines spécificités du domaine ne sont pas à négliger.

Conclusions

Les technologies intelligentes qui pourraient transformer le monde de l'éducation sont déjà disponibles. Certaines sont plus avancées que d'autres, mais toute une série de solutions pourrait modifier le fonctionnement des systèmes éducatifs et des établissements d'enseignement à l'avenir. Certains de ces outils concernent la personnalisation de l'apprentissage (comme les systèmes de tutorat intelligents), la motivation et l'implication des élèves par rapport à l'apprentissage, ou la possibilité pour les élèves ayant des besoins particuliers de profiter pleinement du programme scolaire. La technologie peut également aider les enseignants. Les technologies intelligentes basées sur l'analyse des données de la classe leur permettent d'organiser l'enseignement et l'apprentissage en salle de classe en temps réel et a posteriori, tandis que les robots sociaux peuvent aider les enseignants et agir en tant qu'assistants pédagogiques, instructeurs ou même homologues apprenants. Les technologies ont également fait de grands progrès dans le soutien à la gestion des systèmes éducatifs, avec une multitude de solutions au niveau du système et des établissements pour gérer les budgets, les parcours d'études, les relations avec les parties prenantes externes, etc. Le développement de systèmes d'alerte précoce pour prévenir le décrochage scolaire (ou universitaire) est un bon exemple des progrès réalisés.

Les technologies intelligentes offrent de réelles perspectives pour rendre l'éducation plus efficace. Elles peuvent aider les élèves à obtenir de meilleurs résultats d'apprentissage et les enseignants à mieux enseigner (et aussi à mieux apprendre). Une autre perspective réside dans le renforcement de l'équité : les technologies contribuent à rendre l'éducation plus inclusive et peuvent offrir des possibilités d'apprentissage supplémentaires aux apprenants issus de groupes plus défavorisés, à condition qu'elles soient largement accessibles et utilisées. La numérisation a permis à de nombreux secteurs de la société de tenir compte de l'aspect de la maîtrise des coûts grâce à l'automatisation : c'est aussi le cas progressivement dans l'éducation. Dans le même temps, le développement et la maintenance des technologies peuvent être coûteux, et le coût public doit être évalué en fonction de ses avantages.

Même si aucune de ces perspectives ne se concrétisait, la numérisation pourrait néanmoins ouvrir de nouvelles voies à l'éducation formelle et la rendre plus pratique, plus agréable ou tout simplement… différente et en phase avec la vie moderne. L'innovation est en soi une source d'apprentissage professionnel pour les enseignants, mais aussi pour les apprenants : c'est un moyen de créer de nouvelles capacités au sein d'un système, simplement parce que les individus doivent s'adapter aux nouveaux impératifs qu'elle recèle en son sein (Cohen et Moffitt, 2009[46] ; Vincent-Lancrin, 2016[30]). L'introduction d'outils numériques dans les écoles et les universités ne doit pas être un simple objectif en soi, mais plutôt s'inscrire dans une perspective de changement et d'amélioration. C'est aussi une occasion pour l'éducation formelle d'être en phase avec notre époque numérique. Les écoles et les universités doivent-elles résister à la numérisation ou plutôt embrasser ce phénomène qui gagne du terrain dans toutes les sociétés de l'OCDE, indépendamment de ce qui se passe dans le monde de l'éducation ? Si les systèmes d'éducation formelle doivent permettre à chacun de profiter et d'apprendre de toutes les connaissances et expériences propres à l'humanité, ainsi que d'y avoir accès, l'éducation se doit d'être plus qu'un musée.

Plusieurs scénarios sont envisageables, et plusieurs ont été élaborés : voir (OECD, 2020[47]) pour les scénarios concernant la scolarité et (HolonIQ, 2018[48]) pour les scénarios concernant la numérisation.

Le premier scénario verrait le monde de l'éducation peu évoluer et utiliser dans une faible mesure les technologies et les ressources numériques dans l'enseignement et l'apprentissage. En d'autres termes, cela signifierait que la plupart des technologies intelligentes seraient disponibles à titre privé pour l'apprentissage extrascolaire, pour

ceux qui en ont les moyens. Le marché des technologies de l'éducation continuerait à principalement proposer ses produits au marché de l'éducation informelle et de la formation en entreprise. La question à long terme est alors de savoir si les systèmes éducatifs resteront utiles. Dans ce cas de figure, l'apprentissage extrascolaire pourrait devenir aussi important, voire plus important, que l'apprentissage scolaire.

Un deuxième scénario voudrait que l'éducation ne change pas d'apparence, qu'en surface elle n'évolue pas, mais devienne très différente. À l'image des voitures ou des avions qui ont plus ou moins la même apparence qu'il y a 40 ans, mais sont devenus très différents maintenant qu'ils sont entièrement équipés de capteurs et de dispositifs informatiques. Les établissements d'enseignement peuvent également devenir des bâtiments connectés dotés de caméras, de capteurs et de dispositifs numériques qui permettent aux élèves, aux enseignants et aux responsables scolaires de prendre des décisions pour améliorer les pratiques d'enseignement, d'apprentissage et de gestion. Les technologies peuvent également renforcer l'apprentissage à domicile, en ayant recours à des ressources de tutorat plus intelligentes accessibles à tout un chacun.

Selon un troisième scénario, l'éducation s'appuierait sur les technologies intelligentes et d'autres tendances sociales liées à la numérisation pour se remodeler en tant qu'institution sociale. Il est vraisemblable que les individus travailleront de plus en plus à distance, que davantage de travaux scolaires s'effectueront à la maison, parfois avec une plus grande implication des parents et des communautés locales, et que le temps social passé à l'école sera principalement utilisé pour le tutorat individuel et l'apprentissage collectif. Par exemple, les élèves pourront choisir d'aller à l'école pour réaliser certaines tâches individuellement ou les faire à la maison, tandis que d'autres activités devront être réalisées dans le cadre scolaire avec leurs condisciples et sous l'encadrement des enseignants.

Les deux derniers scénarios auraient des implications pour les enseignants et modifieraient la manière d'enseigner. Ils feraient également évoluer le concept même d'élève et la manière dont les parents accompagnent leurs enfants dans leur scolarité. Des scénarios similaires pourraient s'appliquer à la gestion des systèmes éducatifs et des autres organisations concernées. Ainsi, de nombreux processus administratifs pourraient être entièrement automatisés. Pensons aux évaluations des élèves ou à leur répartition dans les établissements d'enseignement.

Il tombe sous le sens que l'avenir pourrait accoucher de scénarios complètement différents ou d'une combinaison de ceux-ci. Il est grand temps de réfléchir aux différentes possibilités et d'envisager comment les technologies numériques peuvent contribuer à l'amélioration de l'éducation.

Références

Adams, R. et N. McIntyre (2020), *England A-level downgrades hit pupils from disadvantaged areas hardest (The Guardian)*, https://www.theguardian.com/education/2020/aug/13/england-a-level-downgrades-hit-pupils-from-disadvantaged-areas-hardest (consulté le 19 mai 2021). [39]

Avvisati, F., S. Hennessy, R.B. Kozma et S. Vincent-Lancrin (2013), « Review of the Italian Strategy for Digital Schools », *OECD Education Working Paper*, Vol. 90, http://www.oecd.org/education/ceri/Innovation%20Strategy%20Working%20Paper%2090.pdf. [29]

Bailey, T., S. Smith-Jaggars et D. Jenkins (2015), *Redesigning America's Community Colleges: A Clearer Path to Student Success*, Harvard University Press. [15]

Baker, R. et A. Hawn (2021), *Algorithmic Bias in Education*, Center for Open Science, http://dx.doi.org/10.35542/osf.io/pbmvz. [35]

BBC (2020), *A-levels and GCSEs: U-turn as teacher estimates to be used for exam results*, https://www.bbc.com/news/uk-53810655 (consulté le 19 mai 2021). [37]

Belpaeme, T. et T. Fumihide (2021), « Social Robots as Educators », dans *OECD Digital Education Outlook 2021: Pushing the frontiers with AI, blockchain, and robots*, OECD Publishing. [10]

Bowers, A. (2021), « Early Warning systems and indicators of dropping out of upper secondary school: the emerging role of digital technologies », dans *OECD Digital Education Outlook 2021: Pushing the frontiers with AI, blockchain, and robots*, OECD Publishing. [19]

Buckley, J., L. Colosimo, R. Kantar, M. McCall et E. Snow (2021), « Game-based Assessment for Education », dans *OECD Digital Education Outlook 2021: Pushing the frontiers with AI, blockchain, and robots*, OECD Publishing. [14]

Cohen, D. et S. Moffitt (2009), *The ordeal of equality: Did federal regulation fix the schools?*, Harvard University Press, Cambridge, MA. [46]

Cuban, L. (1986), *Teachers and Machines: The Classroom of Technology Since 1920*, Teachers College Press. [26]

D'Mello, S. (2021), « Improving Student Engagement in and with Digital Learning Technologies », dans *OECD Education Outlook 2021: Pushing the frontiers with AI, blockchain, and robots*, OECD Publishing. [9]

Dillenbourg, P. (2021), « Classroom analytics: Zooming out from a pupil to a classroom », dans *OECD Digital Education Outlook 2021: Pushing the frontiers with AI, blockchain, and robots*, OECD Publishing. [12]

González-Sancho, C. et S. Vincent-Lancrin (2016), « Transforming education by using a new generation of information systems », *Policy Futures in Education*, Vol. 14/6, pp. 741-758. [23]

González-Sancho, C. et S. Vincent-Lancrin (s.d.), *Transforming education by using a new generation of information systems.* [24]

Good, J. (2021), « Serving students with special needs better: How digital technology can help », dans *OECD Digital Education Outlook 2021: Pushing the frontiers with AI, blockchain, and robots*, OECD Publishing. [11]

HolonIQ (2018), *Building Scenarios for Education in 2030*, https://www.holoniq.com/2030/building-scenarios-education-in-2030 (consulté le 19 mai 2021). [48]

Ifenthaler, D. (2021), « Learning Analytics for School and System Management », dans *OECD Digital Education Outlook 2021: Pushing the frontiers with AI, blockchain, and robots*, OECD Publishing. [13]

KERIS (2010), « The Future of Education: NEIS (National Education Information System) », *Presentation at OECD/SSRC/Stupski Workshop on Educational Information Systems for Innovation and Improvement*, https://www.oecd.org/education/ceri/46182781.ppt (consulté le 19 mai 2021). [22]

Kizilcec, R. et H. Lee (2020), « Algorithmic Fairness in Education », dans Holmes, W. and K. Porayska-Pomsta (dir. pub.), *Ethics in Artificial Intelligence in Education (forthcoming)*, Taylor & Francis. ArXiv E-Prints, https://arxiv.org/abs/2007.05443. [34]

Lambert, S. (2020), « Do MOOCs contribute to student equity and social inclusion? A systematic review 2014–18 », *Computers & Education*, Vol. 145, pp. 103693, http://dx.doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103693. [18]

Lang, C., G. Siemens, A. Wise et G. Gašević (dir. pub.) (2017), *Handbook of Learning Analytics*, SOLAR, https://solaresearch.org/wp-content/uploads/2017/05/hla17.pdf. [7]

Lee, D. (2018), *Must Reads: At this Chinese school, Big Brother was watching students — and charting every smile or frown (Los Angeles Times)*, https://www.latimes.com/world/la-fg-china-face-surveillance-2018-story.html (consulté le 19 mai 2021). [45]

Li, P. et A. Jourdan (2018), *Sleepy pupils in the picture at high-tech Chinese school (Reuters)*, https://www.reuters.com/article/us-china-surveillance-education/sleepy-pupils-in-the-picture-at-high-tech-chinese-school-idUSKCN1II123 (consulté le 19 mai 2021). [43]

Malgieri, G. (2019), « Automated decision-making in the EU Member States: The right to explanation and other "suitable safeguards" in the national legislations », *Computer Law & Security Review*, Vol. 35/5, pp. 105327, http://dx.doi.org/10.1016/j.clsr.2019.05.002. [32]

Molenaar, I. (2021), « Personalisation of learning: Towards hybrid human-AI learning technologies », dans *OECD Digital Education Outlook 2021: Pushing the frontiers with AI, blockchain, and robots*, OECD Publishing. [8]

Murphy, R., J. Roschelle, M. Feng et C.A. Mason (2020), « Investigating Efficacy, Moderators and Mediators for an Online Mathematics Homework Intervention », *Journal of Research on Educational Effectiveness*, Vol. 13/2, pp. 235-270, http://dx.doi.org/10.1080/19345747.2019.1710885. [20]

O'Neil, C. (2016), *Weapons of Math Destruction: How Big Data Increases Inequality and Threatens Democracy*, Penguin Books. [33]

OECD (2020), *Back to the Future(s) of Education*, OECD, http://dx.doi.org/10.1787/178ef527-en. [47]

OECD (2019), *Artificial Intelligence in Society*, OECD Publishing, Paris, https://dx.doi.org/10.1787/eedfee77-en. [2]

OECD (2019), *Enhancing Access to and Sharing of Data: Reconciling Risks and Benefits for Data Re-use across Societies*, OECD Publishing, Paris, https://dx.doi.org/10.1787/276aaca8-en. [31]

OECD (2019), *Going Digital: Shaping Policies, Improving Lives*, OECD Publishing, Paris, https://dx.doi.org/10.1787/9789264312012-en. [1]

OECD (2019), « Using digital technologies to improve the design and enforcement of public policies », *OECD Digital Economy Papers*, No. 274, OECD Publishing, Paris, https://dx.doi.org/10.1787/99b9ba70-en. [16]

OECD (2018), « IoT measurement and applications », *OECD Digital Economy Papers*, No. 271, OECD Publishing, Paris, https://dx.doi.org/10.1787/35209dbf-en. [6]

OECD (2017), *OECD Blockchain Primer*, https://www.oecd.org/finance/OECD-Blockchain-Primer.pdf. [5]

Ofqual (2020), *Research and analysis: Awarding GCSE, AS & A levels in summer 2020: interim report*, https://www.gov.uk/government/publications/awarding-gcse-as-a-levels-in-summer-2020-interim-report (consulté le 19 mai 2021). [36]

Orr, D., M. Rimini et D. van Damme (2015), *Open Educational Resources: A Catalyst for Innovation*, Educational Research and Innovation, OECD Publishing, Paris, https://dx.doi.org/10.1787/9789264247543-en. [17]

Reich, J. (2020), *Failure to Disrupt: Why Technology Alone Can't Transform Education*, Harvard University Press. [27]

Roschelle, J., M. Feng, R.F. Murphy et C.A. Mason (2016), « Online Mathematics Homework Increases Student Achievement », *AERA Open*, Vol. 2/4, pp. 233285841667396, http://dx.doi.org/10.1177/2332858416673968. [21]

Sandel, M. (2020), *The Tyranny of Merit: What's Become of the Common Good?*, Allen Lane. [40]

Smolenski, N. (2021), « Blockchain for education: a new credentialing ecosystem », dans *OECD Digital Education Outlook 2021: Pushing the frontiers with AI, blockchain, and robots*, OECD Publishing. [25]

Standaert, M. (2019), *Chinese primary school halts trial of device that monitors pupils' brainwaves (The Guardian)*, https://www.theguardian.com/world/2019/nov/01/chinese-primary-school-halts-trial-of-device-that-monitors-pupils-brainwaves (consulté le 19 mai 2021). [41]

Studemann, F. (2020), *A-level results chaos will have lasting impact on class of 2021 (Financial Times)*, https://www.ft.com/content/0e86d8c1-cb47-4965-bef2-6f694352235a (consulté le 19 mai 2021). [38]

van der Vlies, R. (2020), « Digital strategies in education across OECD countries », *OECD Education Working Papers*, Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD), http://dx.doi.org/10.1787/33dd4c26-en. [3]

Vincent-Lancrin, S. (2016), « Innovation, Skills and Adult Learning: two or three things we know about them », *European Journal of Education*, Vol. 51/2, pp. 146-153. [30]

Vincent-Lancrin, S., C. González-Sancho, M. Bouckaert, F. de Luca, M. Fernández-Barrerra, G. Jacotin, J. Urgel et Q. Vidal (2019), *Fostering Students' Creativity and Critical Thinking: What it Means in School*, Educational Research and Innovation, OECD Publishing, Paris, https://dx.doi.org/10.1787/62212c37-en. [4]

Vincent-Lancrin, S., C. González-Sancho, M. Bouckaert, F. de Luca, M. Fernández-Barrerra, G. Jacotin, J. Urgel et Q. Vidal (2019), *Measuring Innovation in Education 2019: What Has Changed in the Classroom?*, Educational Research and Innovation, OECD Publishing, Paris, https://dx.doi.org/10.1787/9789264311671-en. [28]

Wang, J., S. Hong et C. Tai (2019), *China's Efforts to Lead the Way in AI Start in Its Classrooms (The Wall Street Journal)*, https://www.wsj.com/articles/chinas-efforts-to-lead-the-way-in-ai-start-in-its-classrooms-11571958181 (consulté le 19 mai 2021). [42]

Yujie, X. (2019), *Camera Above the Classroom (Sixth tone)*, https://www.sixthtone.com/news/1003759/camera-above-the-classroom (consulté le 19 mai 2021). [44]

2 L'intelligence artificielle dans l'éducation : Rassemblons les pièces du puzzle

Ryan S. Baker
Université de Pennsylvanie (États-Unis)

L'intelligence artificielle a donné naissance à une génération de technologies éducatives qui sont destinées à être utilisées dans les salles de classe et, plus largement, dans les systèmes scolaires. Elles présentent de manière indéniable un potentiel considérable pour faire progresser l'éducation. Ce chapitre donne un aperçu général des technologies actuellement utilisées, de leurs principales applications et de leur potentiel pour l'avenir. Il définit également certains termes clés qui seront utilisés tout au long de cet ouvrage. Il se termine par une discussion sur les perspectives qu'ouvrent ces technologies si on les intègre dans un écosystème, sur l'évolution de la réflexion qui concerne tant l'aide aux apprenants par le biais d'expériences d'apprentissage individuelles que les manières d'influencer plus largement les systèmes, et sur d'autres orientations clés pour la R–D et les politiques éducatives à mener à l'avenir.

Introduction

Pendant des décennies, les professionnels de l'éducation et les chercheurs ont pensé que les ordinateurs avaient la capacité de révolutionner l'éducation. Aujourd'hui, ils ne sont pas encore utilisés de manière révolutionnaire dans ce domaine. En fait, l'apprentissage implique encore en grande partie un instructeur qui enseigne à de nombreux étudiants simultanément. De même, une bonne part de l'apprentissage assisté par ordinateur se fait à l'aide de programmes et de technologies qui reproduisent des pratiques traditionnelles comme les exercices en classe. Cependant, les applications efficaces de l'informatique dans l'éducation semblent aller maintenant bien au-delà. Des millions d'apprenants utilisent désormais des systèmes de tutorat intelligents dans le cadre de leurs cours de mathématiques - des systèmes qui détectent les connaissances des élèves, mettent en œuvre un apprentissage par la maîtrise (les élèves ne progressent pas tant qu'ils n'ont pas démontré leur compréhension d'un sujet) et offrent des conseils à la demande (VanLehn, 2011[1]). Des millions d'apprenants dans le monde suivent des cours magistraux et font des exercices dans le cadre de cours massifs ouverts en ligne (MOOC), offrant la possibilité d'étudier des milliers de sujets que les établissements d'enseignement à l'échelle locale ne peuvent pas couvrir (Milligan et Littlejohn, 2017[2]). Un nombre croissant d'enfants et d'adultes apprennent à partir d'interactions en ligne (et sont même évalués dans le cadre de ces interactions) telles que les simulations, les jeux, la réalité virtuelle et la réalité augmentée (De Jong et Van Joolingen, 1998[3] ; Rodrigo et al., 2015[4] ; Shin, 2017[5] ; De Freitas, 2018[6]). Peut-être qu'aucun de ces systèmes n'a pleinement atteint le degré de sophistication auquel s'attendaient les premiers articles les concernant (Carbonell, 1970[7]) (Stephenson, 1998[8]). En revanche, l'ampleur de leur utilisation et le degré d'intégration dans les systèmes éducatifs formels ont dépassé ce qui semblait envisageable il n'y a pas si longtemps encore.

De plus en plus, l'enseignement assisté par ordinateur s'appuie sur l'intelligence artificielle (IA). Les progrès de l'IA dans les années 1980, 1990 et la première décennie du nouveau millénaire ont ouvert de nouvelles possibilités aux technologies d'apprentissage dans plusieurs domaines. Ces progrès fondamentaux ont conduit à des avancées dans l'utilisation plus pointue de l'IA dans l'éducation - les communautés de recherche et de pratique de l'analyse de l'apprentissage et de la fouille des données éducatives - depuis 2004 environ jusqu'à aujourd'hui. À mesure que les travaux de recherche donnaient des résultats probants, de nouvelles méthodes se sont diffusées dans les systèmes utilisés à grande échelle par les apprenants. L'IA est aujourd'hui utilisée pour déterminer ce que les étudiants savent (ainsi que leurs stratégies d'implication et d'apprentissage) afin de prédire leurs trajectoires futures, de mieux évaluer les apprenants selon plusieurs dimensions et - en fin de compte - d'aider les êtres humains et les ordinateurs à décider comment mieux accompagner les apprenants.

Au fur et à mesure que ces technologies se développent, qu'elles arrivent à maturité et qu'elles prennent de l'ampleur, il est pertinent de se poser la question suivante : où allons-nous ? Et où pourrions-nous aller ? Si nous parvenions à cerner les frontières et le potentiel de l'intelligence artificielle dans l'éducation, nous serions peut-être en mesure d'orienter la recherche et le développement en élaborant, dans la prochaine décennie, une stratégie appropriée pour arriver à destination.

Dans les chapitres de cet ouvrage, les auteurs font appel à leur expertise dans des domaines précis et mettent en lumière les défis éducatifs posés à l'intelligence artificielle dans le but d'explorer les frontières et le potentiel qu'elle représente. Quelles sont les technologies et les approches pédagogiques qui commencent tout juste à être disponibles dans les classes expérimentales et qui pourraient bientôt être accessibles à un éventail beaucoup plus large d'élèves ? Comment l'intelligence artificielle peut-elle façonner les systèmes éducatifs de manière plus générale, de l'orientation scolaire à la délivrance de diplômes, pour mieux les adapter aux besoins des apprenants ? Où en serions-nous dans dix ans si la R-D disposait des directives et de l'encadrement appropriés ? Comment les apprenants pourront-ils progressivement bénéficier des avancées en la matière ? L'éducation et les expériences des apprenants seront-elles radicalement modifiées ?

Dans cet aperçu, nous clarifierons certains termes et concepts. Ensuite, nous mettrons les chapitres de cet ouvrage en perspective. Notamment, en évoquant certaines tendances et opportunités (dont certains éléments que les auteurs des autres chapitres n'ont pas couverts). La dernière partie abordera les opportunités qu'offrent différents types de technologies d'apprentissage basé sur l'intelligence artificielle et examinera comment un changement de paradigme politique pourra accompagner leur développement.

Les technologies éducatives intelligentes : définitions et contexte

Dans cette section, nous présentons certaines définitions et des données contextuelles qui sont essentielles pour comprendre les technologies intelligentes dans l'éducation.

La technologie dans l'éducation

La technologie éducative renvoie dans un premier temps à l'utilisation de solutions technologiques dans le domaine de l'éducation. Au cours du dernier siècle, les praticiens et les chercheurs ont parfois fait preuve d'un enthousiasme excessif. Les applications des nouvelles technologies n'ont pas nécessairement été efficaces dans l'éducation. Se référer par exemple à ce que rapporte Cuban (1986[9]) sur des instructeurs qui donnent un cours classique, mais à bord d'un avion.

Aujourd'hui, la plupart des discussions sur la technologie dans l'éducation se concentrent sur les ordinateurs et la numérisation, bien que des technologies plus anciennes telles que la radio et la télévision jouent encore un rôle important. Ces deux outils technologiques ont par exemple été utiles dans de nombreux pays à revenu moyen lors de la récente pandémie de COVID-19 (OECD, s.d.[10]). Les technologies éducatives peuvent englober toute une série de technologies. Nous en donnons ici quelques exemples (d'autres sont fournis dans les différents chapitres de cet ouvrage).

- *Les tuteurs informatiques ou les systèmes de tutorat intelligents* offrent aux apprenants une expérience d'apprentissage où le système adapte la présentation en fonction d'un modèle ou d'une évaluation continue de l'apprenant, d'un modèle de la matière à apprendre et d'un modèle de la manière d'enseigner (Wenger, 1987[11]). Les modèles peuvent être tantôt sophistiqués tantôt élémentaires. Baker (2016[12]) relève que les systèmes de tutorat intelligents ont aujourd'hui tendance à être sophistiqués dans un seul domaine et très simples dans les autres.

- *Les jeux d'apprentissage numériques* inscrivent l'apprentissage dans la perspective d'une activité amusante, qui s'assimile en fait à un jeu. Le degré de ludification s'étend sur une large gamme : il s'agit d'activités qui intègrent l'apprentissage dans le jeu lui-même (qui peuvent même ne pas ressembler à une activité d'apprentissage, comme les jeux informatiques SimCity et Civilisation) ou encore d'activités d'apprentissage plus évidentes où l'apprenant est récompensé pour ses performances (p. ex., lancer une banane à un singe après avoir répondu correctement à un problème de mathématiques dans MathBlaster).
- *Les simulations* sont des reproductions informatisées d'un processus ou d'une activité qu'il serait difficile ou coûteux de réaliser dans le monde réel en tant qu'activité pédagogique. Aujourd'hui, de plus en plus d'étudiants utilisent des laboratoires virtuels pour réaliser des expériences qui autrement pourraient s'avérer dangereuses, coûteuses ou compliquées, mais aussi pour recevoir des commentaires et une aide à l'apprentissage au cours de ces activités.
- *Les systèmes de réalité virtuelle* immergent les apprenants dans des représentations en 3D d'activités du monde réel. À l'image des simulations, ils permettent de réaliser, à partir de chez soi ou d'un laboratoire informatique, des activités qui seraient coûteuses, dangereuses ou tout simplement impossibles à réaliser autrement. Les *systèmes de réalité augmentée* intègrent des informations et des expériences supplémentaires dans les activités du monde réel, qu'il s'agisse de détails contextuels qui apparaissent, *d'affichages ambiants* (informations disponibles dans l'environnement ne nécessitant pas de concentration) ou de la superposition d'un monde différent au monde actuel. La réalité augmentée et la réalité virtuelle présentent des informations visuelles aux apprenants en général par le biais de casques.
- *Les robots éducatifs* ont une présence physique et interagissent avec les élèves dans des activités du monde réel pour les accompagner dans leur apprentissage. Les robots, sous la forme de kits de bricolage éducatifs, sont disponibles en fait depuis les années 1980, mais ils ont évolué et jouent désormais le rôle de tuteur.
- *Les cours ouverts massifs en ligne (MOOC)* offrent aux étudiants une expérience d'apprentissage élémentaire, généralement constituée de vidéos et de quizz. Les MOOC ne sont pas innovants par rapport à l'expérience d'apprentissage - il s'agit généralement d'une version simplifiée d'un cours magistral à un vaste public - mais le sont plutôt dans le fait qu'ils rendent accessible aux apprenants du monde entier du matériel élaboré par des professeurs d'universités de renommée mondiale, souvent sur des sujets très spécialisés.

Données éducatives

Les données sont, tout simplement, des faits qui sont regroupés. Alors que quelques faits regroupés ne nous permettent pas de raisonner sur les relations représentées dans ces informations, l'accumulation de grandes quantités d'informations le permet et c'est là le pouvoir moderne des mégadonnées. Les données éducatives étaient autrefois dispersées, difficiles à collecter et disponibles à petite échelle. Les enseignants pouvaient tenir un carnet de notes sur papier, l'établissement pouvait conserver les dossiers disciplinaires au sous-sol et les concepteurs de programmes de cours n'avaient qu'une idée très limitée de leur utilisation et des difficultés rencontrées par les élèves. Aujourd'hui, les données éducatives sont recueillies à une échelle beaucoup plus grande. Les carnets de notes, les données disciplinaires, les données d'évaluation, les données relatives aux absences et bien d'autres sont stockées de manière centralisée par les organismes éducatifs locaux (ou souvent par des prestataires nationaux, voire internationaux). Les concepteurs de programmes de cours recueillent souvent de nombreuses données sur l'apprentissage en général. À l'heure où nous écrivons ces lignes, les réglementations relatives à la manipulation, au stockage et à l'utilisation des données éducatives varient considérablement d'un pays à l'autre. Certains ont des normes très strictes (notamment sur le continent européen), d'autres des réglementations plus laxistes. Chacune de ces sources de données peut être utilisée pour améliorer la qualité de l'éducation et soutenir l'apprentissage, en favorisant à la fois l'intelligence artificielle/l'apprentissage automatique (définition suivante) et le perfectionnement humain du contenu et des expériences d'apprentissage.

L'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique

Par intelligence artificielle, on entend la capacité des ordinateurs à effectuer des tâches traditionnellement caractéristiques de l'intelligence humaine ou, plus récemment, des tâches qui dépassent les facultés intellectuelles de l'être humain. Issue de systèmes relativement simples et polyvalents dans les années 1960, l'intelligence artificielle implique aujourd'hui généralement des systèmes plus spécifiques qui accomplissent une tâche précise impliquant un raisonnement sur les données ou le monde extérieur, puis une interaction avec le monde (plus souvent par le biais d'un téléphone ou d'une interface informatique que par une véritable interaction physique).

L'apprentissage automatique (de plus en plus appelé science des données, et également appelé fouille et analyse des données) est un sous-domaine de l'intelligence artificielle. Présent de manière plutôt discrète au départ, il a pris une importance particulière depuis les années 1990. On parle d'apprentissage automatique lorsqu'un système découvre des modèles à partir de données. L'outil devient d'autant plus efficace que davantage de données sont disponibles (et plus encore, lorsque des données plus complètes ou représentatives sont disponibles). Il existe un large éventail de méthodes d'apprentissage automatique, classées principalement en *apprentissage supervisé* (qui tente de prédire ou de déduire une variable spécifique connue) et en *apprentissage non supervisé* (qui tente de découvrir la structure ou les relations dans un ensemble de variables). Pour faire simple, il y a eu deux générations d'apprentissage automatique : une première génération de méthodes relativement simples et interprétables et une deuxième génération de méthodes beaucoup plus complexes, sophistiquées et difficiles à interpréter.

L'intelligence artificielle dans l'éducation

L'intelligence artificielle dans l'éducation a d'abord été un sous-domaine interdisciplinaire au début des années 1980, organisé autour d'une conférence semestrielle (aujourd'hui annuelle) et une revue soumise à un comité de lecture. Une grande partie des premiers travaux sur l'intelligence artificielle dans l'éducation concernait les systèmes de tutorat intelligents, mais le domaine s'est élargi au fil des ans. Il inclut désormais tous les types de systèmes/interactions éducatifs définis ci dessus et accueille aujourd'hui plusieurs conférences et revues indépendantes. La révolution de l'apprentissage automatique et de la fouille des données a également eu un impact sur l'intelligence artificielle dans l'éducation, avec un changement significatif vers 2010 (lié à l'organisation d'une conférence scientifique distincte, *Educational Data Mining*) qui s'est traduit par une utilisation beaucoup plus importante de ce type de méthode. Aujourd'hui, les systèmes d'intelligence artificielle dans l'éducation intègrent une série de fonctionnalités permettant d'identifier certaines caractéristiques de l'apprenant, ainsi qu'une série de moyens d'interagir avec les apprenants et de leur répondre.

Analyse des données de l'apprentissage

L'analyse de l'apprentissage, également appelée « fouille des données éducatives », est un domaine qui a vu le jour en 2008, avec deux grandes conférences internationales et des revues soumises à des comités de lecture. Elle a pour objectif d'utiliser les quantités croissantes de données provenant de l'éducation pour mieux comprendre et faire des déductions sur les apprenants et les contextes dans lesquels ils apprennent. L'analyse de l'apprentissage et la fouille des données éducatives appliquent à l'éducation les méthodes de l'apprentissage automatique et de la science des données, en faisant appel à des méthodes spécifiques pour résoudre des situations propres à l'éducation. La détection des connaissances des élèves en temps réel et la prédiction du décrochage scolaire ont suscité un intérêt particulier, mais ces méthodes ont trouvé toute une série d'autres applications, qu'il s'agisse d'identifier des relations implicites dans une matière telle que les mathématiques ou de comprendre les facteurs qui conduisent à l'ennui des élèves. Une taxonomie des méthodes et des applications de l'analyse de l'apprentissage est présentée dans (Baker et Siemens, 2014[13] ; DeFalco et al., 2017[14]). Deux types de technologies s'appuient le plus souvent sur les modèles d'analyse de l'apprentissage : les systèmes d'augmentation de l'intelligence et les systèmes d'apprentissage personnalisé (abordés dans la section suivante).

Les systèmes d'augmentation de l'intelligence, également appelés systèmes d'aide à la décision, fournissent des informations aux enseignants et autres intervenants afin de les aider à prendre des décisions. S'ils peuvent simplement donner des données brutes, ils fournissent souvent des informations via des modèles d'apprentissage automatique, des prédictions ou des recommandations. Les systèmes d'augmentation de l'intelligence s'appuient la plupart du temps sur des *systèmes d'analyse prédictive*, qui font des prédictions sur les possibles résultats futurs des élèves, et - dans le meilleur des cas - fournissent également des éléments objectifs sur lesquels reposent ces prédictions. On fait maintenant appel aux systèmes d'analyse prédictive à grande échelle pour déterminer quels élèves risquent d'abandonner l'école ou d'échouer à l'université, afin de mettre en place des mesures qui remettront les élèves sur les rails. Les systèmes d'augmentation de l'intelligence communiquent souvent les informations aux parties concernées par le biais de *tableaux de bord*, qui transmettent les données sous forme de graphiques et de tableaux permettant à l'utilisateur d'approfondir les informations sur des apprenants spécifiques. Aujourd'hui, les systèmes d'apprentissage personnalisé et les systèmes d'analyse prédictive s'appuient souvent sur les tableaux de bord pour communiquer des informations aux enseignants. Ils mettent parfois des tableaux de bord à la disposition des conseillers scolaires, des conseillers pédagogiques et des chefs d'établissement, mais ceux-ci sont rarement mis à la disposition des parents. La qualité des données présentées dans les tableaux de bord peut varier considérablement d'un système d'apprentissage à l'autre.

Utilisation de l'intelligence artificielle dans les salles de classe et les systèmes éducatifs

Cette publication se concentre sur deux domaines clés : 1) les nouvelles technologies et approches éducatives pour la salle de classe, et 2) les nouvelles technologies et approches éducatives pour les systèmes éducatifs. Ces nouvelles technologies impliquent souvent, mais pas toujours, l'intelligence artificielle. Dans cette section, nous résumerons les travaux réalisés dans chacun de ces domaines, y compris les travaux abordés dans les chapitres de ce rapport, mais aussi ceux qui vont encore plus loin.

Nouvelles technologies et approches éducatives pour la salle de classe

Alors que les enseignants et les apprenants ont de plus en plus accès aux technologies éducatives informatisées, on prend davantage conscience que la technologie ne se contente pas d'être un simple outil pratique pour les enseignants ou de fournir une activité alternative amusante aux apprenants - elle peut promouvoir de nouvelles méthodes d'enseignement et d'apprentissage.

L'apprentissage personnalisé. Ces technologies ont un sérieux impact sur l'apprentissage et une nouvelle tendance se dessine clairement : l'apprentissage personnalisé. La personnalisation de l'apprentissage n'a pas vu le jour avec la technologie informatique - dans un sens, elle est disponible depuis la première utilisation du tutorat individuel, il y a des milliers d'années (si ce n'est plus tôt). Cependant, avec le développement de la scolarisation et de l'enseignement il y a plus d'un siècle, on a pris conscience qu'un programme de cours unique ne répondait pas bien aux besoins d'apprentissage de tout le monde. Des approches pédagogiques telles que l'apprentissage par la maîtrise (chaque élève travaille sur un sujet précis jusqu'à ce qu'il le maîtrise pour pouvoir passer ensuite au sujet suivant) ont été développées, mais se sont avérées difficiles à mettre en œuvre à grande échelle en raison des exigences imposées à l'enseignant. Les technologies éducatives ont apporté une solution immédiate à ce problème : l'ordinateur peut gérer certaines des exigences de l'apprentissage personnalisé, en identifiant le degré de maîtrise de chaque élève et en lui proposant des activités d'apprentissage adaptées à sa situation personnelle par rapport au programme de cours.

Les technologies éducatives sont devenues efficaces en matière de personnalisation quand elles ont réussi à évaluer les connaissances des élèves. Molenaar (2021[15]) détaille les efforts déployés pour développer une meilleure personnalisation de l'apprentissage, en fournissant un cadre pour le degré d'automatisation des systèmes d'apprentissage personnalisés. Son chapitre traite du passage de systèmes dirigés par l'enseignant à des technologies informatiques qui peuvent jouer un rôle plus important dans la prise de décision immédiate, tout en respectant les consignes et les objectifs spécifiés par l'enseignant.

Ensuite, les technologies éducatives sont devenues plus efficaces en matière de personnalisation et ont pris en compte l'apprentissage autorégulé des élèves, c'est-à-dire leur capacité à faire de bons choix pendant l'apprentissage afin d'améliorer leurs résultats et leur efficacité. Cette thématique est également abordée dans le chapitre d'Inge Molenaar (Molenaar, 2021[15]). Dans de nombreux cas, les technologies éducatives modernes peuvent déterminer les situations où les élèves utilisent des stratégies inefficaces ou inefficientes, et leur fournir alors des recommandations ou des coups de pouce pour les ramener dans une trajectoire plus efficace.

On a tendance aujourd'hui, principalement dans les classes expérimentales, à détecter également l'implication, l'affect et les émotions des élèves et à s'y adapter. Comme l'a évoqué Sidney D'Mello (2021[16]), ces systèmes sont capables d'identifier ces manifestations chez un élève soit à partir de son interaction et de son comportement au sein du système, soit à partir de capteurs physiques et physiologiques. Il existe aujourd'hui plusieurs exemples de technologies éducatives - en particulier les systèmes de tutorat et les jeux intelligents - qui sont capables de détecter un élève qui s'ennuie, est frustré ou se joue du système (en essayant de trouver des stratégies pour compléter des documents sans avoir besoin d'apprendre) et de le remotiver de manière productive, par exemple. (DeFalco et al., 2017[14]).

De plus en plus de travaux de recherche visent à renforcer la personnalisation, de manière à davantage motiver ou intéresser les élèves. Ces recherches ont une autre dimension temporelle. Alors que l'implication et l'affect se manifestent souvent sur de courtes périodes - parfois uniquement quelques secondes - la motivation et l'intérêt sont des aspects plus stables qui s'inscrivent dans la durée. Les travaux de Kizilcec et de ses collègues (Kizilcec et al., 2017[17]), par exemple, ont tenté de relier les expériences d'apprentissage des élèves à leurs valeurs, ce qui

a conduit à un plus haut degré d'achèvement des cours en ligne. Les travaux de Walkington et de ses collègues (Walkington, 2013[18] ; Walkington et Bernacki, 2019[19]) ont porté sur la modification du contenu des systèmes d'apprentissage pour que celui-ci corresponde aux intérêts personnels des élèves, ce qui les amène à travailler plus rapidement, à rester impliqués plus longtemps et à apprendre davantage.

Nouvelles pédagogies. Bien que l'impact le plus évident des technologies éducatives basées sur l'intelligence artificielle se manifeste par la personnalisation directe de l'apprentissage, de nouvelles pratiques pédagogiques ont également émergé. Celles-ci permettent aux enseignants de soutenir leurs élèves ou de leur offrir des expériences d'une manière qui n'était généralement pas possible avant les développements technologiques.

Le changement majeur concerne vraisemblablement la masse d'informations mises à la disposition des enseignants. Les tableaux de bord fournissent aux enseignants des données variées sur la performance et l'apprentissage de leurs élèves. La perception des devoirs à la maison a complètement changé. Auparavant, les élèves devaient apporter leurs devoirs en classe. L'enseignant pouvait ensuite les noter (ce qui retardait le retour d'information et le soutien à l'apprentissage), ou les élèves pouvaient les noter dans la classe sous la supervision de l'enseignant, ce qui n'est pas une approche très efficace dans le temps. En revanche, les enseignants peuvent aujourd'hui disposer en temps réel des données issues des technologies d'aide aux devoirs. Autrement dit, les enseignants peuvent identifier les élèves qui ont des difficultés et les matières qui ont posé problème en général, et ce avant même que le cours ne commence. Cette approche permet de mettre en place des stratégies où, par exemple, les enseignants identifient les élèves qui ont commis des erreurs courantes. Les élèves qui ont des stratégies de résolution de problèmes à la fois incorrectes et correctes peuvent également bénéficier des discussions avec toute la classe. Les enseignants ont également l'occasion d'envoyer un message aux élèves qui ont pris du retard par rapport à leurs tâches scolaires, de manière à les mettre sur la bonne voie (Arnold et Pistilli, 2012[20]).

Les systèmes d'évaluation formative peuvent bénéficier d'utilisations similaires, de plus en plus courantes dans des contextes où les élèves ont des examens de fin d'année à enjeu élevé. Ces systèmes ont souvent une portée plus large que les devoirs conçus par l'enseignant en termes de couverture des compétences et des concepts clés. Les enseignants s'en servent de plus en plus pour déterminer les sujets à revoir avec leurs classes ainsi que les types de soutien supplémentaire à apporter à certains élèves.

Encadré 2.1 Systèmes d'évaluation formative

Les systèmes d'évaluation formative sont de plus en plus utilisés dans le monde entier de la maternelle à la fin du secondaire. Les plus répandus, comme le programme NWEA MAP (Finnerty, 2018[21]), présentent aux élèves des questions à choix multiples classiques et mesurent des compétences simples en mathématiques et en langues - ce qui revient à donner aux élèves un autre test, mais grâce auquel leurs enseignants obtiendront des données utiles liées aux compétences qui seront observées lors d'un futur examen standardisé. Un petit nombre de systèmes d'évaluation formative évaluent des constructs plus complexes ou intègrent l'évaluation dans des activités plus complexes, comme des jeux (Shute et Kim, 2014[22]).

Les données collectées à partir des systèmes d'évaluation formative peuvent être utilisées avec des plateformes conçues pour fournir des listes de ressources supplémentaires en lien avec des compétences, des concepts et des sujets spécifiques. Plus particulièrement après la pandémie de COVID-19, les structures éducatives locales et les pouvoirs publics, tant régionaux que nationaux, ont travaillé à la mise en place de plateformes proposant des ressources d'apprentissage supplémentaires pour les élèves et les parents. Cependant, à l'heure actuelle, ces plateformes ne sont généralement pas connectées directement aux systèmes d'évaluation formative. L'enseignant ou le parent concerné doit donc rechercher les ressources pour un élève ayant des difficultés par rapport à une compétence spécifique.

Les systèmes d'évaluation formative présentent un léger défaut : le temps passé à utiliser un système d'évaluation formative n'est pas consacré à l'apprentissage ou à l'enseignement. C'est pour cette raison qu'il existe une

tendance à intégrer l'évaluation formative dans l'apprentissage personnalisé. Plusieurs systèmes d'apprentissage personnalisé largement répandus, tels que MATHia, Mindspark, Reasoning Mind et ASSISTments, fournissent aux enseignants des données d'évaluation formative sur les compétences qui manquent à l'élève (Feng et Heffernan, 2006[23] ; Khachatryan et al., 2014[24]). Ces informations sont extraites des activités d'apprentissage des élèves, ce qui évite une perte de temps d'enseignement.

Les enseignants disposent également de meilleures informations sur ce qui se passe dans leurs classes en temps réel, un sujet que Pierre Dillenbourg aborde en détail (Dillenbourg, 2021[25]). L'analyse des données de la classe peut fournir à l'enseignant des informations sur plusieurs aspects de la performance de la classe, des difficultés individuelles des élèves en temps réel jusqu'à l'efficacité relative de la collaboration entre différents groupes d'élèves. Un enseignant ne peut pas surveiller chaque élève (ou chaque groupe d'élèves) tout le temps - des données plus précises peuvent l'aider à comprendre où il doit concentrer ses efforts et quels élèves ont besoin d'une aide immédiate.

La technologie ne fournit pas simplement des données plus précises ; elle peut servir à offrir aux élèves une gamme d'expériences qui n'étaient pas envisageables il y a une génération. Dans le chapitre qu'ils ont rédigé, Tony Belpaeme et Fumihide Tanaka (Belpaeme et Tanaka, 2021[26]) évoquent les nouvelles possibilités d'interaction entre les élèves et les robots.

L'utilisation de simulations et de jeux en classe peut permettre aux enseignants de présenter aux élèves des systèmes complexes et difficiles à comprendre. Les élèves peuvent eux-mêmes explorer et interagir avec ces systèmes. D'un point de vue pédagogique, la combinaison de l'approche technologique fondée sur une simulation et d'un cours traditionnel donné par un enseignant semble plus que bénéfique. Dans un premier temps, l'élève développe une compréhension informelle et pratique de la matière. L'enseignant permet ensuite à l'élève d'avoir une compréhension plus formelle, conceptuelle ou scolaire (Asbell-Clarke et al., 2020[27]). Les technologies modernes offrent également de nouvelles possibilités en matière d'apprentissage collaboratif, grâce à des systèmes qui peuvent renforcer les stratégies de collaboration efficaces (Strauß et Rummel, 2020[28]) ou des systèmes qui offrent des expériences collaboratives, comme les tablettes interactives (Martinez Maldonado et al., 2012[29]).

L'équité Les nouvelles technologies éducatives sont généralement conçues dans le but d'améliorer les expériences et les résultats des élèves et des enseignants. Cela étant dit, les concepteurs de ces systèmes ne tiennent pas toujours compte de leur impact sur l'ensemble des apprenants. Souvent, les concepteurs appartiennent à un groupe démographique spécifique (ils ont en général un statut socio-économique élevé, n'ont pas de besoins spécifiques et n'appartiennent pas à une minorité raciale ou ethnique) et ils n'ont en tête que leurs semblables lorsqu'ils développent les systèmes en question (mais pas nécessairement de manière intentionnelle). Ceux-ci risquent de s'avérer moins efficaces sur le plan éducatif pour les membres d'autres groupes socio-économiques.

Ainsi, Judith Good (2021[30]) souligne que peu d'efforts ont été déployés pour mettre au point des technologies éducatives spécialement conçues pour les élèves handicapés ou ayant des besoins spécifiques. Elle donne des exemples de technologies qui pourraient aider les apprenants atteints d'autisme, de dysgraphie ou de déficience visuelle. Le peu d'attention qu'accordent la communauté scientifique et les concepteurs de technologies éducatives intelligentes aux personnes ayant des besoins spécifiques est une source majeure d'inégalité et c'est bien regrettable. L'élaboration de politiques qui facilitent le développement de systèmes destinés à soutenir les apprenants ayant des besoins spécifiques (p. ex., en élaborant des approches qui améliorent l'accès aux données sur les handicaps tout en protégeant la vie privée des élèves) ou la mise sur pied de mesures incitatives qui favorisent le développement de solutions destinées aux populations ayant des besoins spécifiques pourraient combler ce manque d'équité.

Une autre situation inéquitable concerne les populations historiquement mal desservies et sous représentées, notamment les minorités ethniques/raciales et les minorités linguistiques. La plupart des technologies éducatives sont développées par des membres de groupes démographiques qui ont toujours été bien soutenus. Ce sont

souvent des représentants de ces mêmes groupes qui participent aux phases de test de ces systèmes. La participation à ces tests de populations historiquement sous représentées n'intervient souvent qu'à un stade ultérieur du développement (ou lors des évaluations finales de l'efficacité à grande échelle), lorsqu'il est trop tard pour apporter des changements majeurs en termes de conception. Il apparaît de plus en plus clairement que si la méthodologie conceptuelle de la recherche éducative et les algorithmes ainsi obtenus concernent des groupes majoritaires, ils ne fonctionneront pas nécessairement aussi bien pour d'autres groupes d'apprenants (Ocumpaugh et al., 2014[31] ; Karumbaiah, Ocumpaugh et Baker, 2019[32]).

Nouvelles technologies et approches éducatives pour les systèmes éducatifs

Les avantages de la technologie éducative moderne - intelligence artificielle et apprentissage automatique - ne se limitent pas au simple soutien à l'enseignement et à l'apprentissage. Les technologies éducatives modernes (qui ne s'appuient pas toujours sur l'intelligence artificielle) profitent de bien d'autres manières aux étudiants et aux établissements dans lesquels ils sont scolarisés. Cette thématique est au cœur du chapitre de Dirk Ifenthaler (Ifenthaler, 2021[33]), mais d'autres points plus précis sont également traités dans d'autres chapitres.

Systèmes d'alerte précoce. L'analyse prédictive dans l'éducation s'est matérialisée dans la création des systèmes d'alerte précoce. Ces systèmes, discutés en détail dans le chapitre d'Alex Bowers (Bowers, 2021[34]) tentent de prédire quels élèves risquent de connaître une issue défavorable - le plus souvent le décrochage scolaire ou la non-obtention d'un diplôme, mais parfois aussi d'autres résultats comme l'échec dans une matière donnée. À ces prédictions viennent souvent s'ajouter des informations sur les raisons qui donnent à penser qu'un élève est susceptible de connaître une issue défavorable, comme de mauvaises notes dans un cours spécifique ou un nombre trop élevé de problèmes disciplinaires.

Les mêmes types de données sont également utilisés dans les systèmes de rapports à l'échelle de l'établissement pour suivre l'apprentissage des élèves ou les problèmes disciplinaires. Ces tableaux de bord au niveau de l'établissement (ou du district scolaire) donnent aux responsables scolaires une vue d'ensemble du climat et de la performance de l'établissement. Aux États-Unis, ces outils sont de plus en plus souvent fournis aux districts par des prestataires qui combinent leur expertise dans la saisie des données du système d'information de l'établissement (souvent dans un ensemble déconnecté de bases de données différentes) avec leur expertise dans la création de tableaux de bord pertinents. Grâce à ces prestataires, ce type de technologie d'intelligence artificielle est mis à la disposition de millions d'élèves.

Rapports à destination des parents. De nombreux établissements, districts scolaires et organismes éducatifs locaux fournissent aux parents des rapports sur les progrès scolaires de leurs enfants. Le champ couvert par ces rapports s'est élargi puisqu'y figurent aujourd'hui, outre le contenu des bulletins scolaires classiques (qui se contentaient d'indiquer une note pour chaque matière), toute une série d'informations concernant les apprenants.

Admissions et inscriptions dans les établissements d'enseignement. Les admissions et les inscriptions dans les établissements relèvent du même processus - à savoir déterminer si un élève sera invité à fréquenter un établissement ou une université spécifique - mais sous un angle différent. Les admissions impliquent généralement une décision prise par un seul établissement dans un environnement où les élèves peuvent être admis dans plusieurs établissements ; les inscriptions impliquent généralement un seul centre de décision centralisé. Dans un cas comme dans l'autre, les algorithmes sont utilisés pour allouer des ressources limitées (places disponibles dans les établissements/universités) en fonction des valeurs de l'établissement, qu'il s'agisse d'équité ou de sélectivité. Cette pratique est de plus en plus répandue, qu'il s'agisse de réseaux d'écoles à charte aux États-Unis, de l'enseignement secondaire public en France ou d'universités en Hongrie.

Systèmes de surveillance. Les fermetures intermittentes (ou continues) d'établissements qui se produisent presque partout dans le monde en raison de la pandémie de COVID-19 ont fait surgir des inquiétudes quant à la sécurité des examens - par exemple, le risque que des élèves trichent en demandant à une autre personne de passer un test à leur place, ou que des élèves aient accès à des informations non autorisées pendant qu'ils passent un test. Cette situation a conduit à une explosion des systèmes de surveillance : les étudiants doivent (par exemple) montrer une carte d'identité avec photo au début de l'examen, garder leur webcam allumée pendant qu'ils le passent, et un surveillant contrôle le flux de la webcam d'un groupe d'étudiants. Certains systèmes surveillent également les autres activités sur les ordinateurs des étudiants pendant la durée du test et ce qui se passe dans la salle où les étudiants passent le test, en utilisant dans de nombreux cas l'intelligence artificielle pour épauler les surveillants humains.

Encadré 2.2 Rapports à destination des parents

De plus en plus, les parents reçoivent des rapports sur les activités d'apprentissage de leurs enfants à l'école. Les données fournies aux parents peuvent considérablement varier. Il peut s'agir de macro-données (un élève risque de décrocher ou d'échouer dans une matière), de mésodonnées (un élève a été absent à sept reprises ou a eu une note passable en mathématiques) ou encore de microdonnées (l'élève a coché la réponse 'D' à la question 6 et voici pourquoi c'est faux).

Ces rapports prennent différentes formes. De nombreux établissements, districts scolaires et organismes éducatifs locaux fournissent encore aux parents des informations sur support papier. Ils reçoivent également des messages textuels et des appels téléphoniques, notamment pour les avertissements ou les rappels de diverses sortes. Certaines plateformes d'apprentissage et certains systèmes de gestion de l'apprentissage proposent des portails en ligne que les parents peuvent consulter. Ces plateformes ont tendance à fournir relativement plus de données. Par exemple, la plateforme ASSISTments (Broderick et al., 2011[35]) communique aux parents les sujets sur lesquels leur enfant a récemment travaillé, ses résultats et les réponses correctes. La plateforme Edgenuity fournit aux parents des données sur le nombre de minutes que l'élève a consacrées à chaque matière et sur le retard ou l'avance de l'élève pour le semestre.

Même si l'on s'accorde généralement à dire que la communication de données aux parents est constructive, la question de savoir dans quelle mesure les parents consultent les rapports et les données auxquels ils ont accès fait débat (Broderick et al., 2011[35]). Des recherches ont d'ailleurs été menées pour élaborer des rapports que les parents seraient plus susceptibles de lire. Lorsqu'ils sont conçus efficacement, les rapports de données peuvent avoir des effets positifs sur l'implication des parents et les résultats des élèves (Bergman et Chan, 2017[36] ; Kraft et Monti-Nussbaum, 2017[37]).

Progrès dans la délivrance de titres et certificats. Les progrès récents dans les technologies informatiques ont conduit à des avancées dans la délivrance de titres de compétences. L'avancée la plus remarquable dans ce domaine est sans doute l'utilisation de la blockchain dans l'éducation, abordée dans le chapitre de Natalie Smolenski (Smolenski, 2021[38]). La blockchain offre un moyen sûr de réduire la fraude aux diplômes et de rationaliser la validation des titres et certificats.

Les récents changements majeurs dans la délivrance de titres provenant du côté de l'offre (la disponibilité de nouveaux titres et certificats) rendent ces nouvelles avancées encore plus pertinentes. Un nombre croissant d'organisations proposent des certificats, tels que les certificats techniques délivrés par Cisco, Microsoft ou CompTIA. En outre, les organisateurs de cours en ligne ouverts et massifs proposent des cours et des certificats en ligne élaborés en partenariat avec toute une série d'universités. Les organisateurs de cours en ligne ouverts et massifs comprennent à la fois de grandes structures internationales telles que edX, Coursera et FutureLearn, qui s'associent à des universités du monde entier pour offrir un grand nombre de cours. Sont également présents des organisations régionales ou nationales et des prestataires spécialisés. Cet environnement suscite de nouveaux cas en vue de l'utilisation de la blockchain.

Systèmes de gestion de la relation client. Les systèmes de gestion de la relation client, qui étaient à l'origine utilisés à des fins commerciales, sont désormais également utilisés dans la gestion des systèmes éducatifs. Ces systèmes suivent les interactions des individus avec un établissement d'enseignement au fil du temps - avec qui ils ont interagi et comment ils l'ont fait. Certaines universités et programmes en ligne intègrent ces outils à des systèmes d'alerte précoce afin de suivre la manière dont un étudiant à risque est encadré. Dans les universités où les conseillers académiques contactent régulièrement les étudiants, comme la Southern New Hampshire University et la Liberty University, un de ces conseillers peut consulter un tel système pour obtenir une mise à jour hebdomadaire des progrès de l'étudiant, consulter les interactions passées entre cet étudiant et ses instructeurs ou d'autres conseillers académiques, puis suivre sa propre interaction avec l'étudiant après l'avoir joint par téléphone.

Affectation et planification des ressources. Un nombre croissant de districts scolaires et d'organismes éducatifs locaux utilisent désormais des systèmes algorithmiques pour estimer leurs besoins futurs en matière d'équipement, de personnel et d'autres ressources. Les systèmes de cette nature servent également, souvent avec le soutien de bureaux de consultants, à déterminer comment les ressources telles que les financements publics peuvent être demandées et/ou exploitées au bon moment pour combler les futures lacunes en matière de ressources.

Perspectives d'avenir

Ces dernières années, l'intelligence artificielle est apparue comme un outil puissant pour renforcer l'éducation. L'utilisation de ces technologies s'est développée à des rythmes différents. Certaines technologies ont connu une expansion rapide, comme les systèmes d'alerte précoce aux États-Unis qui ont explosé au cours des dernières années, et d'autres se sont développées progressivement, comme les technologies d'apprentissage personnalisé qui ont connu une expansion lente et parfois en dents de scie. Certaines technologies, en particulier celles qui permettent d'étudier l'interaction en classe et de soutenir l'orchestration de la classe, ont été lentes à émerger des salles de recherche et ont besoin d'un plus grand soutien (et de meilleurs moyens de protéger la vie privée) afin de favoriser leur développement.

Cette publication aborde les nombreuses applications et utilisations différentes qui ont recours à l'intelligence artificielle dans une perspective éducative. Elles sont traitées en quelque sorte indépendamment les unes des autres, comme des tendances émergentes distinctes et dissociées. Il y a une raison à cela : bien qu'elles émergent des mêmes types de technologies, elles ont été en grande partie des tendances distinctes. Elles ont émergé l'une après l'autre, portées par des acteurs différents, avec des objectifs différents, parfois même en opposition les unes avec les autres. Par exemple, les diverses formes de technologies d'apprentissage personnalisé se sont souvent fait concurrence en termes d'utilisation et de diffusion, au lieu d'essayer de trouver des moyens de travailler de concert.

Il en a résulté un écosystème d'apprentissage fragmenté. Un établissement scolaire peut utiliser plusieurs technologies d'intelligence artificielle, mais pas nécessairement ensemble. Un élève peut même utiliser cinq ou six technologies différentes dans une seule classe, au cours d'un semestre. Ce manque d'intégration entraîne des coûts importants : des technologies d'apprentissage différentes peuvent chacune révéler quelque chose sur l'élève que l'enseignant sait déjà. L'utilisation simultanée des technologies d'apprentissage basées sur l'intelligence artificielle, comme le préconise (Baker, 2019[39]), peut réduire le manque d'efficacité et améliorer les expériences d'apprentissage des élèves.

Dans une réflexion plus poussée, un constat est évident : si nous pouvons développer un écosystème dans lequel diverses technologies basées sur l'intelligence artificielle se coordonnent entre elles et communiquent des informations aux enseignants et aux autres intervenants, nous pouvons améliorer considérablement les résultats des apprenants. Le risque de décrochage d'un élève sera plus facilement prévisible si l'on dispose de données continues sur l'utilisation des systèmes d'apprentissage personnalisés par les élèves. L'intégration des évaluations formatives aux technologies d'orchestration de la classe facilitera l'évaluation des compétences du XXIe siècle tout en donnant aux enseignants des informations en temps réel sur leur évolution. Les possibilités sont en fait multiples - presque toutes les combinaisons possibles des technologies abordées dans ce chapitre créent de nouvelles opportunités lorsqu'elles sont intégrées dans un ensemble. L'école du futur peut évoluer vers une expérience d'apprentissage intégrée pour les élèves, où les données sont combinées non seulement sur les plateformes d'apprentissage, mais aussi dans tous les aspects de l'expérience d'apprentissage. Dans ce cas de figure, les enseignants de différentes classes pourraient se coordonner pour soutenir le développement des compétences du XXIe siècle de chaque élève, en travaillant avec une variété de plateformes d'apprentissage pour créer une expérience d'apprentissage intégrée et unifiée. Un élève qui rechigne à demander de l'aide, par exemple, pourrait être encouragé à le faire (de manière appropriée) dans le cadre d'activités de groupe en classe, au sein d'une plateforme d'apprentissage personnalisée utilisée pour les devoirs et encadrée par un robot éducatif. Les enseignants pourraient examiner ensemble un tableau de bord intégré pour évaluer les progrès de l'élève et les risques de décrochage scolaire. La capacité des élèves à acquérir les compétences du XXIe siècle pourrait être évaluée de manière formative et sommative par des systèmes d'évaluation. Une telle approche représente plusieurs défis. Le plus important est peut-être de susciter des mesures politiques qui incitent les concepteurs de ces systèmes dispersés à travailler ensemble. De manière plus fondamentale, il est impératif de travailler à

la refonte de plusieurs systèmes existants - conception des plateformes, pratiques scolaires et développement professionnel des enseignants - afin de véritablement saisir les possibilités qu'offrent les nouvelles technologies.

L'intérêt croissant des enseignants pour les données de grande qualité et les rapports sur les performances et les progrès des élèves peut permettre de renforcer la mise en commun des informations produites par les différentes technologies. Cette tendance se dessinait déjà avant 2020, mais elle s'est amplifiée avec le passage à l'apprentissage à domicile pendant la pandémie de COVID-19. Des tableaux de bord contenant des informations sur les difficultés des élèves sont déjà disponibles sur certaines plateformes d'apprentissage avancées, mais leur utilisation est loin d'être systématique. Ce type d'informations devient essentiel pour les enseignants lorsqu'ils ne peuvent pas interagir avec les élèves en personne. Cette situation induit de nouvelles fonctionnalités : les sources de données doivent se connecter entre elles et fournir des données plus précises aux enseignants. Il en découle aussi la nécessité de mettre au point des mesures politiques qui accompagnent les enseignants dans leurs décisions basées sur de simples données. Les tableaux de bord ont généralement été plus largement utilisés par les enseignants ayant un niveau élevé de connaissances en matière de gestion des données. Pour en tirer pleinement parti, il faudra en améliorer la conception afin qu'ils soient plus faciles à comprendre pour les utilisateurs non experts. La formation professionnelle des enseignants en matière de culture des données sera aussi nécessaire. L'utilisation des tableaux de bord dans le cadre de la pratique pédagogique devra devenir une seconde nature.

Cette évolution s'inscrit dans un champ plus large : l'utilisation de l'intelligence artificielle dans le monde de l'éducation. Il est souvent difficile de voir comment la pensée a évolué. L'idée que les systèmes d'intelligence artificielle vont complètement remplacer les enseignants semble manifestement erronée pour la plupart des chercheurs et des praticiens travaillant dans le domaine, et que cette idée ait pu être répandue auparavant paraît bizarre. À titre d'exemple, les recherches sur la conception de tableaux de bord des enseignants dans les systèmes d'intelligence artificielle étaient rares il y a encore 15 ans (voir Feng et Heffernan, 2006[23]). Cette évolution s'inscrit dans le cadre d'un changement plus large, qui consiste à considérer ces systèmes non plus comme un objet utilisé par l'élève, mais comme un élément d'un écosystème plus vaste impliquant également les enseignants, les responsables scolaires et les parents. Prenons, par exemple, les cinq visions de l'avenir des systèmes d'apprentissage artificiellement intelligents présentées il y a 25 ans par Shute et Psotka (1996[40]). Ces cinq visions impliquaient chacune des expériences d'apprentissage captivantes et riches en soi. Aucune d'entre elles n'impliquait les enseignants ou les parents (sauf en tant que personne à saluer sur le chemin d'un box de réalité virtuelle). De plus en plus, nous comprenons qu'il ne faut pas à choisir entre l'IA et les enseignants : ils peuvent travailler ensemble.

Les changements qui affecteront les pratiques éducatives au cours des vingt prochaines années seront en grande partie déterminés par l'adoption croissante de l'intelligence artificielle. Pour que ce cheminement soit couronné de succès, il faudra immanquablement compter sur les développements technologiques et scientifiques, mais aussi sur la collaboration étroite des enseignants, des responsables scolaires et des apprenants eux-mêmes. Si les bonnes mesures politiques sont mises en place, on peut espérer que les propos optimistes de cet ouvrage se vérifieront, voire qu'on les dépassera (OECD, 2021[41]).

Références

Arnold, K. et M. Pistilli (2012), « Course signals at Purdue », *Proceedings of the 2nd International Conference on Learning Analytics and Knowledge - LAK '12*, http://dx.doi.org/10.1145/2330601.2330666. [20]

Asbell-Clarke, J., E. Rowe, E. Bardar et T. Edwards (2020), « The Importance of Teacher Bridging in Game-Based Learning Classrooms », dans *Global Perspectives on Gameful and Playful Teaching and Learning*, IGI Global. [27]

Baker, R. (2019), « Challenges for the Future of Educational Data Mining: The Baker Learning Analytics Prizes », *Journal of Educational Data Mining*, Vol. 11/1, pp. 1-17. [39]

Baker, R. (2016), « Stupid Tutoring Systems, Intelligent Humans », *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, Vol. 26/2, pp. 600-614, http://dx.doi.org/10.1007/s40593-016-0105-0. [12]

Baker, R. et G. Siemens (2014), « Educational Data Mining and Learning Analytics », dans Sawyer, R. (dir. pub.), *The Cambridge Handbook of the Learning Sciences*, Cambridge University Press, Cambridge, 2nd Edition, http://dx.doi.org/10.1017/cbo9781139519526.016. [13]

Belpaeme, T. et F. Tanaka (2021), « Social Robots as educators », dans *OECD Digital Education Outlook 2021: Pushing the frontiers with AI, blockchain, and robots*, OECD Publishing. [26]

Bergman, P. et E. Chan (2017), « Leveraging technology to engage parents at scale: Evidence from a randomized controlled trial », *Working paper.* [36]

Bowers, A. (2021), « Early warning systems and indicators of dropping out of upper secondary school: the emerging role of digital technologies », dans *OECD Digital Education Outlook 2021: Pushing the frontiers with AI, blockchain, and robots*, OECD Publishing. [34]

Broderick, Z., C. O'Connor, C. Mulcahy et N.T. Heffernan (2011), « Increasing parent engagement in student learning using an intelligent tutoring system », *Journal of Interactive Learning Research*, Vol. 22/4, pp. 523-550. [35]

Carbonell, J. (1970), « AI in CAI: An artificial-intelligence approach to computer-assisted instruction », *IEEE transactions on man-machine systems*, Vol. 11/4, pp. 190-202. [7]

Cuban, L. (1986), *Teachers and Machines: The Classroom of Technology Since 1920*, Teachers College Press. [9]

D'Mello, S. (2021), « Improving Student Engagement in and with Digital Learning Technologies », dans *OECD Digital Education Outlook 2021: Pushing the frontiers with AI, blockchain, and robots*, OECD Publishing. [16]

De Freitas, S. (2018), « Are games effective learning tools? A review of educational games », *Journal of Educational Technology & Society*, Vol. 21/2, pp. 74-84. [6]

De Jong, T. et W. Van Joolingen (1998), « Scientific Discovery Learning with Computer Simulations of Conceptual Domains », *Review of Educational Research*, Vol. 68/2, pp. 179-201, http://dx.doi.org/10.3102/00346543068002179. [3]

DeFalco, J., J.P. Rowe, L. Paquette, V. Georgoulas-Sherry, K. Brawner, B.W. Mott, R. Baker et J.C. Lester (2017), « Detecting and Addressing Frustration in a Serious Game for Military Training », I*nternational Journal of Artificial Intelligence in Education*, Vol. 28/2, pp. 152-193, http://dx.doi.org/10.1007/s40593-017-0152-1. [14]

Dillenbourg, P. (2021), « Classroom analytics: Zooming out from a pupil to a classroom », dans *OECD Digital Education Outlook 2021: Pushing the frontiers with AI, blockchain, and robots*, OECD Publishing. [25]

Feng, M. et N. Heffernan (2006), « Informing teachers live about student learning: Reporting in the assistment system », *Technology Instruction Cognition and Learning*, Vol. 3/1/2, pp. 63. [23]

Finnerty, D. (2018), « The Predictive Utility and Longitudinal Student Growth of NWEA MAP Interim Assessments in Two Pennsylvania Schools », *Unpublished doctoral dissertation, Lehigh University.* [21]

Good, J. (2021), "Serving students with special needs better: How digital technology can help", in *OECD Digital Education Outlook 2021: Pushing the frontiers with AI, blockchain, and robots*, OECD Publishing. [30]

Ifenthaler, D. (2021), « Learning analytics for school and system management », dans *OECD Digital Education Outlook 2021: Pushing the frontiers with AI, blockchain, and robots*, OECD Publishing. [33]

Karumbaiah, S., J. Ocumpaugh et R. Baker (2019), « The Influence of School Demographics on the Relationship Between Students' Help-Seeking Behavior and Performance and Motivational Measures », *Proceedings of the 12th International Conference on Educational Data Mining*, pp. 99-108. [32]

Khachatryan, G., A.V. Romashov, A.R. Khachatryan, S.J. Gaudino, J.M. Khachatryan, K.R. Guarian et N.V. Yufa (2014), « Reasoning Mind Genie 2: An intelligent tutoring system as a vehicle for international transfer of instructional methods in mathematics », *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, Vol. 24/3, pp. 333-382. [24]

Kizilcec, R., A.J. Saltarelli, J. Reich et G.L. Cohen (2017), « Closing global achievement gaps in MOOCs », *Science*, Vol. 355/6322, pp. 251-252, http://dx.doi.org/10.1126/science.aag2063. [17]

Kraft, M. et M. Monti-Nussbaum (2017), « Can schools enable parents to prevent summer learning loss? A text-messaging field experiment to promote literacy skills », *The Annals of the American Academy of Political and Social Science*, Vol. 674/1, pp. 85-112. [37]

Martinez Maldonado, R., J. Kay, K. Yacef et B. Schwendimann (2012), « An Interactive Teacher's Dashboard for Monitoring Groups in a Multi-tabletop Learning Environment », dans *Intelligent Tutoring Systems, Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-30950-2_62. [29]

Milligan, C. et A. Littlejohn (2017), « Why Study on a MOOC? The Motives of Students and Professionals », *The International Review of Research in Open and Distributed Learning*, Vol. 18/2, pp. 92-102, http://dx.doi.org/10.19173/irrodl.v18i2.3033. [2]

Molenaar, I. (2021), « Personalisation of learning: Towards hybrid human-AI learning technologies », dans *OECD Digital Education Outlook 2021: Pushing the frontiers with AI, blockchain, and robots*, OECD Publishing. [15]

Ocumpaugh, J., R. Baker, S. Gowda, N. Heffernan et C. Heffernan (2014), « Population validity for educational data mining models: A case study in affect detection », *British Journal of Educational Technology*, Vol. 45/3, pp. 487-501, http://dx.doi.org/10.1111/bjet.12156. [31]

OECD (2021), *Digital Education Outlook: Pushing the frontiers with AI, blockchain, and robots*, OECD Publishing. [41]

OECD (s.d.), *Education continuity stories from the coronavirus crisis*, https://oecdedutoday.com/coronavirus/continuity-stories/ (consulté le 24 mai 2021). [10]

Rodrigo, M., N. Caluya et E. Cesar E. Vidal Jr (2015), « Igpaw: intramuros—design of an augmented reality game for philippine », *In: Proceedings of the 23rd International Conference on Computers in Education.* [4]

Shin, D. (2017), « The role of affordance in the experience of virtual reality learning: Technological and affective affordances in virtual reality », *Telematics and Informatics*, Vol. 34/8, pp. 1826-1836, http://dx.doi.org/10.1016/j.tele.2017.05.013. [5]

Shute, V. et Y. Kim (2014), « Formative and stealth assessment. In Handbook of research on educational communications and technology », dans *Handbook of research on educational communications and technology*, Springer. [22]

Shute, V. et J. Psotka (1996), « Intelligent tutoring systems: Past, Present and Future », dans *Handbook of Research on Educational Communications and Technology*, Scholastic Publications. [40]

Smolenski, N. (2021), « Blockchain for Education: A New Credentialing Ecosystem », dans *OECD Digital Education Outlook 2021: Pushing the frontiers with AI, blockchain, and robots*, OECD Publishing. [38]

Stephenson, N. (1998), *The diamond age, Penguin: London*, UK. [8]

Strauß, S. et N. Rummel (2020), « Promoting interaction in online distance education: designing, implementing and supporting collaborative learning », *Information and Learning Sciences*, Vol. 121/5/6, pp. 251-260, http://dx.doi.org/10.1108/ils-04-2020-0090. [28]

VanLehn, K. (2011), « The Relative Effectiveness of Human Tutoring, Intelligent Tutoring Systems, and Other Tutoring Systems », *Educational Psychologist*, Vol. 46/4, pp. 197-221, http://dx.doi.org/10.1080/00461520.2011.611369. [1]

Walkington, C. (2013), « Using adaptive learning technologies to personalize instruction to student interests: The impact of relevant contexts on performance and learning outcomes », *Journal of Educational Psychology*, Vol. 105/4, pp. 932-945, http://dx.doi.org/10.1037/a0031882. [18]

Walkington, C. et M. Bernacki (2019), « Personalizing Algebra to Students' Individual Interests in an Intelligent Tutoring System: Moderators of Impact », *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, Vol. 29/1, pp. 58-88, http://dx.doi.org/10.1007/s40593-018-0168-1. [19]

Wenger, E. (1987), *Artificial intelligence and tutoring systems: computational and cognitive approaches to the communication of knowledge*, Morgan Kaufmann Publishers Inc. [11]

Partie

1

3 Personnalisation de l'apprentissage : Vers une forme hybride des technologies d'apprentissage combinant l'humain et l'IA

Inge Molenaar
Faculté des sciences sociales, Université de Radbout, Pays-Bas

Ce chapitre présente l'état de la recherche et du développement en matière d'apprentissage personnalisé dans les laboratoires et instituts de recherche des pays de l'OCDE. Il décrit les dernières avancées dans le domaine de l'apprentissage personnalisé en s'appuyant sur un modèle d'automatisation à six niveaux qui structure les rôles de l'IA, des enseignants et des apprenants. Ce modèle montre dans quelle mesure les solutions mixtes combinent les forces de l'humain et de l'intelligence artificielle pour produire un apprentissage personnalisé. Les technologies d'apprentissage actuelles s'attachent surtout à diagnostiquer l'état des connaissances des élèves et à adapter les commentaires, les tâches et/ou les programmes de cours. Les frontières du développement sont délimitées par la prise en compte d'un éventail plus large de caractéristiques propres à l'apprenant comme l'autorégulation, la motivation et l'émotion.

Introduction

L'intelligence artificielle (IA) peut améliorer l'enseignement et l'apprentissage dans de nombreuses situations. L'instauration d'un dialogue entre chercheurs, entrepreneurs, décideurs politiques et professionnels de l'éducation pourrait offrir au secteur de l'éducation des solutions hybrides très prometteuses combinant IA et intervention humaine. Ce chapitre examine comment ces solutions s'appliquent à la personnalisation de l'apprentissage. L'apprentissage personnalisé à l'aide de la technologie est une tendance qui vise de plus en plus à adapter l'enseignement aux besoins individuels des apprenants (Aleven et al., 2016[1]). À l'origine, on suppose qu'il est possible d'optimiser le talent de chaque apprenant grâce à un environnement d'apprentissage adapté à ses besoins (Corno, 2008[2]). En général, tous les élèves d'une même classe suivent le même programme de cours, reçoivent la même instruction, accomplissent les mêmes tâches et reçoivent en grande partie des commentaires similaires. Ce modèle « industriel » d'enseignement étant largement critiqué (Robinson, 2010[3]), des propositions émergent pour développer des technologies permettant la transition vers une meilleure personnalisation. Pourtant, même s'il existe une grande variété de technologies d'apprentissage adaptables aux besoins de l'apprenant, telles que l'enseignement assisté par ordinateur (EAO), les technologies d'apprentissage adaptifs (TAA), les systèmes de tutorat intelligents (STI) et les jeux éducatifs, leur mise en œuvre dans les établissements scolaires s'est faite lentement (Tondeur et al., 2013[4]).

Toutefois, au cours des cinq dernières années, trois avancées ont amené les systèmes éducatifs à s'intéresser davantage à l'apprentissage personnalisé. Tout d'abord, les élèves disposent fréquemment d'un ordinateur chacun, ce qui facilite aujourd'hui l'utilisation régulière du numérique dans les salles de classe et l'intégration croissante des technologies dans les pratiques pédagogiques quotidiennes. Ensuite, l'exploitation des données visant à faciliter l'apprentissage s'est grandement améliorée dans le domaine en expansion de l'analyse des données d'apprentissage. Ceci montre que les données sont non seulement utiles dans les technologies d'apprentissage, mais sont aussi précieuses lorsqu'elles sont transmises directement aux enseignants et apprenants. Enfin, les technologies d'apprentissage qui font appel à l'analyse de l'apprentissage et à l'intelligence artificielle (IA) commencent à se répandre largement dans les établissements scolaires.

La génération actuelle de technologies pédagogiques personnalisées s'adapte le plus souvent aux élèves en fonction de prédictions sur les connaissances de l'apprenant dans la matière enseignée (Aleven et al., 2016[1]). Généralement, ces technologies adaptent les thèmes à étudier, les problèmes à résoudre ou les commentaires en fonction des réponses données (Vanlehn, 2006[5]). Cependant, outre la personnalisation en fonction des prédictions relatives aux connaissances des apprenants, un certain nombre d'autres caractéristiques de l'apprenant, comme l'émotion, la motivation, la métacognition et l'autorégulation, sont très utiles pour répondre aux besoins individuels des apprenants (Winne et Baker, 2013[6]) (D'Mello, 2021[7]).

En vue d'étoffer la réflexion sur le potentiel de l'analyse de l'apprentissage et de l'IA dans la personnalisation et l'enrichissement de l'enseignement, ce chapitre s'appuie sur un modèle à six niveaux d'automatisation défini par l'industrie automobile afin de l'appliquer au domaine de l'éducation. Dans ce modèle, le passage du contrôle entre l'enseignant et la technologie s'organise en tirant parti de la force combinée de l'intelligence humaine et artificielle et s'inscrit dans la logique de l'intelligence hybride qui met l'emphase sur l'interaction de l'homme et de l'IA (Kamar, 2016[8]). Le modèle présente les dernières avancées en matière de personnalisation de l'apprentissage et étaie la discussion sur les scénarios futurs combinant IA et éducation. C'est un exercice essentiel pour pouvoir envisager les futures évolutions et articuler les différents niveaux de personnalisation de l'apprentissage autour des rôles que joueront l'IA, les enseignants et les apprenants.

Le chapitre débute par un aperçu des niveaux d'automatisation de l'apprentissage personnalisé. En nous appuyant sur ce modèle, nous examinerons les dernières avancées en matière de personnalisation de l'apprentissage dans les laboratoires de recherche des pays de l'OCDE. Par la suite, nous brosserons un tableau de l'utilisation concrète des technologies d'apprentissage dans les établissements scolaires à l'aide d'exemples appliqués à grande échelle dans les établissements. Nous aborderons finalement les limites de la personnalisation de l'apprentissage. En particulier, les applications utilisant des flux de données multiples offrent de nouveaux moyens de détecter et de diagnostiquer cette vaste gamme de caractéristiques propres à l'apprenant qui permettent une personnalisation poussée de l'apprentissage. Malgré la mise en place rapide et à grande échelle des technologies éducatives, les technologies de pointe en matière de personnalisation de l'apprentissage ne sont pas assez largement répandues dans les établissements scolaires. Ces derniers mettent davantage en œuvre les technologies qui s'insèrent dans leurs modèles d'organisation traditionnels et qui respectent la capacité d'agir des enseignants. Le chapitre se termine sur trois recommandations à l'intention des décideurs politiques concernant la mise en œuvre à grande échelle des technologies de pointe : i) encadrer l'éthique dès la conception, notamment en matière de transparence et d'utilisation des données ; ii) améliorer les technologies d'apprentissage grâce à des partenariats public-privé ; et iii) faire en sorte que les enseignants et les professionnels de l'éducation soient parties prenantes de ces transformations.

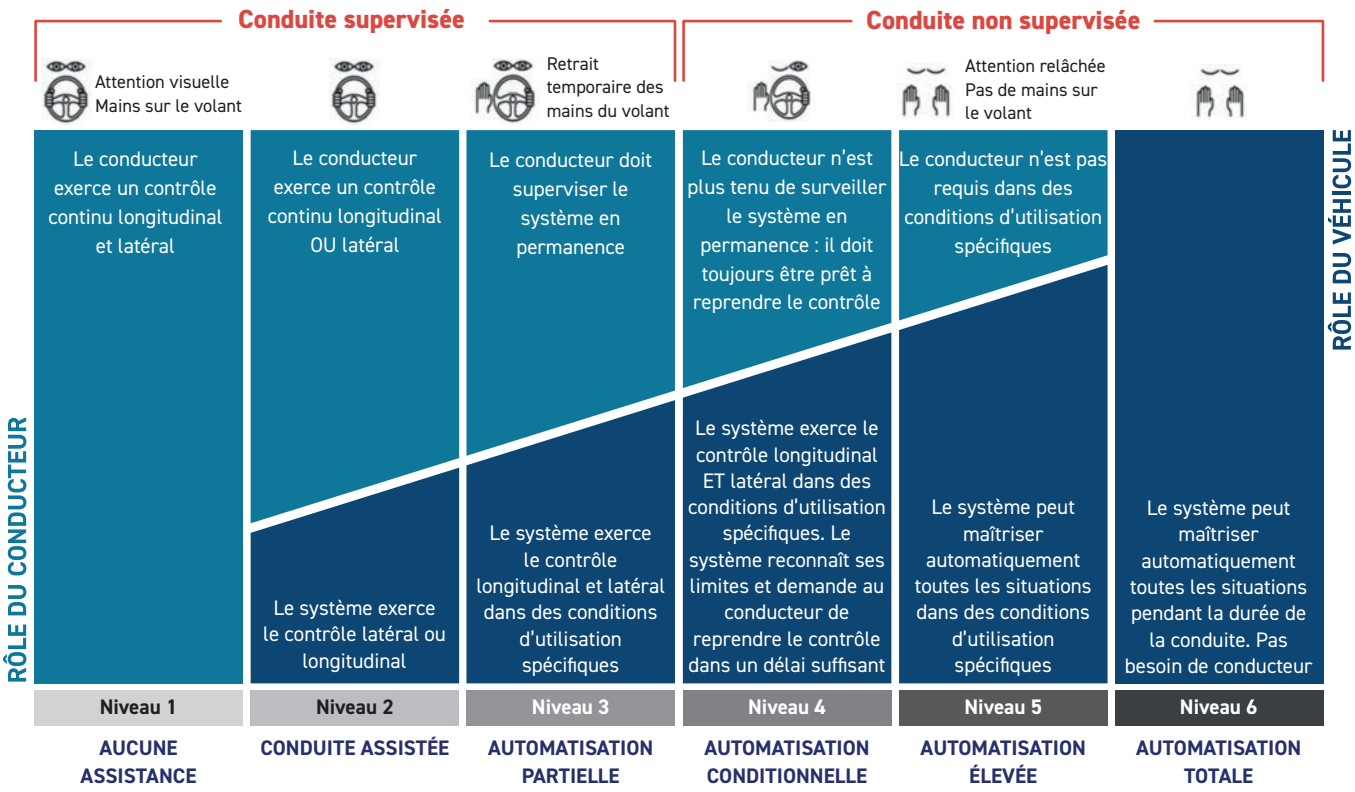
Les systèmes hybrides humains-IA : le rôle des enseignants et de la technologie

En engrangeant davantage de données et en devenant sans cesse plus intelligentes, les technologies ouvrent une nouvelle ère d'interaction entre l'homme et l'IA (Kamar, 2016[8]). L'apprentissage s'adaptera davantage aux caractéristiques individuelles de l'apprenant. Beaucoup s'attendent à ce que la tendance vers la personnalisation de l'apprentissage se poursuive (Holmes et al., 2018[9]). En même temps, l'humain et l'intelligence artificielle (IA) fusionneront dans des systèmes hybrides humains-IA dans divers domaines (Harari, 2018[10]). Par exemple, bien que les voitures autonomes soient destinées à remplacer un jour les conducteurs humains, elles ne sont aujourd'hui qu'une aide à la conduite (Awad et al., 2018[11]). De même, les systèmes experts d'IA dans le domaine médical aident les médecins à prendre des décisions, mais ne les remplacent pas (Topol, 2019[12]). L'une des

caractéristiques déterminantes d'un système hybride est que les frontières entre l'IA et la prise de décision de l'humain fluctuent. Dans les voitures autonomes, la conduite repose sur l'IA, mais lorsque la situation devient trop complexe, le contrôle revient à l'humain.

Afin de différencier les capacités de conduite autonome nécessaires aux voitures pour qu'elles soient totalement automatisées, la société des ingénieurs automobiles (SAE) (2016) a établi six niveaux d'automatisation (Graphique 3.1). Ces niveaux s'appuient sur des travaux antérieurs qui examinaient les différents degrés d'automatisation et les conséquences qui en découlent pour les humains dans différents contextes (Parasuraman, Sheridan et Wickens, 2000[13]). Ces six niveaux d'automatisation marquent différentes étapes du développement d'un véhicule autonome. À chaque étape, le contrôle passe un peu plus des mains du conducteur humain à la technologie de conduite autonome. Plus les niveaux s'élèvent, plus le contrôle humain diminue, tandis que celui de la technologie de conduite autonome augmente pour atteindre une conduite totalement autonome dans toutes les situations. Il faut souligner cependant que l'automatisation totale ne sera probablement jamais souhaitable dans des domaines spécifiques comme ceux de l'éducation ou de la médecine.

Graphique 3.1 Six niveaux d'automatisation pour un véhicule autonome

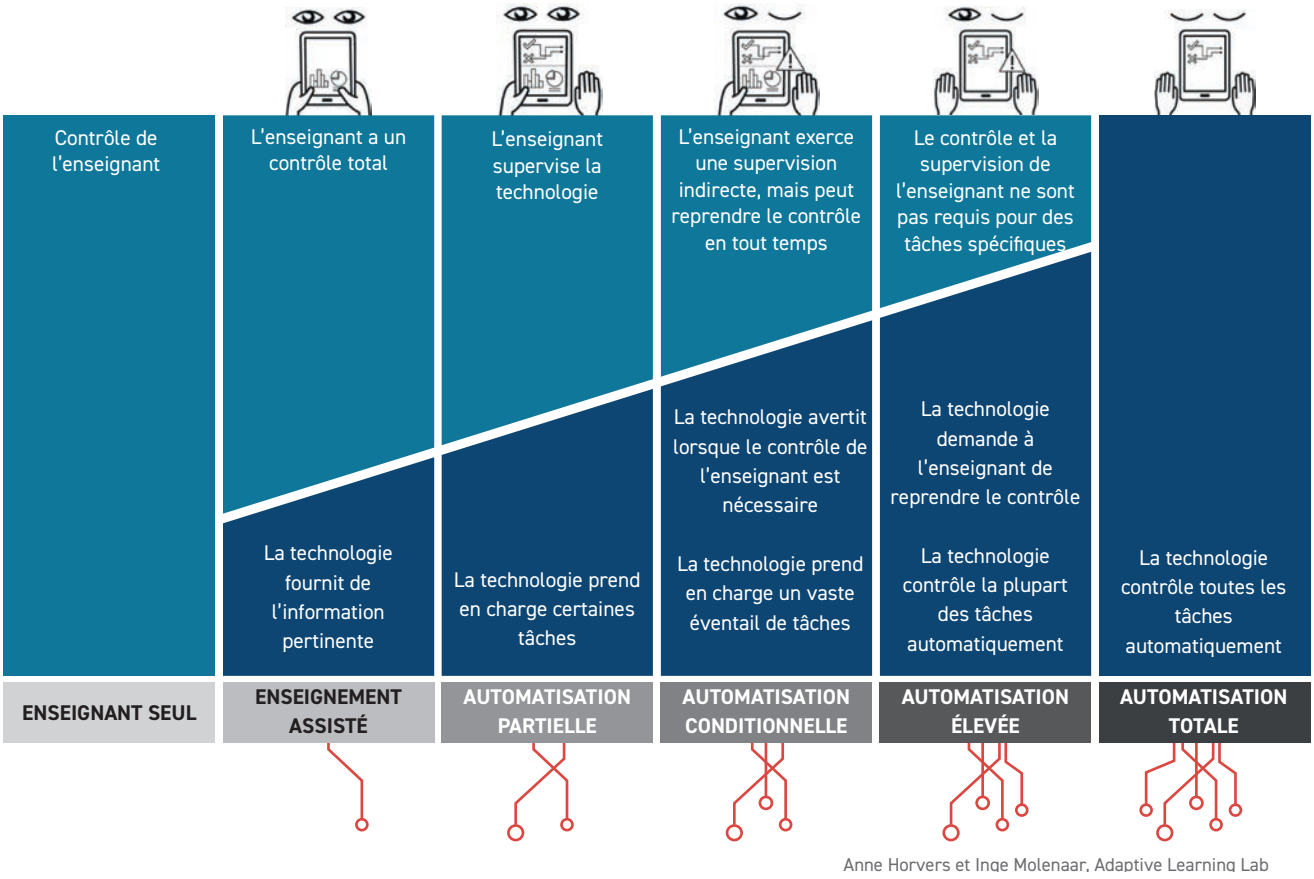


Source: Illustration - Mike Lemanski / ZF TRW; The Society of Automotive Engineers (https://www.sae.org/).

Dans les trois premiers niveaux, le conducteur contrôle le véhicule, tandis que dans les trois derniers le contrôle du véhicule bascule du côté de la technologie de conduite autonome. Dans la conduite assistée (niveau 1), la technologie de conduite autonome fournit des informations pertinentes au conducteur. Dans une conduite autonome partielle (niveau 2), la technologie contrôle la conduite dans des situations bien précises, par exemple sur une autoroute dans de bonnes conditions météorologiques, mais le conducteur gère la technologie en tout temps. En revanche, dans l'automatisation conditionnelle (niveau 3), c'est la technologie de conduite autonome qui prend le contrôle, mais le conducteur doit être prêt à reprendre le véhicule en main à tout moment. À l'heure actuelle, les voitures à conduite autonome se situent entre automatisation partielle et automatisation conditionnelle. Dans le domaine médical, on estime être entre les niveaux d'automatisation assistée et d'automatisation partielle (Topol, 2019[12]). Dans ce domaine, l'IA facilite souvent la prise de décisions médicales, les systèmes experts, par exemple, détectent les tumeurs dans les radiographies, mais les médecins continuent de poser le diagnostic final du patient et de choisir le traitement qui convient le mieux.

À notre connaissance, les niveaux d'automatisation n'ont pas encore été transposés au domaine de l'éducation. Grâce à ce modèle, on peut situer les plus récentes technologies d'apprentissage et voir comment elles sont appliquées dans les établissements. Il peut nous aider à mieux comprendre l'écart existant entre les plus récentes avancées de ces technologies et l'utilisation qui en est faite au quotidien dans les établissements sous l'angle d'un pilotage humain.

Graphique 3.2 Six niveaux d'automatisation de l'apprentissage personnalisé



Source: Illustration - Anne Horvers et Inge Molenaar, Adaptive Learning Lab https://www.ru.nl/bsi/research/group-pages/adaptive-learning-lab-all/.

Le Graphique 3.2 illustre les six niveaux d'automatisation appliqués au domaine des technologies pédagogiques. Les lignes tout en bas du modèle reflètent l'idée que des flux grandissants de données seront utilisés dans la transition vers l'automatisation complète. Ces flux peuvent permettre de détecter et de poser un diagnostic plus précis sur les apprenants et leur environnement. En haut du modèle, on peut visualiser l'évolution du contrôle humain à travers les différents niveaux. Les mains sur la tablette symbolisent le niveau de contrôle de l'enseignant. Les deux mains sur la tablette symbolisent le contrôle total de l'enseignant, une seule main ou pas de main symbolisant le contrôle partiel, c'est-à-dire un contrôle secondaire ou aucun contrôle de sa part. Les yeux représentent le niveau requis de suivi de l'enseignant, à savoir un suivi complet, partiel, ponctuel ou aucun. Le triangle d'avertissement indique que l'IA peut demander à l'enseignant de reprendre le contrôle à des moments critiques. Dans la prochaine section, nous verrons comment l'IA utilise différents types de données pour effectuer ses opérations.

Au niveau 0, l'enseignant a une maîtrise complète de l'environnement d'apprentissage et la technologie pédagogique n'a aucune fonction d'organisation. C'était la norme, il y a environ une quinzaine d'années, dans l'enseignement dans la plupart des pays de l'OCDE.

Au niveau 1, l'enseignement assisté, les enseignants ont un contrôle total, la technologie ne leur fournissant qu'une aide supplémentaire dans l'organisation de l'environnement d'apprentissage. La technologie procure un accès au matériel pédagogique et à des informations complémentaires sur les activités de l'apprenant, mais elle ne contrôle aucun élément de l'environnement d'apprentissage. Ainsi, les environnements d'apprentissage électroniques et les systèmes de gestion de l'apprentissage qui dispensent le matériel pédagogique représentent des formes d'aide à l'enseignement. Il en est de même pour les tableaux de bord des enseignants qui fournissent des informations simultanées sur les activités, les progrès et la réussite des élèves (Dillenbourg, 2021[14]). Grâce à ces informations, les enseignants peuvent prendre des décisions pédagogiques avant et pendant les cours (Bodily et al., 2018[15]). Le tableau de bord offre, par exemple, une vue d'ensemble des progrès des élèves et permet à l'enseignant d'adapter son prochain cours. En ayant un aperçu des bonnes et mauvaises réponses des élèves, l'enseignant peut détecter les élèves ayant besoin de commentaires supplémentaires ou d'un enseignement plus approfondi (Molenaar et Knoop-van Campen, 2019[16]). Il existe également des systèmes grâce auxquels les enseignants peuvent suivre les comportements des élèves, ce qui leur permet d'estimer si ceux-ci ont besoin d'un rattrapage proactif (Miller et al., 2015[17]). En résumé, les fonctions des technologies d'apprentissage au niveau de l'enseignement assisté ont pour but d'aider les enseignants, ainsi que de décrire et refléter le comportement des apprenants. L'enseignant contrôle et supervise. Cette pratique est la norme dans les pays de l'OCDE où les systèmes informatiques se répandent plus largement dans les classes.

Dans l'automatisation partielle (niveau 2), l'enseignant laisse la technologie prendre en charge l'accomplissement de tâches d'organisation spécifiques. Ainsi, le système Snappet (voir Encadré 3.1) choisit des exercices adaptés aux besoins de chaque élève ou fournit des commentaires sur la solution apportée par l'élève à un exercice de maths. En laissant la technologie se charger de ces tâches, l'enseignant peut consacrer du temps à d'autres activités qui ne sont pas à la portée de la technologie, telles que donner des commentaires détaillés aux élèves ou aider ceux qui ont besoin d'explications supplémentaires. Dans le cadre de l'automatisation partielle, les fonctions de la technologie d'apprentissage sont catégorisées comme suit : *décrire, diagnostiquer, conseiller* et dans certains cas précis, *prendre des mesures*. À ce niveau, les enseignants contrôlent la plupart des tâches d'organisation de l'environnement d'apprentissage, à quelques exceptions près où c'est la technologie qui prend le relais. Les enseignants sont encore totalement maîtres du fonctionnement de la technologie dans laquelle leurs tableaux de bord ont souvent un rôle essentiel.

Au niveau 3 de l'automatisation conditionnelle, la technologie prend en charge une plus large part des tâches relatives à l'organisation de l'environnement d'apprentissage. Les enseignants occupent encore une position centrale dans l'organisation de l'environnement d'apprentissage et ils supervisent le fonctionnement des technologies. Par exemple, le système Cognitives Tutor (voir l'Encadré 3.2) choisit les exercices et donne un retour d'information à chaque étape de la résolution de problèmes en fonction des progrès des élèves (Koedinger et Corbett, 2006[18]). La technologie s'occupe à la fois de la sélection des exercices et des retours d'information. À ce niveau, il est essentiel que la technologie sache déceler dans quelles conditions elle fonctionne efficacement et quand l'enseignant doit reprendre le contrôle. Dans ces moments décisifs, la technologie avertit l'enseignant qu'il doit agir. Par exemple, lorsqu'un élève ne progresse pas au rythme prévu, le système en informe l'enseignant pour qu'il intervienne (Holstein, McLaren et Aleven, 2017[19]). L'enseignant peut alors rechercher les raisons de ce retard et prendre des mesures correctives. Les fonctions de la technologie d'apprentissage dans l'automatisation conditionnelle sont : intervenir beaucoup plus largement dans l'environnement d'apprentissage ; avertir et conseiller lorsque l'intervention humaine est nécessaire.

Dans l'automatisation élevée (niveau 4), la technologie contrôle totalement l'organisation de l'environnement d'apprentissage dans un domaine précis. Elle réagit efficacement dans la plupart des situations anticipées dans le domaine et tient compte de la diversité des apprenants. Les enseignants n'ont pas besoin de se tenir prêts à reprendre le contrôle et leur supervision n'est pas nécessaire. Dans certaines situations plus pointues, la technologie redonne le contrôle ou la supervision aux enseignants. Les systèmes d'apprentissage autonomes conçus pour aider individuellement les apprenants dans des matières comme les maths, les sciences et les langues peuvent atteindre ce niveau. Par exemple, le système MathSpring est un système de tutorat intelligent qui guide l'apprenant dans le choix de ses objectifs d'apprentissage, lui fournit un enseignement personnalisé, des possibilités de s'exercer et des commentaires afin d'atteindre les objectifs fixés (Arroyo et al., 2014[20]). En ce qui concerne la technologie, l'enseignant n'effectue aucune tâche de contrôle ou de supervision. À ce jour, ce type

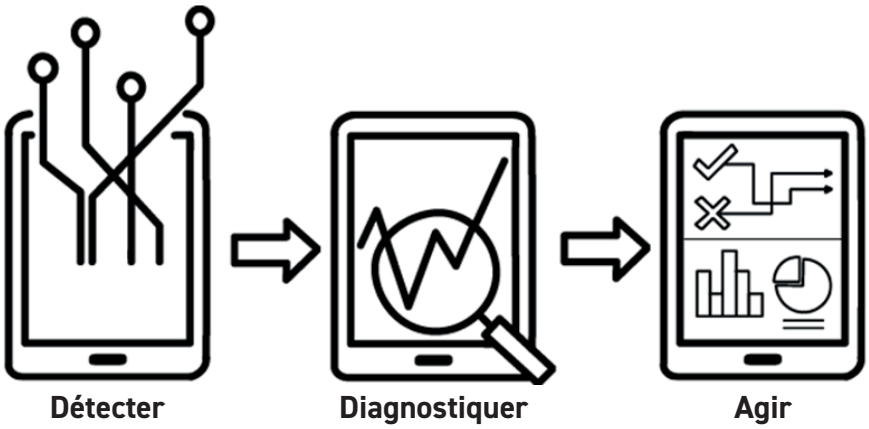
de technologie d'apprentissage hautement autonome reste rare et n'intervient que de manière très limitée dans le programme d'enseignement. Les fonctions de la technologie d'apprentissage dans ce niveau d'automatisation élevée sont : *piloter* les apprenants et, dans des circonstances exceptionnelles, *avertir* les autres humains qu'ils doivent prendre des mesures.

Au niveau 5 de l'autonomie complète, la technologie assume automatiquement l'apprentissage dans tous les domaines et toutes les situations. Elle se substitue totalement à l'enseignant. Ainsi, la technologie de l'apprentissage des langues Alelo[1], employée dans l'apprentissage d'une deuxième langue, pourrait bien évoluer en ce sens. Elle utilise déjà le programme de traitement du langage naturel qui analyse l'usage de la langue chez les élèves, fournit des commentaires, choisit les nouveaux objectifs d'apprentissage et adapte le cours et la pratique en vue d'améliorer le niveau de langue des élèves. Ces caractéristiques pourraient constituer les premières étapes vers un apprentissage complètement automatisé. Dans le contexte d'un contrôle total, la technologie piloterait l'apprentissage de l'apprenant de A à Z. Ce niveau représente le paradigme de nombreuses solutions d'apprentissage développées pour le marché de l'apprentissage informel dans un cadre extrascolaire, de l'apprentissage des langues à l'enseignement de la musique ou à la préparation d'un examen sur le code de la route. Il est primordial de se demander dans quelle mesure l'application de ces technologies serait viable dans le contexte des établissements scolaires et ce qu'elle impliquerait en matière de responsabilité des enseignants et de justification de leur rôle.

Réflexion prospective : le rôle ultime de l'IA

En plus de définir le rôle des enseignants et de l'IA, les six niveaux d'automatisation nous aident à réfléchir sur les attentes à l'égard du rôle ultime de l'IA. En ce qui concerne les voitures autonomes, il est communément admis qu'on n'atteindra pas l'automatisation totale sur toutes les routes et dans toutes les situations (Shladover, 2018[21]). Trois niveaux de contraintes l'en empêchent : i) la détection de l'environnement grâce à des capteurs, ii) le diagnostic précis des risques, iii) la détermination des actions adéquates. En ce qui concerne plus particulièrement le dernier aspect, la recherche a démontré qu'il était compliqué de déterminer une action dans des conditions difficiles (Awad et al., 2018[11]). De même, dans le cas du rôle de l'IA dans la prise de décisions médicales, il est peu probable qu'il dépasse un jour le niveau de l'automatisation conditionnelle (Topol, 2019[12]). Pourtant, la capacité de traiter de vastes ensembles de données de manière rapide, précise et peu coûteuse, ainsi que la capacité de détecter et de diagnostiquer beaucoup mieux que l'humain sont présentées comme les fondements de la médecine ultra performante.

Graphique 3.3 Vers une éducation performante avec l'IA : trois défis à relever



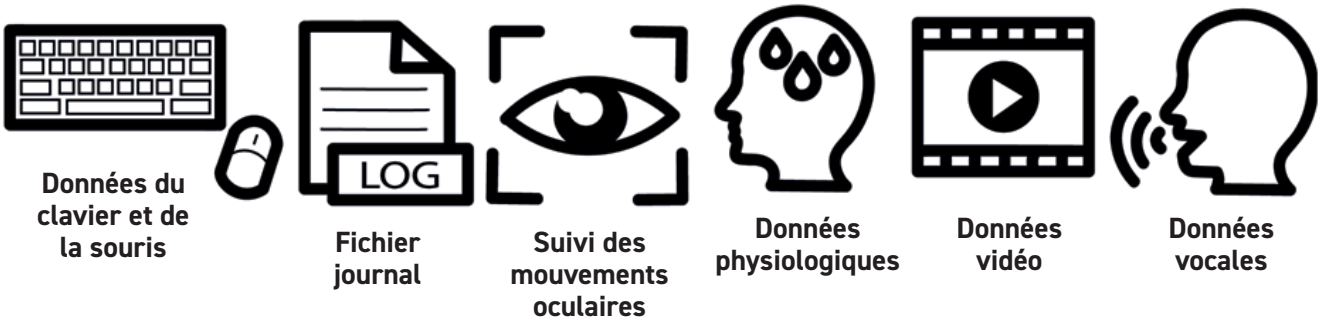
Source: Illustration - Anne Horvers et Inge Molenaar, Source: Adaptive Learning Lab, https://www.ru.nl/bsi/research/group-pages/adaptive-learning-lab-all.

Pour les mêmes raisons, ces éléments formeront également les fondements d'une éducation performante (voir le Graphique 3.3). Historiquement, le modèle dominant d'IA dans l'éducation est l'automatisation complète, c'est-à-dire un élève apprenant sur un ordinateur intelligent et des enseignants remplacés par la technologie (Blikstein, 2018[22]). Ce modèle a fait son apparition dans les années 1950 avec les machines à enseigner de Skinner (Wingo, 1961[23]) et s'est développé avec les systèmes de tutorat intelligents. La recherche a montré qu'un élève aidé individuellement par un tuteur expérimenté peut améliorer sa performance d'apprentissage de deux écarts-types par rapport à la situation où les élèves apprennent dans les conditions classiques d'une salle de classe (Bloom, 1984[24]). Cela signifie que 98 % des élèves réussiraient mieux grâce à un tutorat humain particulier que grâce à un enseignement classique en classe. Depuis lors, ce « *problème des deux sigmas* » a servi d'argument principal dans la personnalisation de l'apprentissage au moyen des technologies d'apprentissage. Au cœur de cette analogie se trouve l'hypothèse que la technologie, tout comme le tuteur humain, est à même de comprendre un apprenant. La nouvelle analyse des données de Bloom effectuée par VanLehn suggère que l'avantage est moindre en faveur des tuteurs humains (un écart-type d'environ 0,75), et démontre également que des systèmes de tutorat intelligent bien développés peuvent s'avérer tout aussi efficaces que des tuteurs humains (VanLEHN, 2011[25]). Dans certains cas spécifiques, la technologie a vraiment les mêmes capacités que les bons tuteurs humains (VanLEHN, 2011[25]), mais cela se limite à des domaines restreints et bien spécifiques. Il convient de retenir que les objectifs de l'éducation vont bien au delà du tutorat dans la matière. La question est de savoir si le but est d'optimiser la technologie pour l'amener à une automatisation complète ou d'optimiser les systèmes combinant humain et IA dans les autres niveaux d'automatisation. Une partie de la réponse repose sur nos capacités à détecter, diagnostiquer et agir. De telles avancées dans la personnalisation de l'apprentissage, tout comme les avancées en matière de véhicules autonomes, reposent sur trois points importants : i) notre capacité à suivre les apprenants dans leur environnement ; ii) notre capacité à diagnostiquer la situation actuelle des apprenants et à anticiper leur développement ; iii) notre capacité à déterminer alors les mesures convenant le mieux à l'optimisation de l'apprentissage. Nous allons maintenant examiner notre capacité actuelle à chaque niveau.

Détecter : suivi des apprenants dans leur environnement

Notre capacité de suivi des apprenants dans leur environnement s'améliore petit à petit (Baker et Inventado, 2014[26] ; Winne et Baker, 2013[6]). Les apprenants ne se ressemblent pas et leurs différences constituent des indicateurs significatifs pour la personnalisation de l'apprentissage (Azevedo et Gašević, D., 2019[27]). La recherche a toujours beaucoup compté sur l'utilisation de données de journal des technologies d'apprentissage pour suivre les apprenants. Bien que cette utilisation reste importante dans le domaine de la personnalisation de l'apprentissage, on fait de plus en plus appel à d'autres sources de données pour comprendre les caractéristiques essentielles des apprenants. On peut considérer ces sources de données multimodales comme des données physiologiques, comportementales et contextuelles.

Graphique 3.4 Des sources de données multimodales pour le traçage des apprenants et de leur environnement



Source: Illustration - Anne Horvers et Inge Molenaar / Adaptive Learning Lab.

Les *données physiologiques* correspondent aux réponses corporelles des élèves durant l'apprentissage. La fréquence cardiaque (FC), l'activité électrodermale (AED), la tension artérielle (TA), la température de la peau et les logiciels de capture des expressions du visage pour évaluer l'état des apprenants en sont autant d'exemples.

Les *données comportementales* détectent des aspects du comportement de l'élève durant l'apprentissage. L'une des sources majeures des données comportementales sont les fichiers-journaux. Ces données répertorient à la milliseconde les séquences des interactions de l'apprenant et de la technologie qui laissent une trace des activités effectuées à l'aide des technologies d'apprentissage. Une autre source de données comportementales sont les mouvements de la souris et les saisies du clavier. Les mouvements oculaires révèlent ce que l'élève regarde durant l'apprentissage et peuvent servir à détecter ce qui accapare l'attention de l'élève, le visionnement de sources multimédia et la lecture dans le cadre des technologies d'apprentissage (Mudrick, Azevedo et Taub, 2019[28]). Des appareils portatifs de suivi oculaire évaluent également l'interaction avec les objets et l'interaction sociale durant l'apprentissage. En outre, des données spécifiques de suivi oculaire comme la dilatation des pupilles et le clignement des yeux ont aussi été mises en corrélation avec la charge cognitive et les états affectifs.

Les *données contextuelles* procurent des données plus complètes sur les interactions de l'apprenant avec la technologie d'apprentissage, les humains et les ressources dans l'environnement pédagogique. Les enregistrements vidéo et de la voix contiennent des données intéressantes sur la manière dont l'apprenant interagit avec son environnement. Bien que ces données permettent des analyses approfondies du processus d'apprentissage, elles reposent surtout sur le codage, la notation, les annotations, la compréhension et leur interprétation par les chercheurs. Ceci pourrait radicalement changer prochainement grâce aux progrès dans les techniques d'IA, puisque quelques premiers exemples voient déjà le jour (Stewart et al., 2019[29]). Finalement, il ne faudrait pas négliger l'auto-évaluation, car c'est une source valable de données.

En résumé, l'utilisation des sources de données multimodales peut faire progresser le traçage des apprenants et de leur environnement, ce qui est une étape cruciale vers une automatisation plus poussée.

Diagnostic : évaluation de l'état actuel des apprenants

L'étape suivante consiste à analyser les données afin de poser un diagnostic sur l'état actuel des apprenants et anticiper leur évolution future. Une grande partie des travaux s'est intéressée au diagnostic de l'état des connaissances des élèves et de leur progrès durant l'apprentissage. De nombreux modèles ont été mis au point pour évaluer les connaissances des apprenants durant leur apprentissage en fonction du comportement des élèves lors de la résolution de problèmes et de leurs réponses aux problèmes (Desmarais et Baker, 2011[30]). Nous en discutons plus en détail dans la section suivante. La recherche s'efforce de plus en plus d'élargir le champ d'évaluation des états des apprenants, comme ceux de la motivation, la métacognition et les émotions (Bosch et al., 2015[31]). Une grande partie de ces travaux sont effectués dans des matières structurées comme les maths et la physique où les élèves donnent des réponses claires à des problèmes bien précis. Nous observons également une tendance grandissante vers un diagnostic spécifique à la matière et au contexte.

Les avancées dans des techniques spécifiques de l'IA permettent l'évaluation de caractéristiques qui sont primordiales dans les processus d'apprentissage et de développement. Ainsi, les avancées dans la *reconnaissance vocale automatisée* permettent de détecter la manière dont les élèves apprennent à lire[2]. L'analyse de l'oralisation d'un enfant lors de la lecture détectée par reconnaissance vocale automatisée permet d'extraire des particularités qui facilitent le diagnostic sur la capacité de lecture de l'enfant, telles que : les lettres qu'un enfant reconnaît bien ; la vitesse à laquelle il déchiffre des mots de différentes longueurs ; et le type de mots qui ont été automatisés. Ces particularités permettent de poser un diagnostic précis sur l'évolution de la capacité de lecture d'un enfant au fil du temps et peuvent, par conséquent, servir à personnaliser l'enseignement. En plus de la reconnaissance vocale (du texte à la parole), un premier logiciel de diagnostic de la lecture (Lexplore[3]) est également disponible, qui utilise des données de suivi oculaire pour diagnostiquer l'évolution de la lecture des apprenants.

Dans le même ordre d'idées, on peut diagnostiquer l'évolution des compétences en écriture et même les déficiences motrices comme la dysgraphie (Asselborn et al., 2018[32]). La méthode d'Asselborn évalue les compétences en écriture d'un élève à l'aide d'une tablette et d'un stylo numérique. Lors de l'apprentissage de l'écriture, on peut mesurer des paramètres importants liés à la trajectoire de développement de l'écriture, tels que la vitesse de l'écriture, la force de la pression du stylo et son orientation. La méthode peut extraire jusqu'à 56 paramètres liés aux compétences en écriture de l'élève, qui peuvent, par conséquent, mener à la mise en place d'un tutorat

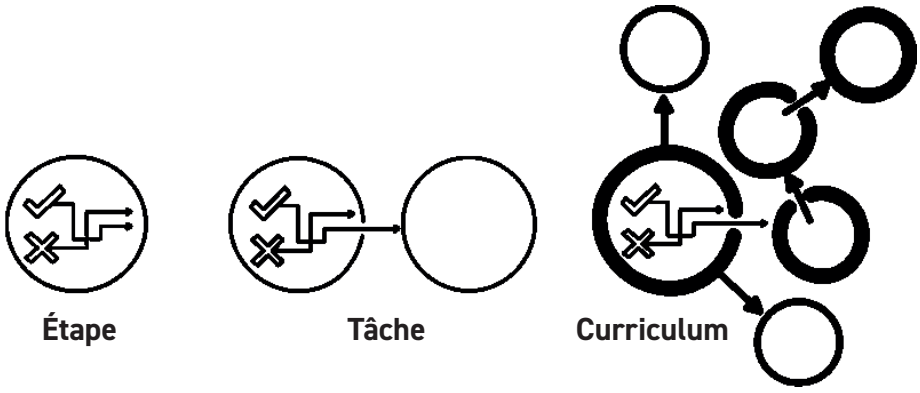
afin d'améliorer son écriture. Les dépistages de la dyslexie fondés sur le type d'erreurs faites par l'élève sur un ensemble de problèmes spécifiques (Dytective[4]), les diagnostics sur le développement du langage (Lingvist[5]) et sur les compétences fonctionnelles en écriture (Letrus[6]) sont d'autres exemples de mécanismes de diagnostics propres à une matière.

En résumé, le développement d'outils de diagnostic génériques et spécifiques dans une matière basés sur les techniques d'IA avancées nous aide à mieux comprendre l'état des apprenants et à prévoir leur évolution. C'est une deuxième étape importante vers des niveaux avancés d'automatisation des technologies d'apprentissage.

Agir : déterminer les actions pertinentes

La dernière étape consiste à interpréter le diagnostic posé sur l'état de l'apprenant et à le traduire en actions qui optimiseront l'apprentissage (Shute et Zapata-Rivera, 2012). Passer du diagnostic à des interventions pédagogiques efficaces est sans doute l'étape la plus difficile (Koedinger, Booth et Klahr, 2013[33]). Comme le décrit le document cadre *Knowledge-Learning-Instruction Framework* (savoirs-apprentissage-enseignement) (Koedinger, Corbett et Perfetti, 2012[34]), il existe une infinité de modèles de réponses possibles, mais peu d'éléments factuels quant aux interventions les plus efficaces dans certaines circonstances. Même s'il est désormais possible de poursuivre des recherches avancées à grande échelle en éducation sur les interventions efficaces dans le cadre des technologies d'apprentissage, les contraintes relatives au financement de la recherche empêchent le terrain de tirer pleinement parti de ces opportunités. La prise en compte de cette complexité a entraîné le développement de solutions analytiques qui fournissent aux enseignants des informations supplémentaires leur permettant d'apporter des réponses pédagogiques viables. Ainsi, les tableaux de bord des enseignants qui fournissent des informations simultanées sur les activités, les bonnes réponses et les progrès des apprenants permettent aux enseignants d'améliorer leurs pratiques de rétroaction et les résultats d'apprentissage (Knoop-van Campen et Molenaar, 2020[35] ; Holstein, McLaren et Aleven, 2018[36]). Ces tableaux se sont révélés être une intervention efficace en soi et constituent des outils permettant de définir des interventions efficaces que les technologies pédagogiques se chargeront d'exécuter. La distinction entre analyse extraite et intégrée est une étape essentielle pour développer des modèles de réponses avancés qui tiennent compte des connaissances et compétences pédagogiques des enseignants et reconnaissent la nécessité de développer une meilleure compréhension de ces relations dans le cadre de la recherche (Wise, 2014[37]).

Graphique 3.5 Trois types d'interventions dans les actions indépendantes de la matière



Source: Illustration - Anne Horvers et Inge Molenaar / Adaptive Learning Lab.

Lorsque des adaptations génériques de la matière sont effectuées dans les technologies d'apprentissage, elles mettent généralement en œuvre trois types d'actions : voir le Graphique 3.5 (Vanlehn, 2006[5]). La première est une action au niveau de l'étape : les commentaires sont personnalisés en fonction des besoins de l'apprenant dans l'exercice. Les apprenants reçoivent des commentaires détaillés leur indiquant la bonne méthode à suivre au cours d'une étape particulière de l'exercice de résolution de problèmes. La deuxième est une action au niveau de la tâche : la tâche ou le problème pertinent suivant est choisi en fonction des performances de l'élève. Les élèves doivent travailler sur un exercice en adéquation avec leur socle de connaissances actuel, en fonction de leurs

réponses au problème précédent. La troisième est une action au niveau du programme de cours : l'organisation des sujets d'enseignement est adaptée à l'apprenant. Cette action implique de faire une sélection approfondie des sujets les mieux adaptés à la trajectoire de développement des élèves. Par contraste, les adaptations spécifiques à une matière suivent une logique qui est adaptée à la matière, comme le montre l'exemple de la lecture décrit ci-dessus où les adaptations sont motivées par des connaissances approfondies sur le développement de la lecture.

En conclusion, la détection et le diagnostic sont mis en œuvre dans différentes actions pédagogiques en lien avec la technologie d'apprentissage, adaptant les étapes, les tâches ou le type d'enseignement. En plus de la mise en œuvre directe, il est également possible de faire remonter le diagnostic à l'enseignant pour qu'il détermine des expériences pédagogiques efficaces. Cette tendance est le reflet d'une prise de conscience que les interventions basées sur des données probantes sont essentielles pour progresser vers une automatisation plus poussée dans le domaine de l'éducation. Comme mentionné plus haut, une grande partie des travaux dans ce domaine se sont concentrés sur la détection, le diagnostic et les actions basées sur les connaissances des élèves. Dans la section suivante, nous examinerons les récentes innovations dans le domaine.

La personnalisation en fonction des connaissances des élèves

La personnalisation en fonction des connaissances et compétences de l'apprenant étant l'approche la plus répandue, nous continuerons d'étudier la détection, le diagnostic ainsi que l'adoption de la personnalisation en fonction des connaissances et compétences des apprenants. La plupart des travaux de recherche se sont penchés sur la détection à partir des données de journal, le diagnostic sur l'état des connaissances des élèves et l'évolution de ces connaissances au cours de l'apprentissage, ainsi que leur transposition en actions pédagogiques. Comme mentionné plus haut, les adaptations en fonction du diagnostic posé sur la connaissance des élèves sont en général fournies au niveau de l'étape, au niveau de la tâche ou du programme de cours.

L'adaptation des problèmes au niveau de la tâche

Traditionnellement, les adaptations au niveau de la tâche se faisaient en fonction des évaluations des connaissances des élèves *avant* de commencer l'apprentissage. Il en est ainsi pour les exercices et pratiques mis en œuvre à des fins de rattrapage, c'est-à-dire pour aider les élèves à combler des lacunes précises dans leurs connaissances. On a constaté que les programmes d'enseignement assisté par ordinateur (EAO) améliorent l'apprentissage en s'appuyant sur les résultats des élèves à une évaluation formative pour sélectionner un ensemble prédéfini de problèmes adaptés au niveau de connaissances des élèves, mais ces programmes n'ont pas la souplesse nécessaire pour s'adapter à l'évolution des connaissances des apprenants durant leur apprentissage (Dede, 1986[38]).

Pour répondre à cette difficulté, les travaux de recherche se sont penchés sur la détection de l'évolution des connaissances des élèves pendant l'apprentissage. Les technologies détectent l'évolution des connaissances *au cours* de l'apprentissage en s'appuyant sur les données de journal, telles que l'exactitude des réponses et le temps de réponse (Koedinger et Corbett, 2006[18]). Ce développement s'appuie sur les hypothèses théoriques de la *pédagogie de la maîtrise selon* lesquelles chaque étudiant a des besoins individuels en ce qui concerne l'enseignement, le type de soutien et sa durée (Bloom, 1984[24]). La première étape consiste à adapter le temps alloué à l'élève pour apprendre un sujet spécifique (Corbett et Anderson, 1995[39]). Le raisonnement est le suivant : avant de passer à un autre sujet, l'apprenant doit maîtriser les sujets préalables. Les réponses de l'élève permettent à la technologie de déterminer s'il maîtrise suffisamment un sujet spécifique pour pouvoir passer à un autre. Ainsi, l'élève bénéficie d'une durée d'apprentissage personnalisée lui permettant de travailler suffisamment longtemps sur un sujet pour pouvoir le maîtriser.

En plus de l'individualisation de la durée de l'apprentissage consacré à un sujet, les technologies d'apprentissage peuvent également adapter chaque problème aux connaissances de l'élève. La technologie d'apprentissage adaptif *mathgarden*, par exemple, évalue les connaissances actuelles de l'élève afin de déterminer la tâche mathématique suivante qui lui conviendra le mieux (Klinkenberg, Straatemeier et van der Maas, 2011[40]). De cette manière, non seulement le temps nécessaire pour arriver à maîtriser un sujet, mais aussi le rythme d'apprentissage de l'élève sont personnalisés. Grâce à ces technologies d'apprentissage, les exercices correspondent au niveau de connaissance détecté chez l'élève. Deux éléments entrent en jeu : i) tous les problèmes sont évalués en fonction de leur difficulté et ii) les connaissances des élèves sont évaluées en fonction de leurs réponses à ces problèmes.

C'est ainsi que la technologie permet d'adopter une approche adaptive grâce à laquelle elle choisit des problèmes correspondant au niveau de difficulté relative de chaque élève. Un certain nombre de pays de l'OCDE ont désormais mis en place ces technologies à grande échelle (voir Encadré 3.1).

L'adaptation des commentaires au niveau de l'étape

En plus des adaptations au niveau de la tâche, un ensemble de technologies opère des adaptations au niveau de l'étape. On résout, par exemple, des problèmes de maths complexes en plusieurs étapes. Dans des matières structurées comme les maths, la physique et la chimie, ces étapes peuvent être reliées aux sujets spécifiques qu'elles abordent. À partir de ces informations, les algorithmes peuvent non seulement détecter le niveau de connaissances actuelles des élèves, mais également analyser le type d'erreurs qu'ils commettent (Baker, Corbett et Aleven, 2008[41]). Celles-ci sont de deux types : i) les erreurs que l'élève commet alors même qu'il connaît les réponses, en inversant, par exemple, les chiffres et ii) les erreurs qu'il commet lorsqu'il a mal compris, ce qui entraîne une mauvaise réponse. Cette distinction est importante, car elle permet de déterminer le commentaire adapté. En fonction du type d'erreurs commises, la technologie peut adapter le commentaire aux besoins de l'élève ou suggérer des étapes de résolution de problèmes pour arriver à une bonne compréhension. Ainsi, à la fin d'une première série de calcul, l'élève reçoit des commentaires sur l'exactitude des étapes suivies et des réponses données. Un bon nombre de technologies de pointe, souvent désignés comme des systèmes de tutorat intelligents, fournissent à l'élève des commentaires personnalisés dans le cadre d'une tâche ou d'un exercice (VanLEHN, 2011[25]). Ces systèmes étudient les réponses de l'élève à une tâche afin de fournir des commentaires automatisés et détaillés à chacune des étapes. Les systèmes aident ainsi l'élève dans la résolution de problèmes au niveau de la tâche (voir Encadré 3.2 Le tuteur cognitif, MATHia : un exemple de technologie adaptive d'apprentissage largement répandu en mathématiques).

Adaptation des modules au niveau du programme de cours

Enfin, l'optimisation au niveau du programme de cours correspond à l'ordre dans lequel l'élève travaille sur différents sujets. On appelle également cet ordre le parcours d'apprentissage. Dans ce cas, la technologie vise à établir une vue d'ensemble des connaissances et compétences de l'apprenant afin d'éclairer les futures décisions pédagogiques (Falmagne et al., 2006[50]). Ces systèmes déterminent l'ordre dans lequel les apprenants peuvent le mieux aborder un sujet dans une matière. Ils proposent différents parcours pour aborder les sujets qui sont tous reliés entre eux en fonction de l'ordre dans lequel les élèves maîtrisent les sujets et, par conséquent, personnalisent l'ordre dans lequel l'élève apprend dans une matière. ALEKS[7] est un exemple de technologie d'apprentissage qui utilise cette méthode et adapte la sélection des modules d'enseignement en fonction des résultats précédents de l'élève.

Le moment opportun de la révision est un autre élément essentiel qui peut être adapté au niveau du programme de cours. *L'effet d'espacement* indique qu'il y a un délai optimal entre l'apprentissage de sujets donnés. On peut déterminer ce temps en fonction du rythme auquel l'apprenant oublie (Pavlik et Anderson, 2005[51]). La modélisation de cette courbe d'oubli permet de déterminer à quel moment un apprenant devrait revoir un sujet donné (Pashler et al., 2007[52]). Ceci s'est avéré un facteur essentiel dans l'apprentissage des mots, par exemple, pour améliorer la mémorisation du nouveau vocabulaire. WRTS[8] est un exemple d'une telle application dans les technologies d'apprentissage : il utilise un algorithme pour déterminer les courbes d'oubli chez l'élève lors de l'acquisition d'un vocabulaire nouveau dans une langue étrangère. À partir de la courbe d'oubli de chaque élève, le système détermine l'intervalle auquel les mots sont répétés dans les problèmes pratiques. Ces deux exemples permettent d'adapter les parcours et les schémas de répétition à chaque élève, ce qui serait impossible sans l'algorithme. Enfin, les réponses des élèves peuvent servir à diagnostiquer une mauvaise compréhension, laquelle peut être traitée au niveau de l'étape (voir le système MATHia dans Encadré 3.2), mais également au niveau du programme de cours. Dans ce cas, le système opère une analyse des erreurs commises durant l'exercice, qui se traduisent en lacunes d'apprentissage que l'on peut combler par l'ajout de modules d'exercices supplémentaires. Le système Mindspark illustré dans l'Encadré 3.3 ci-dessous en est un exemple.

Encadré 3.1 Le système Snappet : un exemple de technologie d'apprentissage adaptif mise en œuvre à grande échelle aux Pays-Bas

Détecter :

- Les réponses des élèves aux problèmes dans une matière et avec un certain niveau de difficulté

Diagnostiquer :

- L'évolution des connaissances de l'élève au cours de l'apprentissage à l'aide de l'algorithme ELO
- Analyse prédictive de l'évolution de l'élève au fil du temps

Agir :

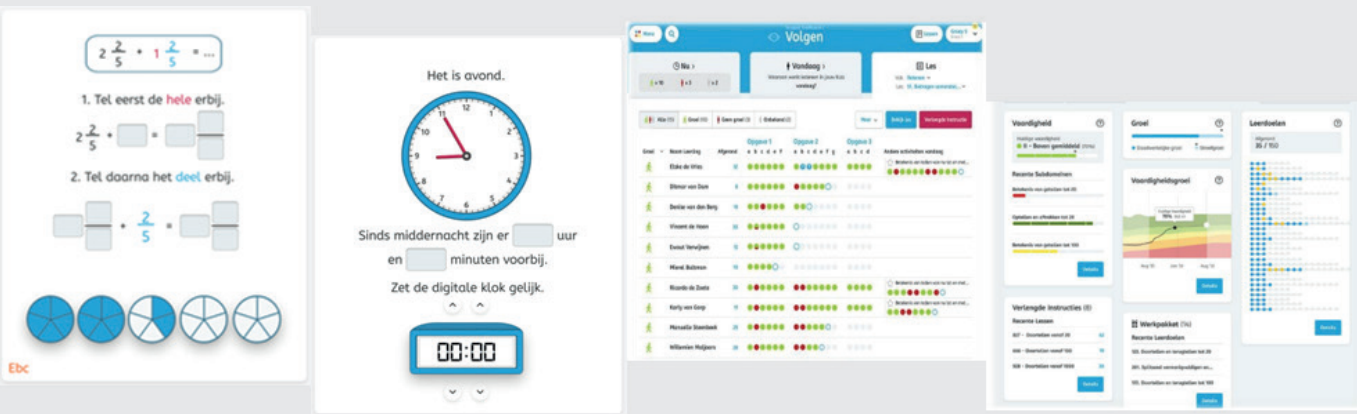
Automatisation partielle :

- Fournit un commentaire direct à la suite des réponses de l'élève (niveau de l'étape)
- Choisit les problèmes adaptés aux connaissances de l'élève (niveau de la tâche)
- Détermine le moment de passer au sujet suivant en fonction de l'analyse prédictive (niveau du programme de cours)

Enseignement assisté :

- Fournit des tableaux de bord en temps réel permettant aux enseignants de voir les progrès et les résultats au niveau de la classe
- Fournit des tableaux de bord en temps réel permettant aux enseignants d'avoir une vue d'ensemble de l'évolution de l'étudiant et des analyses prédictives
- Fournit aux élèves des tableaux de bord contenant des informations sur leurs progrès

Graphique 3.6 Les problèmes et les tableaux de bord du système Snappet



Source: Illustration – Snappet (s.d.[42]).

Information sur la mise en œuvre :

Élèves : Enseignement primaire de la première à la cinquième année (Espagne) et jusqu'à la sixième année (Pays-Bas)

Matières : Arithmétique, mathématiques, orthographe et grammaire néerlandaise, compréhension de l'écrit

Échelle : 2 800 établissements scolaires (45 % des établissements primaires des Pays-Bas) et 1 000 établissements en Espagne

Résultats : améliorations des résultats en maths au bout de 6 mois (Faber, Luyten et Visscher, 2017[43]), amélioration des résultats en maths et légère amélioration de l'orthographe au bout d'un an (Molenaar et van Campen, 2016[44]), des résultats diversifiés sur plusieurs années de mise en œuvre (Molenaar, Knoop-van Campen et Hasselman, 2017[45]) par rapport à d'autres méthodes sur papier.

Encadré 3.2 Le tuteur cognitif MATHia : un modèle de technologie d'apprentissage adaptif largement répandu en mathématiques (États-Unis)

Détecter :

- Les réponses des élèves aux problèmes et à diverses étapes dans le cadre d'exercices de maths

Diagnostiquer :

- L'évolution des connaissances des élèves au cours de l'apprentissage à l'aide de l'algorithme de traçage bayésien des connaissances
- Les erreurs des élèves sur des problèmes et à diverses étapes dans le cadre d'exercices de maths

Agir :

Automatisation conditionnelle :

- Fournit des commentaires directs et détaillés sur les réponses de l'élève à un problème (niveau de l'étape)
- Assigne les étapes suivantes en fonction des réponses de l'élève (niveau de l'étape)
- Détermine à quel moment l'élève maîtrise un sujet (niveau du programme de cours)

Enseignement assisté :

- Fournit des rapports permettant d'adapter la pédagogie
- Fournit des rapports de planification aux enseignants et administrateurs ainsi que des tableaux de bord en temps réel (LiveLab) à l'intention des enseignants.

Graphique 3.7 Les exercices et tableaux de bord dans MATHia

Source: Illustration - Carnegie Learning (s.d.[46]).

Information sur la mise en œuvre :

Élèves : de la sixième à la douzième année

Matières : Mathématiques

Échelle : 600 000 élèves

Résultats : amélioration des résultats en maths (Koedinger et Corbett, 2006[18] ; Pane et al., 2010[47] ; Pane et al., 2014[48] ; Ritter et al., 2007[49]) par rapport à des méthodes sur papier ou aux différentes interventions de systèmes de tutorat intelligents.

Encadré 3.3 Mindspark : Un exemple de technologie d'apprentissage adaptif en Inde

Détecter :

- Les élèves effectuent un test diagnostique afin d'évaluer leurs connaissances et leurs idées fausses sur un sujet
- Les élèves répondent à des questions conçues pour déterminer le type d'incompréhension détecté sur un sujet (des lacunes dans les connaissances)

Diagnostiquer :

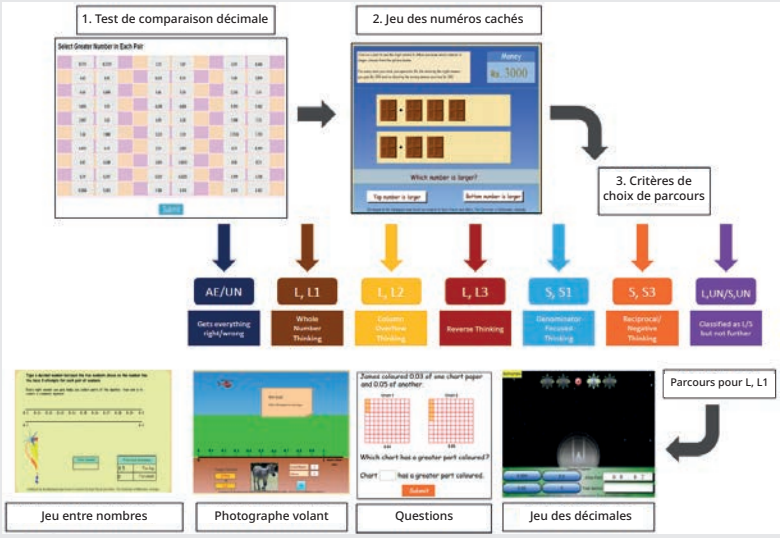
- Les schémas d'erreurs dans les réponses des élèves sur un sujet
- Un enseignement correctif ciblé est assigné en fonction du blocage conceptuel détecté

Agir :

Automatisation conditionnelle :

- Fournit divers supports pédagogiques (questions, jeux interactifs, activités) conçus spécialement pour répondre aux incompréhensions et aux lacunes qui ont été diagnostiquées (niveau de la tâche)
- Fournit des commentaires spécifiques et ponctuels lorsqu'une mauvaise réponse est donnée (niveau de l'étape)
- Détermine si l'élève peut passer au niveau de difficulté suivant (niveau de la tâche ou du programme de cours)

Graphique 3.8 Activités correctives personnalisées pour apprendre les décimales en fonction des schémas d'erreurs



Remarque : Illustration de l'adaptabilité en fonction des schémas d'erreurs : un enfant peut se voir assigner le « test de comparaison décimale ». S'il répond correctement à la plupart des questions de ce test, il se voit alors assigner le jeu des numéros cachés (Hidden Number Game), un exercice légèrement plus difficile. Par contre, s'il ne répond pas correctement à la plupart des questions, il se verra assigner une activité corrective en fonction de son type d'incompréhension. Par exemple, si ses erreurs sont dues à une pensée centrée sur le nombre entier (p. ex., croire que 3,27 est plus grand que 3,3 parce qu'il compare les nombres à droite de la virgule et en conclut (de manière erronée) que puisque 27 est plus grand que 3, alors 3,27 est plus grand que 3,3), il se verra assigner le jeu des décimaux (Decimalians Game) conçu pour répondre à ce type d'idées fausses. Développé par l'équipe de Mindspark d'après les recherches de Kaye Stacey et autres, Université de Melbourne.

Source: Muralidharan, Singh et Ganimian (2019[53]), Graphique D.1.

Information sur la mise en œuvre :

Élèves : de la première à la dixième année

Matières : Mathématiques, Hindi, anglais

Résultats : un programme extrascolaire combinant Minsdpark et un enseignement en groupe a amélioré les résultats d'apprentissage (Muralidharan, Singh et Ganimian, 2019[53]).

Ci-dessous, nous examinerons à quels niveaux ces récentes innovations se situent dans le modèle d'automatisation.

Place des technologies d'apprentissage actuelles dans les niveaux du modèle d'automatisation

Comme nous l'avons vu plus haut, il y a eu des progrès dans la détection et le diagnostic des connaissances et compétences des élèves durant l'apprentissage, qui s'effectuent le plus souvent au niveau de la tâche, du problème ou du programme de cours. On situe le plus souvent les technologies d'apprentissage existantes dans les trois premiers niveaux du modèle d'automatisation. Premièrement, au niveau de l'enseignement assisté, les technologies fournissent les tableaux de bord des enseignants. Deuxièmement, au niveau de l'automatisation partielle, les diagnostics posés sur les connaissances des élèves et sur l'évolution de ces connaissances servent à apporter des ajustements au niveau de l'étape, de la tâche ou du programme de cours. Ils débouchent sur l'automatisation des commentaires, la sélection des exercices et l'optimisation du programme de cours. Lorsque ces niveaux s'appliquent séparément, ce sont des exemples d'automatisation partielle, mais si on les combine, ces dispositifs correspondent davantage à de l'automatisation conditionnelle.

Les établissements scolaires des pays de l'OCDE font de plus en plus appel aux technologies en classe afin de faciliter l'enseignement et l'apprentissage des maths, des sciences et de la lecture. Cela peut se faire sous différentes formes, notamment par l'utilisation croissante des ordinateurs pour chercher des informations, pour mettre en pratique des compétences en maths, en sciences et en lecture, etc. (Vincent-Lancrin et al., 2019[54]). Dans le but de personnaliser l'apprentissage des compétences de base en mathématiques, en grammaire et en orthographe, de nombreux établissements de l'enseignement primaire et secondaire ont intégré une variété de technologies d'apprentissage adaptif et de systèmes de tutorat intelligents (STI) dans leur routine quotidienne en classe. En général, les jeunes élèves font leurs exercices de langue ou de mathématiques sur une tablette ou un ordinateur, qui recueillent alors de nombreuses données sur leurs performances. La génération actuelle des technologies utilise les données des élèves pour adapter les problèmes à leur niveau de connaissances prévu et, en parallèle, alimente les tableaux de bord des enseignants sur les progrès des élèves. Cette utilisation de la technologie favorise un enseignement plus efficace des compétences fondamentales (Faber, Luyten et Visscher, 2017[43]) et, en principe, permet de libérer du temps pour travailler sur des compétences plus complexes comme la résolution de problèmes, l'autorégulation et la créativité.

La plupart des technologies d'apprentissage adaptif ne s'adaptent qu'au niveau de la tâche et sont, par conséquent, des exemples d'automatisation partielle. Les systèmes de tutorat intelligents constituent une exception et peuvent être catégorisés comme des exemples d'automatisation conditionnelle. Ces technologies prennent le contrôle sur un large ensemble d'éléments dans l'organisation de l'environnement d'apprentissage. La plupart des systèmes intelligents opèrent des adaptations au niveau de la tâche et au niveau de l'étape, mais ils sont peu nombreux à contrôler les trois niveaux. En outre, alors que les systèmes de tutorat intelligents fonctionnent très bien dans des matières structurées, comme les maths et les sciences, peu conviennent aux matières non structurées (VanLehn, 2015[55]). Bien que ces systèmes aient montré qu'ils amélioraient les résultats d'apprentissage et optimisaient l'apprentissage (Kulik et Fletcher, 2016[56]), leur mise en œuvre dans les établissements reste limitée (Baker, 2016[57]).

À cet égard, deux paramètres d'importance peuvent expliquer cette lente adoption dans la pratique. Le premier concerne les enseignants qui ont souvent l'impression que ces technologies les mettent à l'écart (Holstein, McLaren et Aleven, 2019[58]), ce qui pourrait expliquer qu'ils ne les utilisent pas dans la pratique (Baker, 2016[57]). S'attaquer efficacement aux limites de ces technologies pourrait marquer une étape importante vers une plus large acceptation de ces technologies. Les fonctionnalités des tableaux de bord ont été développées depuis longtemps dans ces systèmes, pourtant peu de travaux de recherche ont été menés pour développer l'utilité de ces tableaux de bord pour les enseignants. Ce n'est que récemment que des tableaux de bord ont été élaborés afin d'impliquer les enseignants (Feng et Heffernan, 2005[59] ; Holstein, McLaren et Aleven, 2017[19]). Bien que ces développements n'en soient encore qu'à leurs débuts, les premiers résultats montrent qu'il s'agit d'un nouveau et puissant moyen de faire participer les enseignants (Knoop-van Campen et Molenaar, 2020[35]).

Le second paramètre est celui de l'apprentissage qui, il faut le souligner, se fait en groupes dans la plupart des établissements scolaires, ce qui rend difficile l'intégration des technologies qui s'adressent plutôt à des individus. En outre, il existe de fortes présomptions théoriques que l'apprentissage est un processus social grâce auquel les élèves apprennent ensemble. C'est pour cela que se développent des solutions qui combinent la personnalisation

aux niveaux de la classe et de l'individu. Dans ces cas, la personnalisation de l'apprentissage au niveau individuel est intégrée dans un programme de cours au rythme de la classe. Les technologies ainsi configurées peuvent être mises en place dans l'environnement actuel des établissements sans nécessiter de réorganisation majeure. Il est peut-être plus facile d'adopter ces technologies que celles à caractère exclusivement individuel.

Personnalisation de l'apprentissage grâce à l'apprentissage autorégulé

Indépendamment de la personnalisation en fonction des connaissances de l'élève, il existe une grande variété de caractéristiques de l'apprenant qui pourraient permettre des formes plus poussées de personnalisation. Bien que les expériences soient encore en cours, les premiers prototypes avancés sont testés à l'heure actuelle dans des laboratoires de recherche des pays de l'OCDE.

Ces dernières années, on s'est intéressé à des caractéristiques autres que les connaissances et les compétences de l'apprenant, telles que la capacité à autoréguler l'apprentissage, à appliquer des compétences métacognitives, à contrôler et suivre les activités d'apprentissage, à s'automotiver afin de s'efforcer d'apprendre et à réguler les réponses émotionnelles. Toutes ces caractéristiques sont des données potentielles pour la personnalisation (Bannert et al., 2017[60] ; Järvelä et Bannert, 2019[61]). Cette attention envers les caractéristiques et le comportement de l'apprenant durant l'apprentissage se combine parfaitement avec le rôle essentiel que jouent les données dans la compréhension des apprenants (Azevedo et Gašević, D., 2019[27]). Cette tendance à percevoir l'apprenant comme un tout s'appuie sur des recherches qui montrent que l'apprentissage autorégulé, la motivation et les émotions sont primordiaux pendant l'apprentissage (Azevedo, 2009[62]).

La théorie de l'apprentissage autorégulé définit l'apprentissage comme un processus axé sur les objectifs grâce auquel les élèves font des choix éclairés en vue de la réalisation d'objectifs d'apprentissage, résolvent des problèmes, raisonnent sur des données, entre autres, sur des sujets, dans des matières et contextes divers (Winne, 2017[63] ; Winne et Hadwin, 1998[64]). Les apprenants qui s'autorégulent font appel aux processus cognitifs (p. ex., lire, pratiquer, élaborer) pour étudier un sujet, et font appel aux processus métacognitifs (p. ex., l'orientation, la planification, la fixation d'objectifs, le suivi et l'évaluation) pour suivre et contrôler activement leur apprentissage, leur raisonnement, les processus de résolution de problèmes et les états affectifs (p. ex., l'ennui, la confusion, la frustration), et pour se motiver davantage (p. ex. accroître la valeur et l'intérêt de la tâche) pour fournir le niveau d'efforts qui convient (Greene et Azevedo, 2010[65]).

L'intérêt de soutenir l'apprentissage autorégulé est double. En premier lieu, on estime que les compétences nécessaires à l'apprentissage autorégulé seront essentielles pour les humains dans les décennies à venir. L'intelligence artificielle va de plus en plus augmenter l'intelligence humaine. L'action humaine est nécessaire pour jouer un rôle de premier plan dans ces transformations et les compétences en régulation sont essentielles dans des environnements où l'automatisation et la robotisation de l'économie s'intensifient (OECD, 2019[66]). Dans le cadre de cette évolution, la capacité intellectuelle de l'humain à résoudre les problèmes les plus sérieux de la société sera très recherchée (Luckin, 2017[67]). Ces compétences humaines que l'IA ne peut reproduire facilement seront nécessaires pour réussir dans un monde en rapide mutation (World Economic Forum, 2018[68]). La capacité de s'autoréguler, c'est-à-dire de prendre des initiatives, de se fixer des objectifs et d'assurer un suivi pour soi et les autres, est au cœur de ces compétences humaines. Les apprenants à même de s'autogérer apprennent de manière plus efficace et développent des structures mentales plus sophistiquées leur permettant d'appliquer leurs connaissances dans des situations variées (Paans et al., 2018[69]). En second lieu, les compétences en apprentissage autorégulé sont nécessaires à l'apprentissage tout au long de la vie (au sein des établissements d'enseignement et dans le milieu de travail) pour donner aux apprenants la capacité d'agir, le sentiment de contrôler leur propre vie et leur fournir un moyen d'adapter et de contrôler leur comportement dans des situations difficiles au cours de leur vie (p. ex., en famille, dans les loisirs et au travail).

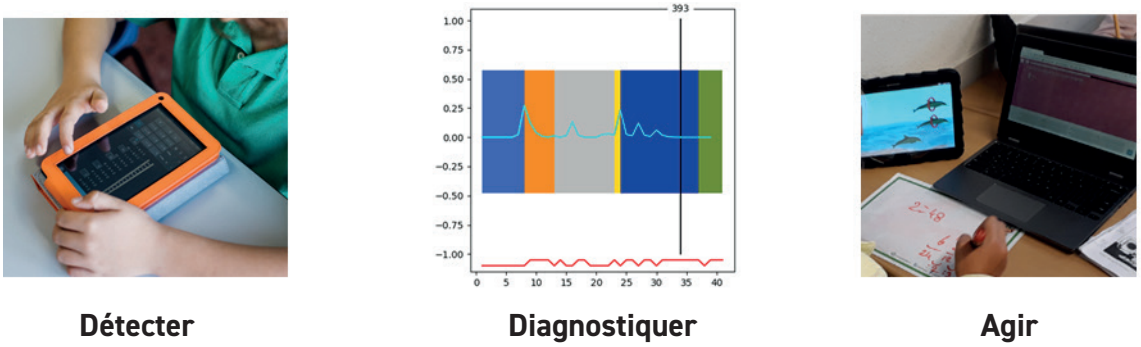
Intégrer l'apprentissage autorégulé dans les approches visant à personnaliser l'enseignement pourrait en conséquence être avantageux pour l'apprentissage *aujourd'hui* comme pour demain (Molenaar, Horvers et Baker, 2019[70]). Pourtant, alors que les chercheurs et développeurs ont mis au point des moyens efficaces pour mesurer les connaissances des élèves durant leur apprentissage, la personnalisation en fonction d'un large éventail de caractéristiques de l'apprenant fait face à un premier obstacle qui réside justement dans cette mesure de l'apprentissage autorégulé durant l'apprentissage. On cherche de plus en plus à comprendre les processus d'apprentissage autorégulé à l'aide de données multimodales, car ils peuvent constituer des solutions de mesure

discrètes et évolutives. Les différents flux de données mentionnés ci-dessus sont utilisés dans la recherche afin d'améliorer les mesures, mais n'ont été utilisés que de manière restreinte dans les interventions pédagogiques. Ainsi, le système Wayang Outpost se sert des états affectifs des élèves pour adapter son commentaire en vue d'augmenter leur motivation (Arroyo et al., 2014[20]) et AtGentive (Molenaar, Van Boxtel et Sleegers, 2011[71]) fournit des échafaudages métacognitifs aux apprenants en fonction de leurs progrès. Les élèves de MetaTutor reçoivent des messages d'un agent de stratégie pour fixer des objectifs en fonction de leur comportement de navigation (Harley et al., 2015[72]). D'Mello (D'Mello, 2021[7]) examine cette question de la mesure dans le cas de l' « implication dans l'apprentissage ».

Pour illustrer ce développement, le Graphique 3.9 montre une intervention qui fait appel à des données du journal pour détecter les processus d'apprentissage autorégulé en fonction des données des technologies d'apprentissage adaptif utilisées à grande échelle. Un algorithme d'apprentissage *moment-by-moment* a été développé pour visualiser la probabilité que l'apprenant a acquis une compétence spécifique sur un problème particulier (Baker et al., 2013[73]). Ces visuels illustrent ce que l'apprenant est susceptible d'avoir appris à chaque occasion de résolution de problème, ce qui est une représentation des progrès de l'apprenant au fil du temps. Baker, Goldstein et Heffernan (2011[74]) ont constaté que les pics dans le graphique, qui illustrent la probabilité qu'un apprenant vient juste d'apprendre quelque chose à un moment précis, sont associés à un gain d'apprentissage soutenu au cours de leur expérience. Par ailleurs, les différents schémas visuels de la probabilité que l'apprenant vient d'apprendre, les courbes du moment, sont liés aux différents résultats d'apprentissage : par exemple un pic immédiat est lié aux résultats du post-test (Baker et al., 2013[73]).

Graphique 3.9 L'algorithme d'apprentissage Moment-by-Moment

Personnalisation s'appuyant sur l'apprentissage autorégulé



Source: Illustrations - Inge Molenaar/Adaptive Learning Lab.

Ces schémas visuels reflètent également la régulation des apprenants (Molenaar, Horvers et Baker, 2019[75]). À ce titre, ils fournissent un aperçu de la façon dont les élèves régulent leur attention et leur apprentissage au fil du temps en apprenant à l'aide des technologies d'apprentissage adaptif (Molenaar, Horvers et Baker, 2019[70]). C'est sur cette base que les tableaux de bord personnalisés pour les élèves ont été développés, pour fournir des commentaires aux apprenants. Ainsi, le tableau de bord de l'apprenant, qui au départ était destiné à examiner *ce que* l'apprenant a appris, a intégré également l'aspect du *comment* il l'a fait. Les résultats de l'étude indiquent que les apprenants recevant des tableaux de bord amélioraient la régulation durant l'apprentissage, atteignaient de meilleurs résultats et assuraient un suivi plus précis (Molenaar et al., 2020[76]). En général, ces conclusions montrent que les tableaux personnalisés ont eu un impact très positif sur les élèves au cours de leur apprentissage.

Cet exemple (Graphique 3.9) illustre qu'en diversifiant les indicateurs suivis et en augmentant la portée du diagnostic, on peut favoriser la personnalisation de l'apprentissage, améliorer notre capacité à bien cerner l'état actuel de l'apprenant et affiner la prédiction concernant son évolution future. Il favorise de meilleures approches quant à la personnalisation de l'apprentissage qui intègrent des caractéristiques plus diversifiées de l'apprenant et une meilleure compréhension de l'environnement de ce dernier.

Les défis qui attendent la personnalisation de l'apprentissage à l'avenir

Nous avons commencé ce chapitre en présentant le modèle des *six niveaux d'automatisation de l'apprentissage personnalisé* pour situer le rôle de l'IA dans l'éducation et pour susciter une discussion sur le niveau d'automatisation envisagé pour l'IA dans l'éducation. L'automatisation totale n'est peut-être pas le modèle d'automatisation idéal pour l'IA dans le cadre de l'enseignement formel. Les systèmes hybrides dans lesquels l'humain et l'intelligence artificielle se renforcent mutuellement marquent un nouveau tournant dans ces contextes. Malgré l'afflux rapide de technologies éducatives mises en œuvre à grande échelle, les technologies de pointe favorisant la personnalisation poussée de l'apprentissage ne sont pas encore souvent très répandues dans les établissements scolaires. Il y a toujours un fossé entre les technologies mises en œuvre à grande échelle dans les établissements et les technologies de pointe à l'œuvre dans les laboratoires de recherche. La plupart des technologies sont mises en place à grande échelle au niveau de l'enseignement assisté pour aider l'enseignant (matériel numérique) et au niveau de l'automatisation partielle. Même dans les technologies de pointe, l'accent est mis sur la personnalisation en fonction des connaissances des élèves. On pourrait encore améliorer la personnalisation si l'on se concentrait sur l'élève dans son *ensemble* en tenant compte de caractéristiques plus larges de l'apprenant comme l'autorégulation, les émotions et la motivation. Dans cette quête, les flux de données multiples offrent de nouvelles occasions de détecter ces diverses caractéristiques et de poser un diagnostic.

L'évolution vers des formes plus poussées de personnalisation est complexe et nécessite une collaboration internationale en matière de recherche et développement (R-D) pour pouvoir progresser. Une orchestration au niveau gouvernemental est nécessaire pour que ces innovations technologiques voient le jour. Afin de parvenir à un plus vaste déploiement des technologies de pointe, ce chapitre termine sur trois recommandations à l'intention des responsables politiques : *i) Encadrer l'éthique dès la conception, la transparence et l'utilisation des données ; ii) améliorer les technologies d'apprentissage grâce à des partenariats public-privé ;* et *iii) faire en sorte que les enseignants et les professionnels de l'éducation soient parties prenantes de ces transformations*.

Recommandation 1. Encadrer l'éthique dès la conception, notamment en matière de transparence et de protection des données

Bien que ce chapitre n'ait pas vocation à discuter de questions éthiques relatives à l'IA dans le monde de l'éducation, il est essentiel que les gouvernements veillent à ce que les développements de l'IA et la personnalisation de l'apprentissage continuent de soutenir le bien commun (Sharon, 2018[77]). L'éducation est un droit humain fondamental et les gouvernements doivent prendre les mesures qui s'imposent pour garantir l'accès à une éducation ouverte et impartiale pour tous (UNESCO, 2019[78]). Dans cette optique, il faudra une réflexion approfondie sur les infrastructures de données, la gouvernance des données et le cadre de travail juridique nécessaire pour garantir ces droits humains fondamentaux ainsi que la vie privée, la sécurité et le bien-être des apprenants. Les gouvernements devront élaborer des lois et des cadres réglementaires détaillés en matière de protection des données afin de garantir une utilisation et une réutilisation éthiques, non discriminatoires, transparentes et vérifiables des données relatives aux apprenants (UNESCO, 2019[78]). Il est nécessaire que les professionnels de l'éducation utilisent les technologies de manière responsable, particulièrement les données servant à la détection et les algorithmes servant au diagnostic. La recherche a un rôle essentiel à jouer dans l'analyse critique préalable des solutions d'IA afin de garantir la transparence du secteur.

Recommandation 2. Améliorer les technologies d'apprentissage à l'aide de partenariats public-privé

Comme mentionné ci-dessus, il y a encore une marge entre les technologies mises en œuvre à grande échelle dans les établissements et les technologies de pointe disponibles dans les laboratoires de recherche. Malgré la forte augmentation de l'utilisation des technologies dans les salles de classe au cours des dix dernières années (Vincent-Lancrin et al., 2019[54]), rien ne démontre que les établissements scolaires exploitent le plein potentiel des technologies d'apprentissage en vue de la personnalisation de l'apprentissage. Il n'y a aucune solution technologique éducative avancée qui intègre les trois niveaux d'adaptation (tâche, étape et programme de cours) et les caractéristiques générales de l'apprenant. Les gouvernements peuvent encourager les développements en coordonnant des partenariats public-privé entre les instituts de recherche et les compagnies EdTech. Dans tous les secteurs, les grandes quantités de données combinées à l'apprentissage automatique entraînent des transformations et des perturbations sur les marchés (Bughin et al., 2018[79]). De vastes ensembles de données sont nécessaires pour bâtir des applications factuelles d'apprentissage automatique en éducation. Les partenariats

entre ceux qui collectent les données à l'aide de technologies exploitées à grande échelle (principalement les entreprises privées et les organes publics chargés de l'éducation), ceux qui possèdent l'expertise pour faire progresser le domaine (principalement les chercheurs des universités et les entreprises privées), et ceux qui façonnent l'éducation (principalement les enseignants et les responsables de l'éducation dans les établissements) sont essentiels pour garantir une personnalisation accrue de l'apprentissage. Les collaborations avec ce « triangle d'or » (Cukurova, Luckin et Clark-Wilson, 2018[80]) ont le pouvoir d'accélérer la personnalisation de l'apprentissage et, par conséquent, de faire progresser les niveaux d'automatisation dans l'éducation. Le projet EDUCATE du University College London[9] et l'initiative Simon de la Carnegie Mellon University[10] sont des exemples probants de ces partenariats.

Recommandation 3. Faire participer les enseignants et les professionnels de l'éducation à la R-D

Les six niveaux du modèle d'automatisation peuvent également aider les enseignants et les professionnels de l'éducation à comprendre le rôle de l'IA dans l'éducation. Le recours traditionnel aux technologies a été faible et la résistance à l'automatisation complète a été élevée (Tondeur et al., 2013[4]). Imaginez que vous puissiez monter demain dans une voiture entièrement automatisée : combien de temps continuerez-vous à suivre ou même contrôler le fonctionnement de la voiture ? Une transition progressive à travers les niveaux d'automatisation renforcera la confiance des enseignants dans l'IA et contribuera à développer des preuves de son efficacité. La recherche montre que lorsque les enseignants font l'expérience de l' « enseignement assisté » du niveau 1, ils voient leur autonomie renforcée et peuvent concevoir de futurs scénarios éducatifs plus perfectionnés (Molenaar et Knoop-van Campen, 2019[16]). Les enseignants sont responsables du bien-être de leurs élèves ; les technologies devraient leur permettre de s'acquitter de cette responsabilité. Des dialogues interactifs pour débattre du rôle des données, de l'analyse de l'apprentissage et de l'IA dans l'éducation nous permettront d'innover au-delà de ce que nous comprenons aujourd'hui et d'apprendre comment appréhender les possibilités infinies que l'IA offre à l'éducation.

Remarques

1. https://www.alelo.com/about-us/
2. http://hstrik.ruhosting.nl/DART/
3. https://www.lexplore.com/
4. https://www.changedyslexia.org/
5. https://lingvist.com/
6. https://www.letrus.com.br/
7. https://www.aleks.com/
8. https://wrts.nl/
9. https://www.ucl.ac.uk/ioe/departments-and-centres/centres/ucl-knowledge-lab/educate
10. https://www.cmu.edu/simon/

Références

Aleven, V. et E.A. McLaughlin (2016), « Instruction Based on Adaptive Learning Technologies? », dans *Handbook of Research on Learning and Instruction*, Routledge Handbooks, http://dx.doi.org/10.4324/9781315736419. [1]

Arroyo, I., B. Park Woolf, W. Burelson, K. Muldner, D. Rai et M. Tai (2014), « A Multimedia Adaptive Tutoring System for Mathematics that Addresses Cognition, Metacognition and Affect », *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, Vol. 24/4, pp. 387-426, http://dx.doi.org/10.1007/s40593-014-0023-y. [20]

Asselborn, T., T. Gargot, Ł. Kidziński, W. Johal, D. Cohen, C. Jolly et P. Dillenbourg (2018), « Automated human-level diagnosis of dysgraphia using a consumer tablet », *npj Digital Medicine,* Vol. 1/1, http://dx.doi.org/10.1038/s41746-018-0049-x. [32]

Awad, E., S. Dsouza, R. Kim, J. Schultz, J. Henrich, A. Shariff, J-F. Bonnefon et I. Rahwan (2018), « The Moral Machine experiment », Nature, Vol. 563/7729, pp. 59-64, http://dx.doi.org/10.1038/s41586-018-0637-6. [11]

Azevedo, R. (2009), « Theoretical, conceptual, methodological, and instructional issues in research on metacognition and self-regulated learning: A discussion », *Metacognition and Learning*, Vol. 4/1, pp. 87-95, http://dx.doi.org/10.1007/s11409-009-9035-7. [62]

Azevedo, R. et Gašević, D. (2019), « Analyzing Multimodal Multichannel Data about Self-Regulated Learning with Advanced Learning Technologies: Issues and Challenges », *Computers in Human Behavior*, Vol. 96, pp. 207-2010. [27]

Baker, R. (2016), « Stupid Tutoring Systems, Intelligent Humans », *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, Vol. 26/2, pp. 600-614, http://dx.doi.org/10.1007/s40593-016-0105-0. [57]

Baker, R., A. Corbett et V. Aleven (2008), « More Accurate Student Modeling through Contextual Estimation of Slip and Guess Probabilities in Bayesian Knowledge Tracing », dans I*ntelligent Tutoring Systems, Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-69132-7_44. [41]

Baker, R., A. Goldstein et N. Heffernan (2011), « Detecting learning moment-by-moment », *International Journal of Artificial Intelligence in Education,* Vol. 21/1-2, pp. 5–25, https://doi.org/10.3233/JAI-2011-015. [74]

Baker, R., A. Hershkovitz, L.M. Rossi, A.B. Goldstein et S.M. Gowda (2013), « Predicting robust learning with the visual form of the moment-by-moment learning curve », *Journal of the Learning Sciences*, Vol. 22/4, pp. 639-666. [73]

Baker, R. et P. Inventado (2014), *Educational data mining and learning analytics*, Springer. [26]

Bannert, M., I. Molenaar, R. Azevedo, S. Järvelä et D. Gašević (2017), « Relevance of learning analytics to measure and support students' learning in adaptive educational technologies », *Proceedings of the Seventh International Learning Analytics & Knowledge Conference*, http://dx.doi.org/10.1145/3027385.3029463. [60]

Blikstein, P. (2018), *Time for hard choices in AIED*, Keynote at London Festival of Learning, https://vimeo.com/283023489. [22]

Bloom, B. (1984), « The 2 Sigma Problem: The Search for Methods of Group Instruction as Effective as One-to-One Tutoring », *Educational Researcher*, Vol. 13/6, pp. 4-16, http://dx.doi.org/10.3102/0013189x013006004. [24]

Bodily, R., J. Kay, V. Aleven, J. Jivet, D. Davis, F. Xhakaj et K. Verbert (2018), « Open learner models and learning analytics dashboards », *Proceedings of the 8th International Conference on Learning Analytics and Knowledge*, http://dx.doi.org/10.1145/3170358.3170409. [15]

Bosch, N., S. D'Mello, R. Baker, J. Ocumpaugh, V. Shute, M. Ventura, L. Wang et W. Zhao (2015), « Automatic Detection of Learning-Centered Affective States in the Wild », Proceedings of the 20th *International Conference on Intelligent User Interfaces - IUI '15*, http://dx.doi.org/10.1145/2678025.2701397. [31]

Bughin, J., J. Seong, J. Manyika, M. Chui et R. Joshi (2018), « Notes from the AI frontier: Modeling the global economic impact of AI », *McKinsey Global Institute: Vol. September*, http://www.mckinsey.com/mgi. [79]

Carnegie Learning (s.d.), Carnegie Learning, https://www.carnegielearning.com/products/software-platform/mathia-learning-software (consulté le 1 décembre 2020). [46]

Corbett, A. et J. Anderson (1995), « Knowledge tracing: Modeling the acquisition of procedural knowledge », *User Modelling and User-Adapted Interaction*, Vol. 4/4, pp. 253-278, http://dx.doi.org/10.1007/bf01099821. [39]

Corno, L. (2008), « On Teaching Adaptively », *Educational Psychologist*, Vol. 43/3, pp. 161-173, http://dx.doi.org/10.1080/00461520802178466. [2]

Cukurova, M., R. Luckin et A. Clark-Wilson (2018), « Creating the golden triangle of evidence-informed education technology with EDUCATE », *British Journal of Educational Technology*, Vol. 50/2, pp. 490-504, http://dx.doi.org/10.1111/bjet.12727. [80]

Dede, C. (1986), « A review and synthesis of recent research in intelligent computer-assisted instruction », *International Journal of Man-Machine Studies*, Vol. 24/4, pp. 329-353, http://dx.doi.org/10.1016/s0020-7373(86)80050-5. [38]

Desmarais, M. et R. Baker (2011), « A review of recent advances in learner and skill modeling in intelligent learning environments », *User Modeling and User-Adapted Interaction*, Vol. 22/1-2, pp. 9-38, http://dx.doi.org/10.1007/s11257-011-9106-8. [30]

Dillenbourg, P. (2021), « Classroom analytics: Zooming out from a pupil to a classroom », dans *OECD Digital Education Outlook 2021: Pushing the frontiers with AI, blockchain, and robots.*, OECD Publishing. [14]

D'Mello, S. (2021), « Improving student engagement in and with digital learning technologies », dans *OECD Digital Education Outlook 2021: Pushing the frontiers with AI, blockchain, and robots.*, OECD Publishing. [7]

Faber, J., H. Luyten et A. Visscher (2017), « The effects of a digital formative assessment tool on mathematics achievement and student motivation: Results of a randomized experiment », *Computers & Education*, Vol. 106, pp. 83-96, http://dx.doi.org/10.1016/j.compedu.2016.12.001. [43]

Falmagne, J-C., E. Cosyn, J-P. Doignon et N. Thiéry (2006), « The Assessment of Knowledge, in Theory and in Practice », dans *Formal Concept Analysis, Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, http://dx.doi.org/10.1007/11671404_4. [50]

Feng, M. et N. Heffernan (2005), « Informing Teachers Live about Student Learning : Reporting in the Assistment System », *Tech., Inst., Cognition and Learning*, Vol. 3/508, pp. 1-14. [59]

Greene, J. et R. Azevedo (2010), « The Measurement of Learners' Self-Regulated Cognitive and Metacognitive Processes While Using Computer-Based Learning Environments », *Educational Psychologist*, Vol. 45/4, pp. 203-209, http://dx.doi.org/10.1080/00461520.2010.515935. [65]

Harari, Y. (2018), *21 Lessons for the 21st Century*, Random House. [10]

Harley, J., F. Bouchet, M. Sazzad Hussain, R. Azevedo et R. Calvo (2015), « A multi-componential analysis of emotions during complex learning with an intelligent multi-agent system », *Computers in Human Behavior*, Vol. 48, pp. 615-625. [72]

Holstein, K., B. McLaren et V. Aleven (2019), « Co-designing a real-time classroom orchestration tool to support teacher–AI complementarity », *Journal of Learning Analytics*, Vol. 6/2, pp. 27-52. [58]

Holstein, K., B. McLaren et V. Aleven (2018), « Student Learning Benefits of a Mixed-Reality Teacher Awareness Tool in AI-Enhanced Classrooms », dans *Lecture Notes in Computer Science, Artificial Intelligence in Education*, Springer International Publishing, Cham, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-93843-1_12. [36]

Holstein, K., B. McLaren et V. Aleven (2017), « Intelligent tutors as teachers' aides », *Proceedings of the Seventh International Learning Analytics & Knowledge Conference*, http://dx.doi.org/10.1145/3027385.3027451. [19]

Järvelä, S. et M. Bannert (2019), « Temporal and adaptive processes of regulated learning - What can multimodal data tell? », *Learning and Instruction*, pp. 101268, http://dx.doi.org/10.1016/j.learninstruc.2019.101268. [61]

Kamar, E. (2016), « Directions in Hybrid Intelligence: Complementing AI Systems with Human Intelligence », *IJCAI*, pp. 4070–4073. [8]

Klinkenberg, S., M. Straatemeier et H. van der Maas (2011), « Computer adaptive practice of Maths ability using a new item response model for on the fly ability and difficulty estimation », *Computers & Education*, Vol. 57/2, pp. 1813-1824, http://dx.doi.org/10.1016/j.compedu.2011.02.003. [40]

Knoop-van Campen, C. et I. Molenaar (2020), « How Teachers integrate Dashboards into their Feedback Practices », *Frontline Learning Research*, pp. 37-51, http://dx.doi.org/10.14786/flr.v8i4.641. [35]

Koedinger, K., J. Booth et D. Klahr (2013), « Instructional Complexity and the Science to Constrain It », *Science*, Vol. 342/6161, pp. 935-937, http://dx.doi.org/10.1126/science.1238056. [33]

Koedinger, K. et A. Corbett (2006), « Cognitive Tutors: Technology Bringing Learning Sciences to the Classroom - Chapter 5 », The Cambridge Handbook of: The Learning Sciences, pp. 61-78, https://www.academia.edu/download/39560171/koedingercorbett06.pdf. [18]

Koedinger, K., A. Corbett et C. Perfetti (2012), « The Knowledge-Learning-Instruction Framework: Bridging the Science-Practice Chasm to Enhance Robust Student Learning », *Cognitive Science*, Vol. 36/5, pp. 757-798, http://dx.doi.org/10.1111/j.1551-6709.2012.01245.x. [34]

Kulik, J. et J. Fletcher (2016), « Effectiveness of Intelligent Tutoring Systems », *Review of Educational Research*, Vol. 86/1, pp. 42-78, http://dx.doi.org/10.3102/0034654315581420. [56]

Luckin, R. (2017), « Towards artificial intelligence-based assessment systems », *Nature Human Behaviour*, Vol. 1/3, http://dx.doi.org/10.1038/s41562-016-0028. [67]

Miller, W., R. Baker, M.J. Labrum, K. Petsche, Y. Han Liu et A.Z. Wagner (2015), « Automated detection of proactive remediation by teachers in reasoning mind classrooms », *Proceedings of the Fifth International Conference on Learning Analytics And Knowledge - LAK '15*, http://dx.doi.org/10.1145/2723576.2723607. [17]

Molenaar, I., A. Horvers et R. Baker (2019), « Towards Hybrid Human-System Regulation », *Proceedings of the 9th International Conference on Learning Analytics & Knowledge*, http://dx.doi.org/10.1145/3303772.3303780. [70]

Molenaar, I., A. Horvers et R. Baker (2019), « What can moment-by-moment learning curves tell about students' self-regulated learning? », *Learning and Instruction*, pp. 101206, http://dx.doi.org/10.1016/j.learninstruc.2019.05.003. [75]

Molenaar, I., A. Horvers, R. Dijkstra et R. Baker (2020), « Personalized visualizations to promote young learners' SRL », *Proceedings of the Tenth International Conference on Learning Analytics & Knowledge*, http://dx.doi.org/10.1145/3375462.3375465. [76]

Molenaar, I. et C. Knoop-van Campen (2019), « How Teachers Make Dashboard Information Actionable », *IEEE Transactions on Learning Technologies*, Vol. 12/3, pp. 347-355, http://dx.doi.org/10.1109/tlt.2018.2851585. [16]

Molenaar, I., C. Knoop-van Campen et F. Hasselman (2017), « The effects of a learning analytics empowered technology on students' arithmetic skill development », *Proceedings of the Seventh International Learning Analytics & Knowledge Conference*, http://dx.doi.org/10.1145/3027385.3029488. [45]

Molenaar, I., C. Van Boxtel et P. Sleegers (2011), « The Effect of Dynamic Computerized Scaffolding on Collaborative Discourse », dans *Towards Ubiquitous Learning, Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-23985-4_39. [71]

Molenaar, I. et C. van Campen (2016), « Learning analytics in practice », *Proceedings of the Sixth International Conference on Learning Analytics & Knowledge - LAK '16*, http://dx.doi.org/10.1145/2883851.2883892. [44]

Mudrick, N., R. Azevedo et M. Taub (2019), « Integrating metacognitive judgments and eye movements using sequential pattern mining to understand processes underlying multimedia learning », *Computers in Human Behavior*, Vol. 96, pp. 223–234. [28]

Muralidharan, K., A. Singh et A. Ganimian (2019), « Disrupting education? Experimental evidence on technology-aided instruction in India », *American Economic Review*, Vol. 109/4, pp. 1426-60. [53]

OECD (2019), *OECD Skills Outlook 2019 : Thriving in a Digital World*, OECD Publishing, Paris, https://dx.doi.org/10.1787/df80bc12-en. [66]

Paans, C., E. Segers, I. Molenaar et L. Verhoeven (2018), « The quality of the assignment matters in hypermedia learning », *Journal of Computer Assisted Learning*, Vol. 34/6, pp. 853-862, http://dx.doi.org/10.1111/jcal.12294. [69]

Pane, J., B.A. Griffin, D.F. McCaffrey et R. Karam (2014), « Effectiveness of Cognitive Tutor Algebra I at Scale », *Educational Evaluation and Policy Analysis*, Vol. 36/2, pp. 127-144, http://dx.doi.org/10.3102/0162373713507480. [48]

Pane, J., D.F. McCaffrey, M.E. Slaughter, J.L. Steele et G.S. Ikemoto (2010), « An Experiment to Evaluate the Efficacy of Cognitive Tutor Geometry », *Journal of Research on Educational Effectiveness*, Vol. 3/3, pp. 254-281, http://dx.doi.org/10.1080/19345741003681189. [47]

Parasuraman, R., T. Sheridan et C. Wickens (2000), « A Model for Types and Levels of Human Interaction with Automation », *SYSTEMS AND HUMANS*, Vol. 30/3, https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/844354/. [13]

Pashler, H., D. Rohrer, N.J. Capeda et S.K. Carpenter (2007), « Enhancing learning and retarding forgetting: Choices and consequences », *Psychonomic Bulletin & Review*, Vol. 14/2, pp. 187-193, http://dx.doi.org/10.3758/bf03194050. [52]

Pavlik, P. et J. Anderson (2005), « Practice and Forgetting Effects on Vocabulary Memory: An Activation-Based Model of the Spacing Effect », *Cognitive Science*, Vol. 29/4, pp. 559-586, http://dx.doi.org/10.1207/s15516709cog0000_14. [51]

Ritter, S., J. Kulikowich, P. Lei, C. Mcguire et P. Morgan (2007), « What evidence matters? A randomized field trial of Cognitive Tutor Algebra I. », *Proceeding of the 15th International Conference on Computers in Education, ICCE 2007, November 5-9, 2007, Hiroshima, Japan.* [49]

Robinson, K. (2010), *Changing Edcuation Paradigms,* https://www.ted.com/talks/sir_ken_robinson_changing_education_paradigms (consulté le 26 novembre 2020). [3]

Sharon, T. (2018), « When digital health meets digital capitalism, how many common goods are at stake? », *Big Data & Society*, Vol. 5/2, pp. 205395171881903, http://dx.doi.org/10.1177/2053951718819032. [77]

Shladover, S. (2018), « Connected and automated vehicle systems: Introduction and overview », *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol. 22/3, pp. 190-200, http://dx.doi.org/10.1080/15472450.2017.1336053. [21]

Snappet (s.d.), *Snappet*, http://www.snappet.org (consulté le 1 décembre 2020). [42]

Stewart, A., H. Vrzakova, C. Sun, J. Yonehiro, C. Stone, N. Duran, V. Shute et S. D'Mello (2019), « I Say, You Say, We Say », *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, Vol. 3/CSCW, pp. 1-19, http://dx.doi.org/10.1145/3359296. [29]

Stiftung, R. (dir. pub.) (2018), *Technology-enhanced Personalised Learning: Untangling the Evidence Other How to cite,* http://www.studie-personalisiertes-lernen.de/en/ (consulté le 26 novembre 2020). [9]

Tondeur, J., L.H. Kershaw, R.R. Vanderlinde et J. van Braak (2013), « Getting inside the black box of technology integration in education: Teachers' stimulated recall of classroom observations », *Australasian Journal of Educational Technology 3,* https://ajet.org.au/index.php/AJET/article/view/16. [4]

Topol, E. (2019), « High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence », *Nature Medicine*, Vol. 25/1, pp. 44-56, http://dx.doi.org/10.1038/s41591-018-0300-7. [12]

UNESCO (2019), *Beijing Consensus on Artificial Intelligence and Education*, https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000368303. [78]

VanLEHN, K. (2011), « The Relative Effectiveness of Human Tutoring, Intelligent Tutoring Systems, and Other Tutoring Systems », *Educational Psychologist*, Vol. 46/4, pp. 197-221, http://dx.doi.org/10.1080/00461520.2011.611369. [25]

VanLehn, K. (2015), « Regulative Loops, Step Loops and Task Loops », *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, Vol. 26/1, pp. 107-112, http://dx.doi.org/10.1007/s40593-015-0056-x. [55]

VanLehn, K. (2006), « The Behavior of Tutoring Systems », *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, Vol. 16. [5]

Vincent-Lancrin, S., J. Urgel, S. Kar et G. Jacotin (2019), *Measuring Innovation in Education 2019: What Has Changed in the Classroom?,* Educational Research and Innovation, OECD Publishing, Paris, https://dx.doi.org/10.1787/9789264311671-en. [54]

Wingo, G. (1961), « Teaching Machines », *Journal of Teacher Education*, Vol. 12/2, pp. 248-249, http://dx.doi.org/10.1177/002248716101200225. [23]

Winne, P. (2017), « Learning Analytics for Self-Regulated Learning », dans *Handbook of Learning Analytics,* Society for Learning Analytics Research (SoLAR), http://dx.doi.org/10.18608/hla17.021. [63]

Winne, P. et R. Baker (2013), « The Potentials of Educational Data Mining for Researching Metacognition, Motivation and Self-Regulated Learning », *JEDM - Journal of Educational Data Mining*, Vol. 5/1, pp. 1-8, https://doi.org/10.5281/zenodo.3554619. [6]

Winne, P. et A. Hadwin (1998), « Studying as self-regulated learning », *Metacognition in educational theory and practice*. [64]

Wise, A. (2014), « Designing pedagogical interventions to support student use of learning analytics », *Proceedins of the Fourth International Conference on Learning Analytics And Knowledge - LAK '14*, http://dx.doi.org/10.1145/2567574.2567588. [37]

World Economic Forum (2018), *The future of jobs report.* [68]

4 Technologies d'apprentissage numériques : Comment améliorer l'implication des élèves ?

Sidney K. D'Mello
Université de Colorado Boulder (États-Unis)

L'apprentissage ne va pas sans une implication de soi, mais arriver à véritablement mobiliser l'élève et à encourager un apprentissage en profondeur n'est pas chose facile. Les technologies numériques sont elles un atout en ce sens ? Ce chapitre propose de passer en revue certaines pistes prometteuses pour mesurer le niveau d'implication des élèves au cours de leur apprentissage grâce aux technologies numériques et d'examiner comment ces technologies peuvent être amenées à renforcer l'implication au début de l'apprentissage ou dès les premiers signes de désinvestissement. Il explique pourquoi l'implication est essentielle dans l'apprentissage, comment mesurer cette implication à l'aide des technologies numériques, et liste différentes méthodes d'utilisation des données et de la technologie en vue d'améliorer le niveau de mobilisation et l'apprentissage des élèves.

Introduction

Améliorer l'implication durable des élèves dans l'apprentissage est devenu un objectif clé en éducation pour au moins deux raisons : (1) elle est une condition préalable à un apprentissage efficace ; et (2) réussir à la maintenir demande des compétences cognitives et socio-émotionnelles qui sont des objectifs d'apprentissage en soi. Les technologies numériques ont fait de grands progrès, notamment avec les capteurs, les techniques avancées d'analyse de données, et les expériences d'apprentissage numérique innovantes ; elles ouvrent de nouveaux horizons dans les domaines de la mesure, du développement théorique, et de la conception des interventions pédagogiques qui peuvent contribuer à maintenir l'élève mobilisé dans ses activités d'apprentissage.

Au cours des deux dernières décennies, les chercheurs et les développeurs ont considérablement progressé dans la conception des technologies d'apprentissage afin d'encourager la participation et l'apprentissage. Ce chapitre brosse un tableau de ces technologies émergentes et examine certaines pistes prometteuses pour la décennie à venir. Il s'attarde principalement sur les environnements d'apprentissage numériques plutôt qu'aux salles de classe traditionnelles, même si certaines technologies s'adapteront bientôt à la salle de classe. À ce stade, une majeure partie des technologies d'apprentissage numériques qui ont été mises au point pour mesurer et favoriser l'implication ont été testées en situation de laboratoires de recherche, mais on assiste à une multiplication progressive des études en milieux réels. Jusqu'à maintenant, les résultats sont plutôt mitigés, ce qui est plutôt normal dans un domaine aussi récent.

L'implication est un concept facile à comprendre mais difficile à définir. En conséquence, après avoir souligné la pertinence de l'implication dans l'apprentissage, ce chapitre aborde les difficultés que pose sa définition scientifique. Il donne ensuite un aperçu des approches actuelles en matière de mesure de l'implication et examine comment les technologies numériques et les progrès dans les méthodes et technologies informatiques permettent des améliorations rapides dans ce domaine. Une fois les questions de définition et de mesure cernées, nous décrivons comment les technologies d'apprentissage ont tenté d'améliorer la participation et l'apprentissage par le biais de stratégies proactives et d'interactions réactives. Ces approches, que des exemples et des études de cas illustrent, esquissent ce qui pourrait bien devenir réalité prochainement, quand ce n'est pas déjà largement répandu dans les environnements d'apprentissage numérique. Pour finir, le chapitre discute des prochaines étapes importantes de ce programme de recherche et des transformations qu'il pourrait apporter dans les pratiques pédagogiques à l'avenir.

La valeur de l'implication

Voilà des décennies qu'on reconnait la valeur de l'implication dans l'apprentissage et qu'on cherche à en comprendre les mécanismes. La recherche a largement confirmé la conclusion suivante : un élève motivé est un élève qui est prêt à apprendre ; un élève démotivé ne l'est pas. L'ennui notamment, qui est en quelque sorte l'antithèse de l'implication, n'est pas simplement un sentiment désagréable. Il va de pair avec le manque d'attention (Danckert et Merrifield, 2018[1] ; Eastwood et al., 2012[2] ; Hunter et Eastwood, 2018[3]) et est systématiquement corrélé négativement aux résultats d'apprentissage (Pekrun et al., 2014[4] ; Putwain et al., 2018[5]). Par exemple, une récente méta-analyse portant sur 29 études (N = 19 052 élèves) a révélé un effet global négatif significatif r = -0.24 de l'ennui sur les résultats scolaires (Tze, Daniels et Klassen, 2016[6]). Il est évidemment inutile, et même irréaliste, d'attendre d'un élève qu'il soit investi en permanence ; il y aura toujours des moments de désinvestissement, mais cela ne devrait pas poser de problème s'ils sont peu fréquents. Par contre, le désinvestissement durable est associé à une série de résultats négatifs, notamment de faibles niveaux de réussite, une efficacité personnelle moindre, une baisse d'intérêt dans les activités éducatives, l'adoption de comportements à haut risque et surtout une augmentation de l'abandon et du décrochage scolaire (Baker et al., 2010[7] ; Csikszentmihalyi, 1975[8] ; Daniels et al., 2009[9] ; Farrell et al., 1988[10] ; Finn et Voelkl, 1993[11] ; Griffiths et al., 2012[12] ; Mann et Robinson, 2009[13] ; Patrick, Skinner et Connell, 1993[14] ; Pekrun et al., 2010[15] ; Perkins et Hill, 1985[16]) (Wasson, 1981[17]). D'un point de vue plus positif, l'implication scolaire est associée à plusieurs résultats bénéfiques au-delà de la réussite scolaire elle-même.

Une grande partie de la recherche à ce sujet s'est concentrée sur l'apprentissage classique tel que dispensé dans la salle de classe et les établissements scolaires. Le manuel *Handbook of Research on Student Engagement* (Christenson, Reschly et Wylie, 2012[18]) présente de manière détaillée une série de questions relatives à l'implication dans ces environnements d'apprentissage. Toutefois, avec l'avènement des appareils mobiles, l'Internet et les médias sociaux, une grande partie de l'apprentissage se fait par le biais de ces dispositifs numériques. Mais comment faire quand on sait à quel point il est particulièrement compliqué de mobiliser les élèves lorsqu'ils interagissent avec les technologies d'apprentissage numérique, souvent de manière isolée ? Les cours en ligne ouverts à tous (MOOCS), par exemple, ont atteint un niveau de rayonnement impressionnant en ouvrant leur contenu à des millions de personnes dans le monde. Pourtant, les MOOCS classiques (xMOOCs), principalement destinés au visionnement de vidéos, à remplir des auto-évaluations et peut-être à participer à des discussions en ligne connaissent de gros problèmes en termes d'implication et de décrochage (Yang et al., 2013[19]). Là où un enseignant talentueux ou un tuteur expérimenté peut concevoir des activités collaboratives afin d'augmenter la motivation et adapter le cours lorsqu'il remarque une baisse de la motivation, les technologies d'apprentissage numériques ont du mal à encourager et à maintenir une motivation élevée chez tous les apprenants. Même si une technologie d'apprentissage réussit au début à captiver les élèves, celle-ci offre peu de solutions quand l'aspect de la nouveauté s'estompe, que l'élève reste bloqué ou que l'ennui finit par s'installer.

La conception d'expériences d'apprentissage numériques qui favorisent la mobilisation et l'apprentissage conceptuel approfondi est une tâche difficile, car il faut pour cela combler le fossé existant entre apprentissage et envie, qui sont souvent en opposition. C'est un véritable casse-tête. D'une part, il est très facile de faire plaisir aux élèves avec des puzzles, des jeux et d'autres astuces « ludo-éducatives », et, nul doute qu'ils trouvent ces expériences très intéressantes, mais rien ne dit qu'ils apprennent quelque chose d'important, particulièrement à des niveaux de compréhension plus élevés (Charsky, 2010[20] ; Papert, 1998[21]). En outre, les méthodes qui cherchent à susciter l'intérêt en travaillant à l'aide de matériel pédagogique (p. ex., couverture d'événements,

images très réalistes) peuvent, en fait, nuire à l'apprentissage en détournant l'attention et les ressources cognitives du contenu d'apprentissage (Rey, 2012[22]). D'autre part, plusieurs décennies de recherche en science cognitive de l'apprentissage ont permis de dégager des principes d'apprentissage efficaces, (Bransford, Brown et Cocking, 2000[23] ; Karpicke et Blunt, 2011[24] ; Roediger et Karpicke, 2006[25]), qui peuvent être mis en œuvre dans les technologies d'apprentissage, comme les systèmes de tutorat intelligents (STI). Toutefois, malgré les avantages largement connus des systèmes de tutorat intelligents, (Steenbergen-Hu et Cooper, 2014[26]) et d'autres technologies en matière d'apprentissage, qui mettent en œuvre des principes d'apprentissage approfondi (McNamara et al., 2006[27]), les élèves estiment que l'interaction avec ces technologies est assez fastidieuse (Baker et al., 2010[7] ; Craig et al., 2008[28]) mais voir également (Rodrigo et Baker, 2011[29]) où exceptionnellement les systèmes de tutorat intelligents sont considérés plus intéressants que les jeux). Au cœur du problème, il y a le fait que l'apprentissage est ardu, qu'il exige de faire des efforts considérables et beaucoup de pratique pour arriver à le maîtriser (Ericsson, Krampe et Tesch-Römer, 1993[30]). La satisfaction arrive plus tard, alors qu'il est beaucoup plus gratifiant (à court terme) de se désinvestir de l'apprentissage et de s'investir dans quelque chose de plus immédiatement gratifiant, comme les médias sociaux (Duckworth et al., 2019[31]). Bien entendu, le désengagement se paie cher plus tard, comme mentionné plus haut.

Définition de l'implication

Au contraire des entités physiques, comme la température et la masse, l'implication est une entité conceptuelle, un concept qui peut être défini de manière opérationnelle (scientifique). Si l'on considère par exemple quatre élèves fictifs de l'enseignement secondaire qui suivent un cours de maths.

- Keisha assiste au cours de maths tous les jours, elle écoute attentivement, pose de bonnes questions et fait ses devoirs. Si on le lui demande, elle dira que les maths sont la matière qu'elle aime le moins, mais elle reconnait que c'est important pour son avenir.
- James manque souvent le cours de maths, essaie d'écouter consciencieusement lorsqu'il est présent, mais finit souvent par se déconcentrer. Il rend environ 50 % de ses devoirs de maths et éprouve un sentiment ambivalent à l'égard des maths et de l'école en général.
- Raphaël assiste à chaque cours de maths, reste assis sans jamais parler, prend beaucoup de notes et termine toujours ses devoirs. Il aime les maths, mais ce qui le passionne ce sont les sciences, car il veut devenir biologiste.
- Marc est passionné par les maths et passe son temps libre à faire des jeux mathématiques. Il est présent à chaque cours mais trouve que les exercices sont trop faciles, si bien qu'il s'ennuie régulièrement et essaie de trouver des erreurs dans les propos de l'enseignant pour passer le temps. Il essaie de terminer ses devoirs de maths chaque soir, mais il estime que c'est fastidieux et trop répétitif, alors il s'active sur les réseaux sociaux à la place.

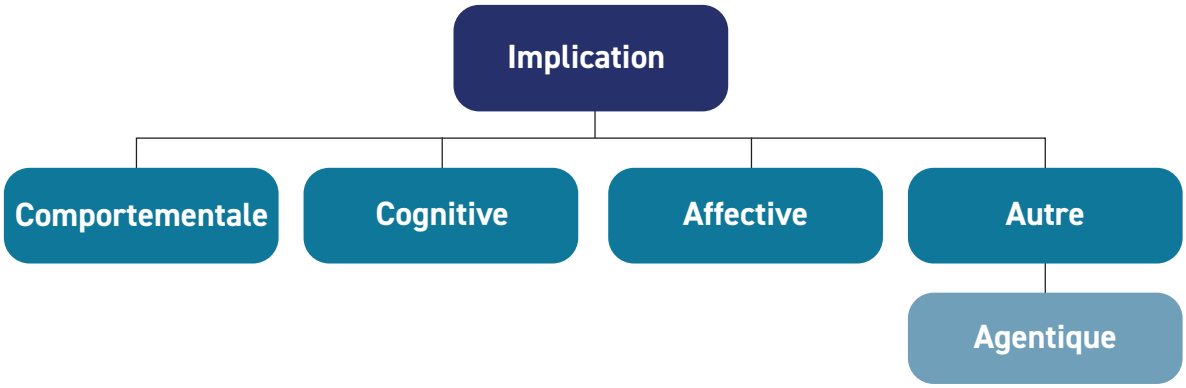
Lequel de ces élèves est le plus investi et lequel ne l'est pas ? Est-ce que la définition du dictionnaire pourrait nous éclairer ? Le dictionnaire Merriam-Webster défini impliqué/implication comme « investi dans une activité », « très intéressé », et « participation ou investissement émotionnel ». Toutefois, comme le mentionnent Eccles et Wang (2012[32]), si ces définitions génériques rendent le concept plus compréhensible aux yeux des décideurs et des profanes instruits, elles sont beaucoup moins utiles pour la recherche scientifique qui accorde une grande valeur à des définitions précises notamment lorsqu'il s'agit d'éclaircir les relations de cause à effet.

Malheureusement, on est encore loin d'une telle définition scientifique de l'implication. Reschly et Christenson (2012[33]) remarquent que le mot *implication* a servi à décrire des comportements variés, des pensées, des perceptions, des sentiments et attitudes, et, en même temps, divers termes ont été utilisés pour faire référence à des concepts similaires. On comprend l'implication comme un concept large et complexe qui se rapporte à divers aspects de l'expérience éducative (p. ex., être présent, faire ses devoirs, avoir un sentiment d'appartenance, passer un bon moment) et à des échelles de temps multiples (p. ex., des périodes passagères d'intérêt, des tendances constantes telles que le désinvestissement général à l'égard de l'établissement scolaire et des conséquences plus sérieuses à long terme comme le décrochage scolaire). En conséquence, il vaudrait peut-être mieux étudier des aspects précis de ce concept complexe plutôt que de chercher une définition globale, mais par trop générale.

Les chercheurs s'accordent à dire dans l'ensemble que l'implication est un concept multidimensionnel, bien que le nombre et la nature de ces dimensions restent flous (Graphique 4.1). Dans un article très influent, Fredricks, Blumenfeld et Paris (2004[34]) proposent de décomposer ce concept en trois dimensions. Les sentiments et les attitudes *d'implication émotionnelle* à l'égard de la tâche d'apprentissage ou de l'environnement d'apprentissage, tels que l'intérêt porté à la matière spécifique ou à l'enseignant (Renninger et Bachrach, 2015[35]), ou la satisfaction globale à l'égard de l'établissement. *L'implication comportementale* qui correspond généralement à la participation des apprenants dans l'apprentissage, notamment l'effort, la persévérance et la concentration. *L'implication cognitive* qui relève de l'investissement des apprenants dans les tâches d'apprentissage, telles que la manière dont ils répartissent leurs efforts ainsi que leur compréhension et leur maîtrise de la matière.

Reeve et Tseng (2011[36]) ont récemment suggéré une quatrième dimension : l'implication *agentique*, par laquelle les apprenants contribuent de manière proactive au processus d'apprentissage. Par ailleurs, Pekrun et Linnenbrink-Garcia (2012[37]) proposent un modèle à cinq dimensions qui comprend les aspects d'implication cognitive (p. ex., les processus de l'attention et de la mémorisation), motivationnelle (p. ex., les motivations intrinsèque et extrinsèque), comportementale (p. ex., l'effort et la persévérance), socio-comportementale (p. ex., participation avec les pairs), et cognitivo-comportementale (p. ex., l'utilisation de stratégies et l'autorégulation).

Graphique 4.1 Les dimensions de l'implication



Source: D'Mello.

Outre les dimensions de l'implication, l'élément temporel et l'influence des facteurs environnementaux sont également très importants. En ce qui concerne l'élément temporel un intérêt passager pour un sujet qui motive un élève pendant quelques minutes ou quelques heures diffère de l'intérêt qu'un élève maintient pendant des mois et des années (Hidi et Renninger, 2006[38]). Il est généralement admis que le contexte dans lequel se situe l'activité a une influence énorme sur les modèles d'implication qui en résultent. L'implication n'est pas une propriété intrinsèque des individus, mais elle émerge des interactions entre les individus et leurs environnements que ce soit avec les pairs, les enseignants, la famille et les structures scolaires (Christenson, Reschly et Wylie, 2012[18]).

En conséquence, Sinatra, Heddy et Lombardi (2015[39]) proposent un cadre qui englobe les dimensions de l'implication, l'élément temporel, et les influences contextuelles de l'implication (Graphique 4.2). Ce cadre schématise l'implication selon un continuum, qui s'appuie, à une extrémité, sur des perspectives centrées sur la personne, à l'autre extrémité, sur le contexte, et, entre les deux sur une perspective centrée sur la personne dans son environnement. La perspective centrée sur la personne s'intéresse aux états cognitifs, affectifs et motivationnels de l'élève pendant l'apprentissage, ceux-ci pouvant être mieux appréhendés à l'aide de mesures physiologiques et comportementales très précises (p. ex., des comportements de réponses, des expressions faciales). La perspective centrée sur le contexte met l'accent sur le contexte environnemental comme unité analytique. À cet égard, on s'intéresse aux macrostructures comme les enseignants, les salles de classe et la collectivité plutôt que sur l'élève pris individuellement. L'élément intermédiaire, la perspective centrée sur la personne dans le contexte, se penche sur l'interaction entre les élèves et l'environnement (p. ex., comment les élèves interagissent les uns avec les autres ou avec la technologie). Ce niveau d'analyse examine, par exemple, si certaines activités en classe (p. ex., le travail en petit groupe) motivent davantage que d'autres (p. ex., un cours magistral).

Graphique 4.2 Élément temporel de l'implication et influence du contexte

Source: D'Mello.

Si l'on s'en tient seulement à l'apprentissage numérique, on peut définir l'implication, sur un plan opérationnel, comme un état orienté vers un objectif de participation actif et ciblé avec les technologies d'apprentissage numérique. Cette opérationnalisation correspond au niveau d'analyse orienté vers la personne de Sinatra et al. (2015) dans lequel l'accent est mis sur l'état (et non sur les caractéristiques) des éléments affectifs, comportementaux et cognitifs de l'implication sur de courtes échelles de temps allant de quelques secondes à plusieurs minutes. Dans la plupart des cas, l'ennui, la somnolence et une distraction excessive seraient des signes de décrochage tandis que l'intérêt, la curiosité et l'expérience optimale au cours de laquelle l'apprenant est tellement pris par son activité que la notion de temps et d'espace disparaît (Csikszentmihalyi, 1990[40]) signaleraient l'implication. Toutefois, dans certains cas, les états mentaux spécifiques (et leurs niveaux) liés à l'implication fluctuent en fonction de ce que peut offrir la technologie d'apprentissage. Ainsi, la frustration, émotion négative, qui naît en jouant à un jeu éducatif compliqué pourrait indiquer que l'élève est investi, car cette émotion fait partie intégrante du « plaisir ardu » d'apprendre par le jeu (Gee, 2003[41]), alors que la frustration ressentie au cours d'une simple activité d'apprentissage de vocabulaire peut signaler tout autre chose qu'une implication dans l'apprentissage.

Mesure de l'implication

L'efficacité de toute approche permettant d'améliorer l'implication repose sur la validité de la mesure de l'implication. Alors comment mesure-t-on l'implication habituellement ? Le Graphique 4.3 présente une vue d'ensemble des diverses approches à cet égard.

Les approches classiques

Les mesures de l'implication les plus répandues dans deux formes d'éducation, classique et numérique, sont les questionnaires d'auto-évaluation (Fredricks et McColskey, 2012[42] ; Greene, 2015[43] ; Henrie, Halverson et Graham, 2015[44]). Dans ces questionnaires, on demande aux élèves de cocher des items tels que « Lorsque je suis en classe, j'écoute très attentivement » (un item concernant l'implication comportementale) ou « j'aime apprendre des choses nouvelles en classe » (un item concernant l'implication émotionnelle). Généralement relativement peu couteux, faciles à administrer et fiables, les questionnaires ont cependant des limitations bien connues (Duckworth et Yeager, 2015[45] ; Krosnick, 1999[46]). Par exemple, lorsqu'ils cochent les items, les répondants doivent comparer le sujet (p. ex., un élève se notant lui-même) par rapport à une norme implicite, sachant que les normes peuvent varier d'un répondant à un autre. Pour un élève « je suis investi dans mon cours de maths » peut signifier passer cinq heures par jour à faire ses devoirs, alors que pour un autre, la même affirmation signifie simplement être présent au cours. Ainsi, les biais qui émergent de ces cadres de référence hétérogènes diminuent la validité des questionnaires d'auto-évaluation (Heine et al., 2002[47]). Le biais de désirabilité sociale est une autre limitation importante (Krosnick, 1999[46]), que ce soit lorsque les répondants veulent se montrer sous leur plus beau jour aux autres ou qu'ils enjolivent leurs réponses pour préserver leur propre estime. De même, les limites du rappel de la mémoire et le biais d'acquiescement peuvent avoir une influence sur les auto-évaluations du questionnaire (Podsakoff et al., 2003[48]).

Plusieurs mesures d'implication sans utilisation de questionnaires ont également été mises au point. Parmi celles-ci, on trouve les méthodes d'échantillonnage de l'expérience (MEE) (Csikszentmihalyi et Larson, 1987[49]), de reconstruction de la journée (Kahneman et al., 2004[50]), et des entretiens (Turner et Meyer, 2000[51]). Toutefois, parce qu'elles reposent encore sur des auto-évaluations, elles sont également susceptibles d'être affectées par les mêmes biais que les questionnaires. Par exemple, la MEE est soumise à des biais de désirabilité sociale mais pas à ceux de rappel de la mémoire.

Les méthodes d'observation sont une alternative intéressante aux auto-évaluations, car plus objectives (Nystrand et Gamoran, 1991[52] ; Pianta, Hamre et Allen, 2012[53] ; Renninger et Bachrach, 2015[35] ; Ryu et Lombardi, 2015[54] ; Volpe et al., 2005[55]). Malheureusement, ces méthodes supposent des efforts humains considérables, ce qui pose un énorme défi pour la mise en œuvre de mesures répétées à grande échelle. En outre, il est impossible de mener des observations dans certains environnements d'apprentissage comme le domicile des élèves. On pourrait remédier à certaines limitations en combinant la collecte des données automatiques avec un codage semi-automatique ou manuel des données. Par exemple, l'enregistreur activé électroniquement (EAR) sélectionne de manière aléatoire des clips audio dans des environnements naturels (Mehl et al., 2001[56]). La collecte de données avec l'EAR est efficace et économique ; cependant, les données doivent être transcrites et codées par les humains, ce qui en augmente le coût et en diminue la flexibilité. De même, on peut coder l'implication à partir des vidéos prises par les chercheurs (Lehman et al., 2008[57]) ou même par les enseignants (D'Mello et al., 2008[58]), mais le codage de vidéos est un effort qui demande beaucoup de travail et de temps. Pour remédier à cet obstacle, certaines expériences ont été faites pour analyser automatiquement les vidéos afin d'en extraire les éléments de l'implication de l'élève (Aung, Ramakrishnan et Whitehill, 2018[59] ; Bidwell et Fuchs, 2011[60] ; Klein et Celik, 2017[61] ; Raca, Kidzinski et Dillenbourg, 2015[62]), mais la recherche en est à ses premiers balbutiements, en partie en raison de la difficulté d'enregistrer des vidéos en classe et des problèmes de confidentialité qui s'y rattachent.

Enfin, les dossiers scolaires et les relevés de comportements permettent de repérer l'implication, comme les devoirs remis à temps, les absences, les résultats aux tests de performance, le temps passé sur les plateformes numériques, etc. (Arnold et Pistilli, 2012[63] ; Lehr, Sinclair et Christenson, 2004[64] ; Skinner et Belmont, 1993[65]), mais ces instruments de mesure sont limités quant à ce qu'ils révèlent sur les éléments cognitifs et affectifs de l'implication. Ainsi, dans le monde de la technologie, l'implication s'apparente souvent à l'utilisation, et il est quantifié par le nombre de connexions, de clics, etc. Cette caractérisation, qui ne rend compte que de comportements manifestes, est clairement insuffisante en ce qu'elle se concentre sur une seule dimension (comportementale) d'un concept multidimensionnel (voir ci-dessus).

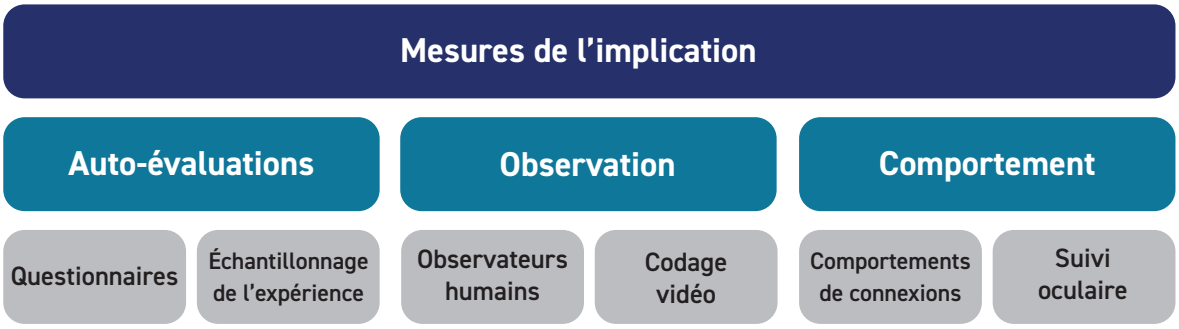
La mesure numérique automatisée

Les avancées scientifiques sur la compréhension de l'implication et les interventions permettant de la stimuler sont freinées par des méthodes qui sont coûteuses ou dont les biais et limites sont connus. Renforcer l'implication dans le contexte de l'apprentissage numérique représente d'abord et avant tout un défi au niveau de la théorie et de la mesure, que les progrès dans le domaine des capteurs et des technologies numériques sont susceptibles de surmonter. L'une des conclusions les plus pertinentes en termes de politiques, de pratiques, de recherche et de conception qui a émergé des rapports récents sur l'implication et autres facteurs similaires (Atkins-Burnett et al., 2012[66] ; Shechtman et al., 2013[67]) est l'usage excessif des instruments d'auto-évaluation des élèves et la trop grande confiance qu'on leur accorde. Ceci fausse les conclusions et théories actuelles même lorsqu'elles sont issues de modèles de recherches rigoureux et d'échantillons de grande taille fournis par le monde de la recherche et du développement, des politiques et des pratiques en éducation. Dans le passé et encore aujourd'hui, la théorie et les interventions de programme reposent sur les données d'auto-évaluation des élèves et utilisent ces mesures pour évaluer les programmes et influer sur la théorie. Les technologies numériques et les méthodes d'analyse de données avancées permettent de briser ce cercle vicieux et de progresser dans notre compréhension de l'implication de manière systématique et significative en dépassant l'utilisation des seules mesures d'auto-évaluation des élèves. Des mesures fiables, valides, justes et efficaces provenant de diverses sources et analysées par des chercheurs chevronnés qui appliquent des méthodes et techniques adéquates permettront de faire fructifier les travaux de recherche et évaluations de programme.

D'Mello, Dieterle et Duckworth (2017[68]) ont récemment proposé l'approche avancée, analytique et automatisée (AAA) pour mesurer l'implication comme méthode alternative particulièrement adaptée à l'étude des interactions avec les technologies d'apprentissage numériques. Cette approche AAA met l'accent sur l'opérationnalisation de l'implication axée sur la personne en tant qu'états affectif et cognitif momentanés qui surviennent tout au long du processus d'apprentissage (ce qui est cohérent avec la définition opérationnelle fournie ci-dessus). Les mesures reposant sur l'AAA ont de nombreux avantages par rapport aux autres. En premier lieu, elles sont automatisées, ce qui signifie qu'elles peuvent s'appliquer à grande échelle. En deuxième lieu, elles sont plus cohérentes, car ce sont les ordinateurs qui fournissent les mesures, permettant d'éviter en partie les biais de référence, de désirabilité sociale, d'acquiescement, et autres biais associés aux déclarations d'observateurs et aux auto-évaluations. Ces mesures ne sont pas non plus affectées par des défaillances momentanées de l'attention ou par la fatigue,

comme cela peut se produire si elles étaient fournies par les humains. Elles réduisent considérablement les pertes de temps et les efforts, ce qui n'est pas le cas pour la MEE, la reconstruction d'une journée, le codage de vidéos et les observations humaines.

Graphique 4.3 Les grandes catégories de mesure de l'implication illustrées par des exemples (dernière rangée)



Source: D'Mello.

L'idée au cœur de l'approche AAA (Graphique 4.4) est de faire en sorte que les machines *déduisent* les états mentaux latents associés à l'engagement (p. ex., la concentration, l'intérêt) à partir de signaux lisibles par la machine et d'éléments du contexte environnemental. Cette approche fait appel à l'apprentissage automatique qui nécessite des *données d'entraînement* pour apprendre un modèle informatique (programme informatique) qui peut s'appliquer sur des données collectées dans le futur (*données invisibles*). En conséquence, l'approche AAA commence par la collecte de données d'entraînement.

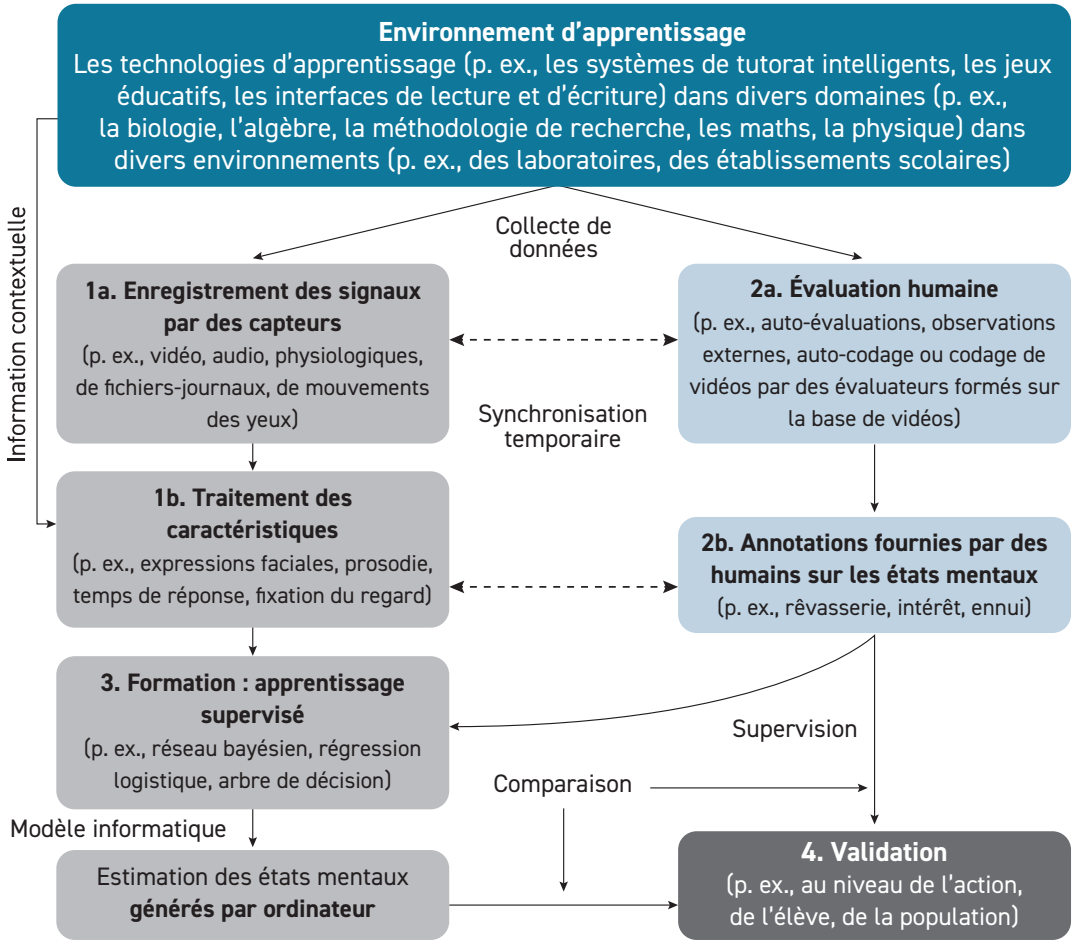
La première étape consiste à enregistrer les *signaux* (vidéo, physiologiques, de fichiers-journaux, etc.) au fur et à mesure que les élèves accomplissent leur activité dans un environnement d'apprentissage spécifique (étape 1a), puis à traiter des représentations d'ordre supérieur (appelées *caractéristiques*) des signaux (étape 1b). Une vidéo est un exemple de signal dont on peut extraire automatiquement des caractéristiques comme les sourires, les hochements, les froncements de sourcils, etc. à l'aide de techniques de vision par ordinateur (Valstar et al., 2012[69]). Les modèles d'interactions des élèves (c'est-à-dire les flux de clics) avec les technologies d'apprentissage offrent d'autres signaux révélateurs de l'implication de l'élève (Baker et Ocumpaugh, 2015[70]).

Au cours de la deuxième étape, on obtient auprès des élèves eux-mêmes ou via des observateurs externes ou par une autre méthode, les *annotations* des états mentaux reflétant divers éléments de l'implication (pour une synthèse, voir Porayska-Pomsta et al., 2013[71]). À titre d'exemple, on peut demander aux élèves de déclarer leur niveau d'intérêt toutes les cinq minutes (Sabourin et Lester, 2014[72]) ou un observateur humain chevronné peut observer les interactions qui s'ensuivent et coder l'affect perçu par les élèves à intervalles de cinq minutes (Ocumpaugh, Baker et Rodrigo, 2015[73]). Les caractéristiques et annotations doivent être synchronisées dans le temps pour pouvoir les associer. Par exemple, le nombre de clics avec la souris et de sourires à chaque intervalle de cinq minutes peut être corrélé aux déclarations de l'apprenant ou de l'observateur sur l'implication au cours du même intervalle.

La troisième étape de cette approche AAA implique l'apprentissage supervisé (un sous-domaine de l'apprentissage automatique) qui apprend à associer les caractéristiques (extraites des signaux enregistrés par les capteurs comme mentionné ci-dessus) avec les annotations des états mentaux synchronisées dans le temps (p. ex., provenant des déclarations de l'élève ou de jugements de l'observateur) et collectées à plusieurs moments différents au cours d'une séance d'apprentissage et/ou auprès de plusieurs élèves, idéalement dans des environnements différents. Il en résulte un modèle informatique (ou un programme informatique) qui produit des annotations générées par ordinateur, qui remplacent les annotations fournies par l'homme. Comme résumé ci-dessous :

1. caractéristiques + annotations fournies par l'humain → *modèle informatique*
2. caractéristiques + *modèle informatique* → *annotations générées par ordinateur*

Graphique 4.4 Vue d'ensemble de l'approche AAA



Source: Reproduit de D'Mello, Dieterle et Duckworth (2017[68]).

Dans la quatrième étape, les annotations générées par ordinateur sont comparées aux annotations fournies par l'humain afin de *valider* le modèle. Le but est que les annotations générées par ordinateur correspondent à celles fournies par l'humain (fiabilité) quand elles sont appliquées aux données nouvelles ou invisibles, par exemple provenant d'un ensemble différent d'élèves (généralisabilité). Une fois le modèle suffisamment validé, il peut être *déployé*. À partir des données collectées par le capteur à un moment ultérieur et/ou à partir d'un nouvel ensemble d'apprenants, le modèle génère automatiquement des estimations (annotations) de l'implication. Le Graphique 4.4 présente une vue d'ensemble de cette approche.

Il est important de tenir compte des problèmes de confidentialité pour les mesures qui utilisent des signaux biométriques (p. ex., une image du visage, un échantillon audio). Certains capteurs peuvent également enregistrer par inadvertance des informations sensibles, comme dans le scandale du « WebcamGate » où les autorités scolaires d'un district américain ont eu accès à distance aux ordinateurs portables prêtés par l'établissement aux élèves et ont pris des photos des élèves chez eux, de leur historique de chat, et des informations sur les sites web qu'ils visitaient sans en informer les élèves ou leurs parents (Martin, 2010[74]). La meilleure façon de protéger la confidentialité est de ne retenir que les caractéristiques non identifiables des signaux, en écartant les signaux eux-mêmes comme l'ont fait Bosch et D'Mello (Bosch et D'Mello, 2019[75]). En plus de la confidentialité, d'autres questions demeurent concernant la partialité et l'équité des modèles sous-jacents. Il est donc essentiel que les données d'entraînement soient représentatives de différents sous-groupes et que les modèles présentent des performances équivalentes pour tous les sous-groupes (REFS) (Gardner, Brooks et Baker, 2019[76] ; Jensen, Hutt et D'Mello, 2019[77]). La façon dont les mesures sont utilisées soulève également des inquiétudes éthiques. Leur utilisation pour les évaluations d'enseignants ou d'élèves *n'est pas* recommandée, car ces mesures sont imparfaites et des facteurs échappant au contrôle des élèves et des enseignants influencent l'implication.

L'utilisation continue n'est pas non plus recommandée, car elle peut donner l'impression, légitime, aux élèves d'être surveillés par ces technologies – une préoccupation que l'on retrouve surtout parmi les populations d'élèves marginalisés. Comme nous l'expliquons dans la section suivante, c'est dans l'amélioration des technologies d'apprentissage que ces mesures sont les plus efficaces, soit en mesurant passivement les périodes de désinvestissement en vue d'un examen rétrospectif et d'un perfectionnement (Miller et al., 2014[78]), ou, de manière plus dynamique, en remobilisant les élèves désinvestis (D'Mello et al., 2016[79] ; De Falco, Baker et D'Mello, 2014[80]). Leur utilisation devrait être limitée et idéalement reposer sur le consentement explicite des élèves et des aidants.

Exemples de mesures d'implication à l'aide de l'approche avancée, analytique et automatisée

D'Mello, Dieterle et Duckworth (2017[68]) examinent 15 études qui ont fait appel à l'approche AAA pour mesurer l'implication par le biais d'une variété de technologies d'apprentissage, (p. ex., système de tutorat intelligent, jeu éducatif), de matières (p. ex., l'algèbre, la biologie), de populations d'élèves, d'opérationnalisations de l'implication, de méthodes appliquées pour obtenir des annotations humaines, de méthodes de classification supervisées et de méthodes de validation. Leur examen repose sur les capteurs utilisés pour les mesures. Les mesures sans l'aide de capteurs analysent les traces numériques enregistrées dans les fichiers-journaux, (Bixler et D'Mello, 2013[81] ; Gobert, Baker et Wixon, 2015[82] ; Hutt, Grafsgaard et D'Mello, 2019[83] ; Pardos et al., 2013[84]), alors que les mesures reposant sur des capteurs utilisent des capteurs physiques. On peut classer ces derniers dans la catégorie des *capteurs légers* s'il s'agit de capteurs qui sont déjà intégrés dans les appareils numériques actuels, tels que les webcams et les microphones (Bosch et D'Mello, 2019[75] ; Bosch et al., 2016[85] ; Forbes-Riley et Litman, 2011[86] ; Monkaresi et al., 2017[87] ; Pham et Wang, 2015[88] ; Whitehill et al., 2014[89]), ou la catégorie des *capteurs lourds* s'il s'agit de capteurs non standardisés comme les traceurs oculaires (Bixler et D'Mello, 2016[90] ; Conati, Aleven et Mitrovic, 2013[91] ; Hutt et al., 2019[92]), les capteurs de pression (D'Mello et Graesser, 2009[93] ; Mota et Picard, 2003[94]) et les capteurs physiologiques (Blanchard et al., 2014[95] ; Dindar et al., 2017[96] ; Mills et al., 2017[97]). À l'heure actuelle, les méthodes sans capteurs sont les plus fiables pour les technologies d'apprentissage, mais les méthodes reposant sur des capteurs légers gagnent du terrain et devraient devenir de sérieux concurrents au cours des dix prochaines années. Certaines recherches conjuguent les deux (Bosch et al., 2015[98] ; D'Mello et Graesser, 2010[99] ; Grafsgaard et al., 2014[100] ; Kapoor et Picard, 2005[101]). Une liste d'exemples de mesures de l'implication reposant sur l'AAA est énumérée ci-dessous.

Modèles d'interaction permettant de détecter le désinvestissement par rapport aux objectifs de la tâche

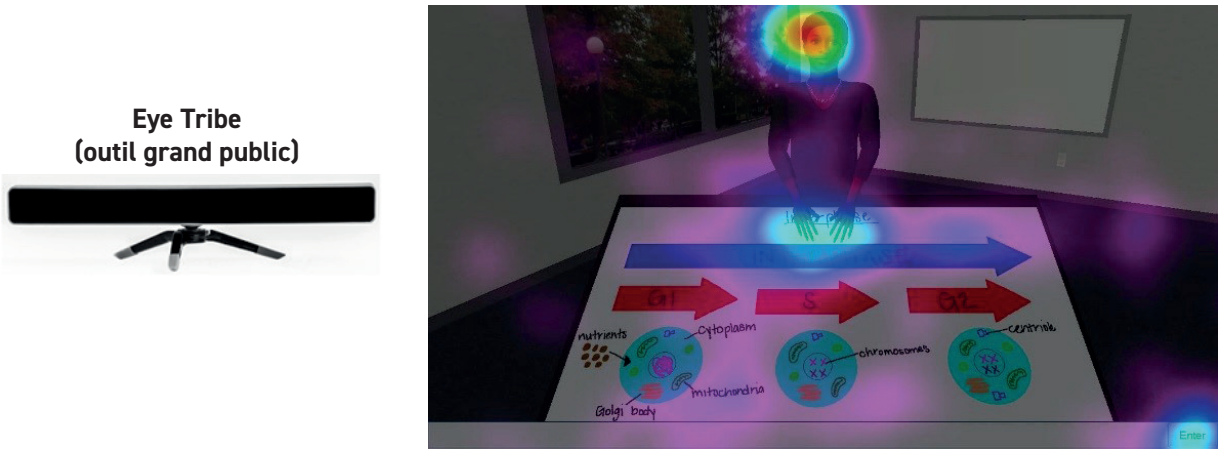
Gobert, Baker et Wixon (2015[82]) ont mis au point une mesure reposant sur l'AAA pour la plateforme Inq ITS, un environnement d'apprentissage assisté par ordinateur ayant un système de tutorat intelligent pour aider les élèves à développer leurs compétences en matière de recherche scientifique. Ils se sont penchés sur la détection du *désinvestissement* des apprenants par rapport à *l'objectif de la tâche*, défini comme l'implication dans la tâche, mais d'une manière qui n'est pas liée aux objectifs de conception de la tâche d'apprentissage ou à la structure d'incitation (p. 48). Ils ont recueilli des données d'entraînement auprès d'élèves de 144 établissements du premier cycle de l'enseignement secondaire aux États-Unis qui utilisaient Inq-ITS dans leurs cours de sciences. Deux personnes ont codé le désinvestissement par rapport à l'objectif de la tâche, à partir d'extraits lisibles par l'homme (appelés clips) de fichiers-journaux de Inq-ITS. Le nombre total d'actions, le temps écoulé entre les actions, la durée de la plus longue pause, et le nombre de simulations effectuées figuraient parmi les caractéristiques qui ont servi à la classification supervisée. Les chercheurs ont obtenu des précisions modérées (environ 41 % au-dessus de la supposition) en différenciant le désinvestissement de l'objectif de la tâche des clips sans désinvestissement, soulignant l'utilité de l'approche.

Analyse et suivi des mouvements oculaires pour détecter la distraction

Hutt et al. (2019[92]) ont utilisé des traceurs oculaires disponibles sur le marché, et repéré ainsi les signes de distraction, auprès d'élèves du secondaire qui suivaient un cours à l'aide d'un système de tutorat intelligent en biologie (GuruTutor) (Olney et al., 2012[102]) dans leur classe régulière de biologie (Graphique 4.5). Ils ont demandé aux élèves d'auto-évaluer leur distraction en répondant à la question de savoir si leur esprit était concentré sur l'environnement d'apprentissage ou s'ils pensaient à autre chose pendant toute la séance d'apprentissage. Ils ont enregistré les caractéristiques oculaires (p. ex., le nombre de fixation, la durée de fixation, les clignements) dans des intervalles de 30 secondes précédant le sondage et ont formé des classifieurs supervisés pour distinguer les réponses au sondage positives des réponses négatives à partir des caractéristiques oculaires. Les modèles se sont

avérés excellents pour détecter la distraction, avec des exactitudes plus de deux fois supérieures à celles de la chance (estimation). Il est important de noter que les prédictions des modèles sur la distraction sont négativement corrélées aux résultats d'apprentissage similaires à la distraction auto-évaluée. Les chercheurs ont intégré les modèles dans GuruTutor afin d'obtenir une estimation de la rêverie en temps réel à des fins d'évaluation et pour orienter les interventions (voir l'approche réactive ci-dessous).

Graphique 4.5 Utilisation d'un traceur oculaire grand public (à gauche) pour suivre l'attention visuelle pendant que les élèves interagissent avec Guru (à droite) dans la classe



Source: Hutt et al. (2019[92]).

Caractéristiques faciales, mouvements du corps et modèles d'interaction pour détecter l'affect

Bosch et al. (2016[85]) ont développé une mesure de l'implication reposant sur l'AAA pendant que les élèves jouaient à un jeu éducatif appelé Physics Playground (Shute, Ventura et Kim, 2013[103]) ; la section suivante présente une description de ce jeu. Ils ont recueilli des données d'entraînement auprès de 137 élèves de 8e et 9e années aux États-Unis au cours de deux séances de 55 minutes sur deux jours. Des observateurs chevronnés ont fourni des annotations en direct sur l'ennui, la concentration, la confusion, la frustration et le plaisir, en suivant un protocole d'observation, (Ocumpaugh, Baker et Rodrigo, 2015[73]), qui étaient synchronisées avec les vidéos des visages des élèves et du haut de leur corps. Les chercheurs ont extrait les mouvements du corps et diverses expressions faciales des vidéos (p. ex., les sourires) et les ont combinés avec les caractéristiques d'interaction (p. ex., le nombre de redémarrages) extraites des fichiers-journaux du jeu. Les modèles d'apprentissage supervisé entraînés à distinguer chaque état affectif des autres (p. ex., l'ennui par rapport à la confusion, la frustration, la forte concentration et le plaisir) ont donné des exactitudes modérées (environ 37 % d'amélioration par rapport au hasard).

Une approche sans capteur pour mesurer l'implication pendant l'apprentissage en ligne

Les trois exemples ci-dessus décrivent une variété de mesures fondées sur l'AAA. Toutefois, ces mesures et toutes celles qui existent ont été développées à partir de données provenant d'un petit nombre d'élèves au cours d'une ou deux séances de cours. En conséquence, elles permettent de valider l'idée générale, mais peuvent s'avérer insuffisamment robustes pour une utilisation pratique. Au contraire, Hutt, Grafsgaard et D'Mello (2019[83]) se sont servi de l'approche AAA pour développer une mesure sans capteur de l'implication de l'élève dans l'optique de l'étendre à l'échelle de dizaines de milliers d'élèves sur des périodes de temps correspondant à une année scolaire complète et plus. La recherche a été menée dans le cadre de la plateforme d'apprentissage des maths en ligne, Algebra Nation (Graphique 4.6) qui accompagne plus de 150 000 élèves étudiant l'algèbre niveau 1, l'algèbre niveau 2 et la géométrie. Pour chaque sujet, on propose aux élèves de suivre un cours sur vidéo dispensé par un ou plusieurs tuteurs humains. Ils peuvent également s'essayer à la fonction *Test Yourself* (fais un test) qui sélectionne de manière aléatoire 10 questions correspondant aux normes nationales. Les élèves peuvent consulter les commentaires suscités par leurs réponses ou regarder des vidéos proposant des solutions. Enfin, ils peuvent obtenir une aide supplémentaire grâce à un forum de discussion où ils peuvent interagir avec d'autres élèves et

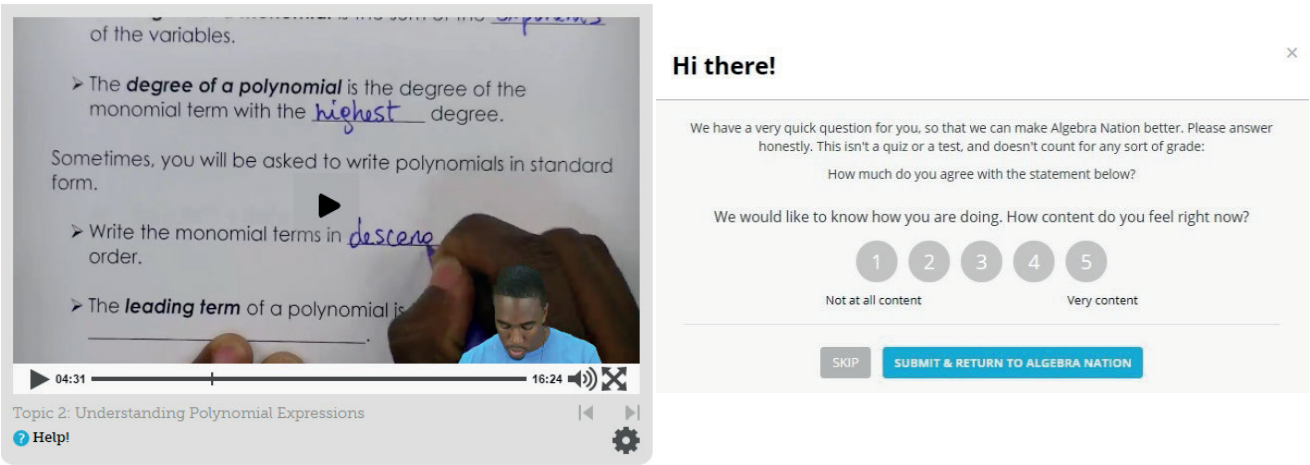
des experts spécialisés engagés par Algebra Nation. Ils peuvent gagner des *points de Karma* en répondant aux questions publiées par d'autres élèves.

Les chercheurs ont collecté un vaste ensemble de données à grande échelle auprès de 69 174 élèves qui utilisent Algebra Nation dans leurs cours de maths réguliers pendant un semestre. Ils ont eu recours à l'échantillonnage par expérience pour collecter 133 966 questionnaires d'auto-évaluation (sur une échelle de 1 à 5) de 18 états mentaux relatifs à l'implication (p. ex., l'ennui, la confusion, la rêverie, la curiosité, l'intérêt). Ils ont informatisé les caractéristiques d'activité générique (p. ex., regarder une vidéo, interrompre la vidéo pour faire un test) extraites des fichiers-journaux d'Algebra Nation ; ces caractéristiques ne nécessitant pas de capteurs spécialisés et étant (dans une certaine mesure) indépendantes de la matière et du système. Au total, ils ont compté 22 occurrences de telles caractéristiques dans un intervalle de 5 minutes avant un questionnaire d'auto-évaluation. Ils ont formé des modèles d'apprentissage supervisés pour prédire chaque état affectif à partir des caractéristiques. La précision des prédictions, quantifiée à l'aide de la corrélation de Spearman (un coefficient de corrélation allant de -1 à 1), était faible et allait de 0,08 (pour la surprise) à 0,34 (pour la joie), avec une moyenne de 0,25.

Les chercheurs ont testé la généralisibilité des modèles de l'implication de différentes façons. En premier lieu, ils ont montré que les modèles testés sur les élèves étudiant l'algèbre pouvaient se généraliser à un autre ensemble de données d'élèves étudiant la géométrie (n = 28 458) de la même plateforme. Ils ont également étudié la généralisibilité des modèles à des groupes d'élèves en s'appuyant sur l'utilisation type de la plateforme et les caractéristiques démographiques. Il en est ressorti que les modèles testés sur un groupe fonctionnaient tout aussi bien lorsque testés sur d'autres groupes, même s'il y avait un léger avantage à tester des modèles de sous-populations d'individus par rapport à un modèle général (toute la population).

Ces résultats montrent qu'il est possible d'élargir la détection de l'implication fondée sur l'AAA sans capteur à l'échantillon d'élèves le plus large et le plus hétérogène à ce jour, en utilisant des caractéristiques d'activités génériques qui ne sont pas spécifiques à une matière ou à un système particulier. Les modèles ont été intégrés dans la plateforme d'apprentissage Algebra, où on les utilise comme les éléments d'un système personnalisé qui recommande des activités aux élèves en fonction de leur capacité et de leur niveau d'implication (à partir des modèles actuels). L'étude est en cours et il faut en attendre les derniers développements pour mesurer l'efficacité de l'approche.

Graphique 4.6 Exemple de vidéo (à gauche) sur la plateforme Algebra Nation avec un questionnaire d'auto-évaluation de l'implication (à droite)



Source: Algebra Nation (s,d.,[104]).

Renforcer l'implication

Les technologies d'apprentissage se sont en général contentées de renforcer les compétences et les savoirs. L'affirmation non explicite qui sous-tend cette approche est que la cognition est tout ce qui importe, ou à tout le moins, ce qui importe réellement, ce qui a, par conséquent, relégué l'émotion et la motivation à l'état de

considérations secondaires, si tant est qu'elles soient prises en compte. Cette hypothèse avait du sens lorsque les technologies d'apprentissage en étaient à leurs balbutiements, car les théories d'apprentissage dominantes de cette époque mettaient l'accent sur l'acquisition des savoirs et des compétences (Anderson, 1982[105] ; Brown et VanLehn, 1980[106] ; Sleeman et Brown, 1982[107]). Avec le recul, nous savons que cette hypothèse était problématique puisque les élèves ont besoin d'être impliqués pour apprendre et qu'il s'avère ardu de mobiliser les élèves avec ces technologies d'apprentissage classiques. Par exemple, les systèmes de tutorat intelligents, qui copient l'enseignement individuel du tuteur humain, sont efficaces en favorisant l'apprentissage des méta-analyses (Ma et al., 2014[108] ; Steenbergen-Hu et Cooper, 2013[109] ; Steenbergen-Hu et Cooper, 2014[26]), et pourtant les élèves éprouvent un ennui mortel lorsqu'ils étudient à l'aide de systèmes de tutorat intelligents (Craig et al., 2004[110] ; D'Mello, 2013[111] ; Hawkins, Heffernan et Baker, 2013[112]). En outre, le fonctionnement de base du système humain cognitif fait qu'il est difficile de maintenir l'attention – élément central de l'implication – même quand on est motivé à le faire. Par exemple, les élèves connaissent des baisses d'attention et sont « dans la lune » environ 30 % du temps lorsqu'ils apprennent à l'aide de la technologie (D'Mello, 2019[113]). Alors qu'il est normal d'être un peu dans la lune et d'éprouver d'autres formes de démotivation au cours de l'apprentissage, rêvasser trop souvent est négativement relié aux résultats d'apprentissage (Randall, Oswald et Beier, 2014[114] ; Risko et al., 2013[115]).

Est-il possible de concevoir des environnements d'apprentissage favorisant une implication durable et par là même améliorant l'apprentissage des élèves ? Ce n'est qu'au cours des deux dernières décennies que les chercheurs se sont efforcés de *concevoir* des environnements en ce sens (del Soldato et du Boulay, 1995[116]). Les chercheurs se rejoignent sur deux stratégies principales visant à améliorer l'implication dans les technologies d'apprentissage : des structures qui l'encouragent dès le départ (proactives) ou qui intègrent des mécanismes pour la suivre en temps réel et qui permettent de réagir rapidement lorsque survient le désengagement ou qu'il est imminent (réactifs). Les deux approches peuvent aussi se combiner.

Les approches proactives

Les technologies d'apprentissage numériques proactives sont particulièrement conçues pour favoriser l'implication et l'apprentissage. De tels systèmes ont pour vocation d'augmenter la probabilité que l'apprenant éprouvera des états cognitifs et affectifs qui sont généralement associés de manière positive à l'implication (p. ex., l'intérêt, la curiosité, la profondeur du raisonnement, la pensée critique, la vigilance) tout en diminuant ceux qui sont normalement associés au détachement (p. ex., l'ennui, la rêverie, la réflexion superficielle).

Il faut établir une distinction entre les approches subtiles ou souples qui suscitent une implication de surface et les tentatives visant à mobiliser les élèves en profondeur. Par exemple, la *ludification* – en introduisant des éléments de jeux dans les technologies d'apprentissage classiques par le biais de points, de défis à relever, d'insignes, de tableaux de classement et autres éléments (Gibson et al., 2015[117] ; Kapp, 2012[118]), voir l'Encadré 4.1 à titre d'exemple – peut légèrement renforcer l'implication à court terme, mais il est peu probable qu'elle permette de maintenir une profonde implication sur une longue période. Certaines expériences de ludification peuvent avoir un effet trompeur, quand l'élève a l'impression qu'on a mis du « chocolat pour masquer le brocoli ». Une autre approche subtile est la *conception émotionnelle* qui implique de modifier le matériel pédagogique numérique pour déclencher un léger affect positif (p. ex., en ajoutant des anthropomorphismes humains à des éléments graphiques non humains et/ou des couleurs agréables dans les médias numériques (Plass et al., 2014[119] ; Um et al., 2012[120]). Une récente méta-analyse (Brom, Stárková et D'Mello, 2018[121]) montre que la conception émotionnelle s'est révélée étonnamment efficace dans l'amélioration de l'apprentissage tout en renforçant également l'implication, tel que mesuré par la motivation intrinsèque, l'appréciation/le plaisir, et l'affect positif.

Si l'on veut favoriser une implication profonde et durable, il faut envisager une reconceptualisation approfondie de l'expérience d'apprentissage. Le cadre interactif-constructif-actif-passif (ICAP) (Chi et Wylie, 2014[123]) est un excellent point de départ à cet égard. Il présente quatre niveaux d'implication et d'apprentissage fondés sur le niveau d'interactivité qu'offre l'activité d'apprentissage. Les niveaux, par ordre décroissant d'implication et d'apprentissage attendus, sont Interactif > Constructif > Actif > et Passif (Graphique 4.7). Une activité passive consisterait à assister à un cours magistral ou à regarder une vidéo sans comportement manifeste, alors que la prise de note sans formuler de nouvelles idées ou sans organisation serait considérée comme active. Écrire un résumé ou un compte-rendu de cours en y formulant de nouvelles idées ou en réorganisant les idées déjà émises serait qualifié de constructif. Les activités interactives comprennent des formes d'interaction ou de dialogue qui se

rattachent à une activité constructive, par exemple, un tutorat entre pairs, où les élèves s'entraident à tour de rôle. Selon ICAP, l'intégration d'expériences plus constructives et interactives dans les technologies d'apprentissage serait un moyen de renforcer à la fois l'implication et l'apprentissage.

Encadré 4.1 Encourager le bon comportement et l'apprentissage social grâce à des jeux vidéo au Canada et aux États-Unis

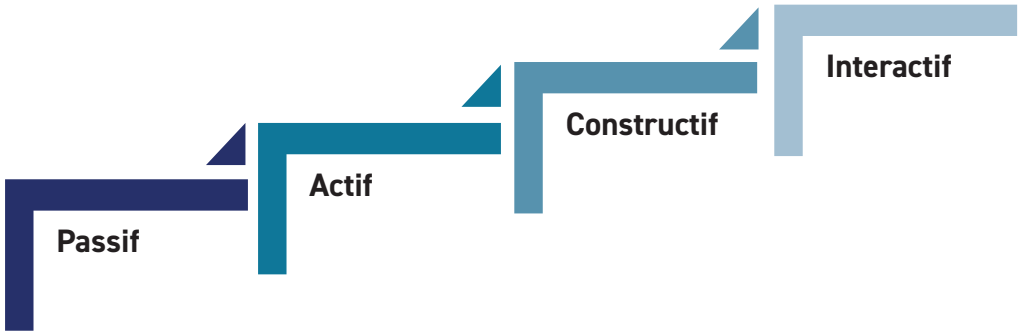
Les fans de la série de Harry Potter comprennent ce que signifie gagner des points pour bonne conduite. Les enseignants à l'école des sorciers de Hogwarts octroient ou retirent des points aux élèves en guise de récompense ou de punition en fonction de leur conduite. Les élèves peuvent obtenir des points pour leur maison en accomplissant de bonnes actions, en répondant correctement aux questions, et, bien sûr, en gagnant les matchs de Quidditch. Dans le cas contraire, les élèves risquent de perdre des points (et de décevoir leurs camarades de la même maison). À la fin de l'année scolaire, la maison qui a remporté le plus de points gagne la prestigieuse Coupe des quatre maisons.

La vraie vie ne propose pas les tours de magie astucieux des professeurs de Hogwarts, mais la compagnie Classcraft, basée à Québec et à New York s'est efforcée de traduire l'implication dans l'apprentissage par des méthodes semblables. S'inspirant de jeux vidéo comme World of Warcraft, cette plateforme sur le Cloud qui vise l'enseignement secondaire est décrite comme un « jeu de rôle pour la gestion de la classe » (Sanchez, Young et Jouneau-Sion, 2016[122]).

Cette plateforme a pour but de familiariser les élèves avec les bons comportements, comme de faire ses devoirs ou ne pas arriver en retard en classe. Le jeu n'a aucun lien avec une matière spécifique ; on peut y jouer dans un seul cours ou durant une année scolaire. Classcraft est avant tout une application web à utiliser en classe, même si les élèves peuvent télécharger l'application sur leur téléphone portable pour y jouer en dehors de la classe. Au contraire de la plupart des jeux vidéo, Classcraft ne propose pas un univers de jeux en 3D. Il offre plutôt une forme de réalité augmentée : en ajoutant des couches numériques au monde réel, le jeu propose de nouvelles interactions entre enseignants et élèves.

Les élèves jouent en équipes de 4 à 6 joueurs. Au début du jeu, ils doivent chacun choisir différents avatars (guérisseurs, mages, guerriers) avec leurs forces et leurs faiblesses. Leur but est de gagner des points d'expérience et d'empêcher leurs avatars de perdre des points de vie. En agissant en fonction des critères de bonne conduire, ils gagnent des points qu'ils peuvent, par exemple, employer pour renforcer leurs avatars ou pour aider leurs coéquipiers. La conduite inverse peut bien sûr les amener à perdre des points, ce qui peut avoir un impact sur toute l'équipe. Les enseignants agissent à titre de « maîtres du jeu » : ils distribuent ou enlèvent des points, et peuvent créer certains événements aléatoires dans le jeu ou certaines dynamiques dans la vie réelle (comme demander d'exécuter des tâches particulières) qui affecteront tous les élèves. Les mises à jour du jeu apparaissent en temps réel dans l'application de chaque joueur. L'interaction avec la vraie vie est au cœur de ce modèle : gagner ou perdre des points virtuels peut entraîner des actions de l'enseignant dans la vraie vie, notamment des félicitations, des récompenses, voire même des réprimandes. Comme le jeu connecte également les points de vie de chaque élève aux autres élèves de l'équipe, les élèves sont encouragés à travailler ensemble. L'utilisation de Classcraft – ainsi que d'autres programmes comparables pour la gestion de classe – peut avoir un impact positif sur l'implication de l'élève, la collaboration et même sur le climat de l'établissement (Edweek).

Graphique 4.7 Organisation des activités en fonction des objectifs d'implication et d'apprentissage (de la gauche en montant) selon le cadre ICAP



Source: D'Mello.

Les jeux éducatifs constituent un exemple de ces technologies d'apprentissage (Gee, 2003[41]). Bien pensés, ils peuvent renforcer la participation et l'apprentissage : grâce à eux le travail devient jeu, l'ennui s'amenuise, l'implication est décuplée ; ils présentent des défis qui sont atteignables avec de la réflexion, de la créativité et de l'effort, et procurent du plaisir et des surprises agréables (Lepper et Henderlong, 2000[124] ; Plass, Homer et Kinzer, 2015[125] ; Ritterfeld, Cody et Vorderer, 2009[126]). Leur conception peut s'avérer très difficile, car il s'agit de trouver un compromis entre des environnements de jeux qui sont attrayants mais où l'élève n'apprend pas grand-chose et des environnements qui encouragent l'apprentissage en profondeur mais qui ne réussissent pas à stimuler l'implication (Johnson et Mayer, 2010[127]). Des jeux éducatifs bien pensés concilient ces objectifs en intégrant des principes ancrés dans la théorie (résolution de problèmes, règles/contraintes, défis, contrôle, retour d'information permanent et stimulation sensorielle) (Shute et al., 2014[128]) qui favorisent intrinsèquement la motivation et donc l'implication (Fullerton, Swain et Hoffman, 2008[129] ; Malone et Lepper, 1987[130] ; Shute, Rieber et Van Eck, 2011[131]).

Bien pensés, ils intègrent également des expériences d'apprentissage significatives dans le jeu. Ainsi, le fait de jouer à des jeux éducatifs bien pensés est positivement associé à des compétences et résultats d'apprentissage divers comme des aptitudes spacio-visuelles et l'attention (Green et Bavelier, 2012[132] ; Green et Bavelier, 2007[133] ; Shute, Ventura et Ke, 2015[134]), de meilleures notes dans les établissements d'études supérieures (Skoric, Teo et Neo, 2009[135]) (Ventura, Shute et Kim, 2012[136]), la persévérance (Ventura, Shute et Zhao, 2013[137]), la créativité (Jackson et al., 2012[138]) et la participation civique (Ferguson et Garza, 2011[139]), ainsi qu'à des contenus et compétences académiques précieux, (p.ex., Coller et Scott, 2009[140] ; DeRouin-Jessen, 2008[141]); pour une synthèse, voir (Tobias et Fletcher, 2011[142] ; Wilson et al., 2009[143] ; Young et al., 2012[144]).

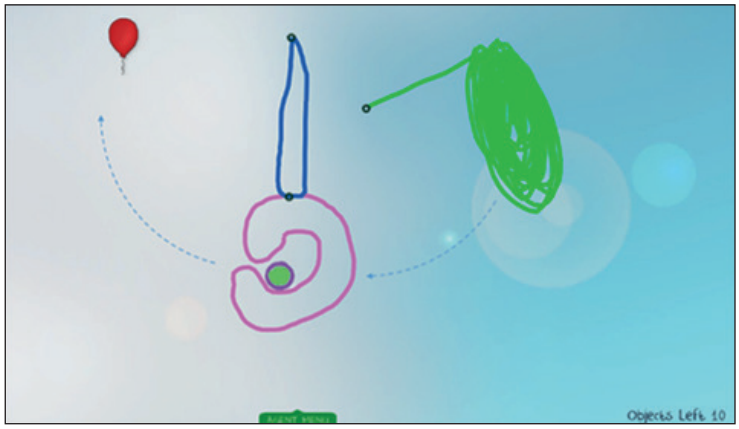
Deux exemples : Physics Playground et Crystal Island

À titre d'exemple, prenons le jeu Physics Playground (Shute, Ventura et Kim, 2013[103]), jeu éducatif hautement motivant pour apprendre les lois de Newton sur la force d'attraction et le mouvement, l'inertie, la dynamique et les actions réciproques (Graphique 4.8). Le jeu suit les règles de base de la physique par le biais d'une simulation formelle d'un « monde » physique virtuel et répond de manière dynamique aux interactions des joueurs avec le jeu. Premier objectif du jeu : les joueurs doivent guider une balle verte vers un ballon rouge, ce qui permet de « résoudre » le niveau, et en agissant ainsi, les joueurs peuvent créer des *agents* – des rampes, des pendules, des leviers et des tremplins – qui « prennent vie » sur l'écran. Le réalisme (obtenu par une simulation formelle détaillée du « monde » physique virtuel), les retours d'information continus, la résolution de problèmes interactive et des difficultés adaptives font partie intégrante du jeu. Ce dernier offre aussi aux joueurs la liberté d'essayer/d'échouer en expérimentant une variété de solutions. Physics Playground réussit à renforcer à la fois l'implication et l'apprentissage en intégrant des concepts de physique au déroulement du jeu. L'Encadré 4.2 montre que Physics Playground est aussi un bon terrain d'étude des relations entre les émotions des élèves et l'apprentissage dans différents contextes internationaux.

Il est possible d'améliorer l'apprentissage par le jeu en intensifiant l'immersion et le réalisme de l'expérience. Dans les salles de classe classiques, l'apprentissage par projet (APP) permet aux élèves ou à des équipes d'élèves de résoudre des problèmes réels, utiles et concrets sur une longue période (Blumenfeld et al., 1991[145]). Des équipes

d'élèves peuvent, par exemple, s'attaquer au problème de l'amélioration de la qualité de l'eau dans leur collectivité ; il leur faut pour cela une compréhension du système hydraulique, des polluants, de l'assainissement, des politiques, de la chimie, etc. Par conséquent, non seulement un bon APP permet de garder les élèves impliqués grâce au choix, au réalisme et à la collaboration qu'il suppose, mais il permet aux élèves d'acquérir des connaissances sur les contenus ainsi que des compétences pratiques (p. ex., travail d'enquête, collaboration, raisonnement scientifique : voir Schneider et al., 2020[146]). Malheureusement, la mise en place de ces expériences d'apprentissage nécessite des programmes d'enseignement beaucoup plus vastes, un accès à des ressources physiques et un soutien humain : ils sont difficilement réalisables par le biais des technologies numériques uniquement. Pour relever ce défi, les chercheurs se sont penchés sur l'utilisation de la réalité augmentée et virtuelle pour développer des expériences d'apprentissage numérique immersives à l'intention des élèves. On entend par immersion la perception subjective de l'expérience de la réalité – semblable à la suspension de l'incrédulité – et l'on suppose qu'elle renforce l'implication et l'apprentissage (Dede, 2009[147]). Des jeux comme River City (Dede, 2009[147]), Quest Atlantis (Barab et al., 2005[148]) et Crystal Island (Sabourin et Lester, 2014[72]), ce dernier étant examiné brièvement ci-dessous, en sont des illustrations.

Graphique 4.8 Exemple de problème et de solution de pendule dans Physics Playground



Source: Shute, Ventura et Kim (2013[103]).

Le jeu Crystal Island (Rowe et al., 2009[149] ; Spires et al., 2011[150]) est un jeu éducatif immersif qui s'appuie sur le principe de la narrativité. Il pose l'hypothèse que les apprenants tirent le plus grand profit des jeux éducatifs qui intègrent un thème narratif dans l'expérience de jeu. Ainsi, l'apprenant endosse le rôle d'un protagoniste, Alex, qui débarque sur une île. Alex découvre que les membres d'une équipe de recherche tombent malades et il est chargé de trouver la source d'une maladie infectieuse. Il se rend dans les différents endroits de l'île au cours de son enquête (réfectoire, labo, infirmerie, dortoir), interroge les autres habitants de l'île, tout en manipulant des objets. En formulant des questions et des hypothèses, en collectant et en analysant des données, les apprenants progressent peu à peu dans la recherche de la cause de la maladie. Crystal Island intègre donc l'apprentissage des connaissances en microbiologie, le développement de la pensée critique et les compétences d'apprentissage par la recherche dans une plateforme narrative attrayante.

Les interactions des apprenants avec le jeu démontrent que ce dernier est très motivant et qu'il peut améliorer les résultats d'apprentissage (Rowe et al., 2009[149] ; Rowe et al., 2010[151]). Ainsi, Sabourin et Lester (2014[72]) ont mené une étude auprès de 450 élèves de 8e année qui ont joué sur Crystal Island pendant 55 minutes. Les élèves ont déclaré avoir expérimenté l'un des sept états affectifs (anxiété, ennui, confusion, curiosité, excitation, concentration, et frustration) à des intervalles de cinq minutes durant le jeu. Les chercheurs ont constaté que les déclarations d'ennui (8 %) étaient nettement inférieures aux déclarations d'excitation (13 %) et de curiosité (19 %). La confusion (16 %) et la frustration (16 %) revenaient fréquemment, impliquant que le jeu motivait profondément les élèves, puisqu'on retrouve fréquemment ces états dans les activités d'apprentissage en profondeur (D'Mello et Graesser, 2012[152]). En outre, les élèves ont démontré des gains d'apprentissage significatifs de l'ordre de 30 %, entre les résultats du post-test et ceux avant le test.

Encadré 4.2 L'utilisation d'environnements numériques dans la recherche sur les émotions liées à l'apprentissage aux Philippines

Le jeu Physics Playground a servi aux Philippines pour étudier les relations positives ou négatives de différents états affectifs avec l'apprentissage, notamment la frustration, l'état affectif exprimant l'agacement et le mécontentement. À l'aide d'un système de codification des émotions des élèves pendant le jeu (système normalisé assisté par l'humain), et d'une tâche (énigme) sans rapport avec celle déjà décrite dans le texte principal, Banawan, Rodrigo et Andres (2015[153]) ont constaté que, faisant suite à l'état de profonde concentration (79 % des états affectifs observés), la frustration (8 %) était le deuxième état le plus ressenti parmi les 8 autres états étudiés, et le seul qui avait une relation statistique significative avec la réussite – une relation négative. La recherche montre que la frustration ne se comporte pas comme la confusion, qui peut être liée positivement à la réussite une fois celle-ci dissipée. Elle souligne également la nature contextuelle de l'implication, car les élèves philippins n'ont pas expérimenté les mêmes niveaux de plaisir que les élèves nord-américains en jouant sur Physics Playground. D'où l'importance de concevoir des environnements d'apprentissage numériques sensibles à des manières différentes de gérer l'échec dans l'apprentissage et de concevoir les bons appuis pédagogiques pour que les étudiants puissent composer avec leurs sentiments négatifs.

Grâce aux récents progrès dans les technologies évolutives de réalité augmentée et virtuelle, le fossé entre le monde virtuel et le monde physique s'est considérablement amenuisé (pour une synthèse, voir (Martín-Gutiérrez et al., 2017[154]), surtout en termes d'immersion et de réalisme (Psotka, 1995[155]). Malgré l'enthousiasme suscité par ces technologies et certains premiers résultats prometteurs (p. ex., Ibáñez et al., 2014[156]), il n'existe pas encore d'études rigoureuses évaluant leur efficacité en matière d'apprentissage, surtout lorsqu'il s'agit d'apprentissage conceptuel plutôt que d'apprentissage procédural ou par cœur.

Approches réactives

Considérons des scénarios hypothétiques d'approche réactive visant à renforcer l'attention : « imaginons que vous devez aider votre nièce à se préparer pour un examen en génétique. Les choses commencent plutôt bien, mais au bout d'un moment, vous vous rendez compte que son esprit est à des milliers de kilomètres de là. Bien que vous ayez prévu de modéliser ensemble les changements de fréquences génétiques dans les populations, vous remarquez que son attention a dérivé vers des sujets sans aucun rapport comme le déjeuner, le match de foot ou les prochaines vacances. Vous pouvez essayer de rediriger temporairement son attention en posant une question pointue. Toutefois, si son attention continue à baisser, vous vous rendez compte qu'il vous faudra adapter vos explications afin de la motiver davantage en modifiant le déroulement de la séance. Vous passez alors d'une discussion collaborative à une perspective centrée sur l'élève en lui demandant de développer une stratégie pour suivre les changements génétiques dans les populations. Cela fonctionne et elle semble s'attaquer à cette tâche avec un enthousiasme renouvelé et la séance se poursuit sans problème. Toutefois, un peu plus tard, vous remarquez qu'elle semble s'assoupir pendant que vous plongez dans les principes fondamentaux des fréquences alléliques. Vous lui proposez donc de changer de sujet, voire de prendre une pause, lui donnant ainsi la possibilité de refaire le plein d'énergie. »

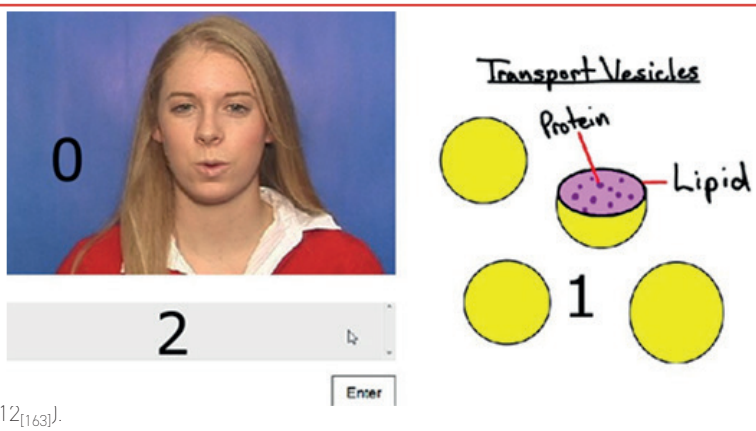
L'exemple ci-dessus donne une idée de ce qu'un agent réactif – un humain dans ce cas – peut accomplir. Les approches réactives visant à renforcer l'implication cherchent à *détecter* automatiquement l'implication des élèves et à *répondre* de manière dynamique quand celle-ci semble faiblir, ou à fournir des retours d'information motivants quand elle est élevée (D'Mello et Graesser, 2015[157]). Ces approches partent du principe que l'implication est un processus fluide et dynamique qui a des hauts et des bas au fur et à mesure que progresse la séance d'apprentissage. Malgré les meilleures intentions du concepteur pour proposer une expérience motivante, il y aura des différences individuelles dans le degré auquel la technologie d'apprentissage réussit à motiver un apprenant. De plus, même si un apprenant est totalement motivé au début de l'apprentissage, son implication finira par diminuer avec le temps, au fur et à mesure que la nouveauté s'estompera et que la fatigue augmentera.

Les approches réactives sont plus sophistiquées que les approches proactives. D'une part, la forme d'adaptabilité dynamique décrite ci-dessus demande de pouvoir constamment vérifier la qualité de l'implication, afin de détecter le moment où celle-ci diminue, et pour adapter le cours en vue de faire face aux périodes de désengagement. Les technologies pourraient s'intéresser à une composante particulière de l'implication, ou pourraient mesurer le construct de manière plus globale. Comme on l'a vu précédemment, on peut mesurer l'implication à l'aide d'approches fondées sur l'AAA. Une technologie d'apprentissage réactive doit alors modifier ses stratégies pédagogiques/motivationnelles en fonction de l'implication ressentie. Plusieurs pistes s'ouvrent à elle. Elle n'a rien à faire si l'apprenant est motivé et suit une trajectoire positive d'apprentissage. Elle pourrait essayer de rediriger l'attention si elle détecte que l'apprenant est dans la lune ou distrait (D'Mello, 2016[158]). Elle pourrait prodiguer des conseils et fournir des explications immédiates lorsqu'elle détecte de la confusion ou de la frustration (Forbes-Riley et Litman, 2011[86]). Le système pourrait offrir des alternatives, encourager les pauses ou ajuster les niveaux de difficulté lorsqu'il détecte qu'un élève s'ennuie. Il peut également envoyer des messages d'encouragement ayant pour but de motiver les élèves à persévérer dans l'apprentissage (D'Mello et Graesser, 2012[159] ; DeFalco et al., 2018[160]). Si la technologie se présente sous une forme ou une autre, par exemple celle d'un agent pédagogique animé, elle peut alors faire appel à divers signaux sociaux pour stimuler l'implication, par exemple en reflétant les expressions faciales et les gestes (Burleson et Picard, 2007[161]) ou prendre un air malheureux lorsqu'elle détecte que l'élève se détache (Baker et al., 2006[162]). Nous examinerons ci-dessous des exemples de technologies d'apprentissage réactives qui mettent en place certaines de ces stratégies.

Comment Gaze Tutor réagit à l'inattention des élèves

Avec GazeTutor, D'Mello et al. (2012[163]) s'intéressent à l'implication comportementale pendant l'apprentissage multimédia. L'interface se compose d'un agent conversationnel animé qui donne des explications sur des concepts de biologie à l'aide d'un discours synthétisé qui est synchronisé avec des images annotées (Graphique 4.9). Grâce à un traceur oculaire, le système repère les moments où l'élève n'est pas attentif aux parties importantes de l'interface (c.-à-d. le tuteur ou l'image). GazeTutor présume simplement que les apprenants ont décroché lorsque leur regard n'est pas dirigé sur le tuteur ou l'image pendant au moins cinq secondes consécutives. Lorsque cela se produit, il tente de remotiver les élèves par des réflexions « piquantes » afin de rediriger leur attention vers l'agent ou l'image (p. ex., « Coucou, je suis là ! » et « Réveille-toi, c'est ici que ça se passe ! »). Des résultats préliminaires montrent que ces réflexions qui réagissent au regard parviennent à rediriger l'attention et améliorent les résultats d'apprentissage.

Graphique 4.9 L'interface GazeTutor avec agent animé (0), tableau d'images (1) et fenêtre de saisie (2). Les zones d'écran vides en bas ne sont pas affichées



Source: D'Mello et al. (2012[163]).

Comment UNC-ITSPOKE répond aux doutes des élèves

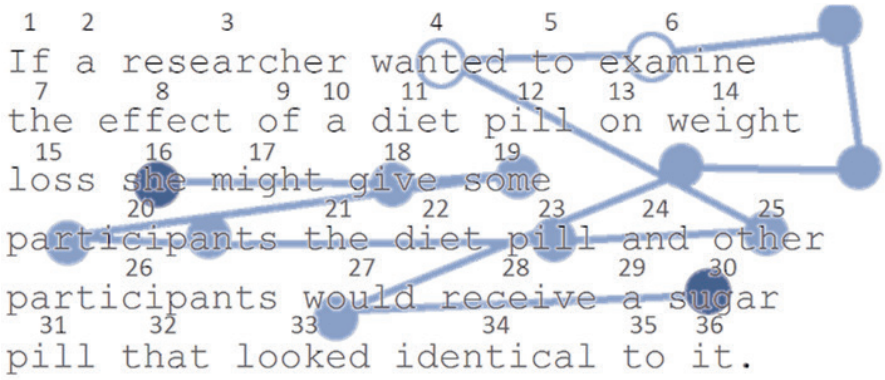
Forbes-Riley et Litman (2011[86]) ont examiné dans quelle mesure les réponses automatiques face au doute de l'apprenant pouvaient améliorer les résultats d'apprentissage lorsque les élèves travaillent dans un système de tutorat intelligent conversationnel en physique. Le doute est lié à la confusion, un état associé qui correspond aux deux éléments cognitifs et affectifs de l'implication (D'Mello et Graesser, 2014[164]). UNC-ITSPOKE repère automatiquement les certitudes/doutes des apprenants (par le biais de la parole et du langage à l'aide de l'approche

AAA) en plus de la justesse/inexactitude d'une réponse. Il met en place un sous-dialogue explicatif quand l'élève a raison mais qu'il n'est pas certain d'une réponse, car c'est le signe d'une défaillance métacognitive. Une étude de validation a montré que cette forme d'adaptivité donnait des résultats d'apprentissage légèrement supérieurs (mais pas significatifs) que dans des conditions de contrôle.

Comment le lecteur de l'attention visuelle répond à la rêverie

D'Mello et al. (2017[165]) et Mills et al. (2020[166]) discutent de cas de distraction (rêverie) au cours d'une lecture sur ordinateur (Graphique 4.10). Il s'agit d'une approche AAA qui s'appuie sur le regard pour repérer les moments de distraction (Faber, Bixler et D'Mello, 2018[167]), en suivant le regard page par page (une page étant un écran de texte), et qui réagit de manière dynamique par des évaluations de la compréhension et des possibilités de relecture. Une première stratégie d'intervention consiste à poser des questions de compréhension de routine sur la page où l'élève était dans la lune et de donner la possibilité de la relire si l'élève n'a pas répondu correctement à la question. Une étude de validation (D'Mello et al., 2017[165]) a montré que cette intervention a eu l'effet escompté, à savoir qu'elle a diminué les déficits de compréhension dus à la rêverie dans des cas particuliers. Toutefois, comme les questions interpolées étaient des questions qui faisaient appel au par cœur, elles encourageaient chez l'élève le repérage de mots-clés et un traitement de la lecture superficielle. Afin d'y remédier, Mills et al. (2020[166]) ont remplacé les questions à choix multiples par des questions plus poussées auxquels les apprenants devaient répondre en s'expliquant dans un langage naturel. Ces réponses étaient automatiquement notées et le système fournissait des commentaires et des possibilités de relire et de réviser les explications. Les résultats montrent que cette stratégie d'intervention a un effet positif par rapport aux contrôles équivalents sur les acquis (c.-à-d. les évaluations d'apprentissage effectuées une semaine plus tard).

Graphique 4.10 L'oculométrie pendant la lecture. Les cercles pleins montrent les fixations du regard (quand les yeux sont focalisés) et les lignes montrent les saccades (les mouvements oculaires rapides entre les fixations)



Source: D'Mello et al. (2017[165]).

Les technologies réactives en classe

La plupart des recherches sur les technologies réactives ont été menées dans les laboratoires, mais ces travaux se déplacent progressivement vers les salles de classe. Aslan et al. (2019[168]) ont mis au point la technologie de l'analyse de l'implication des élèves (SEAT – *Student Engagement Analytics Technology*) pour aider les enseignants à suivre l'implication comportementale et émotionnelle des élèves et à y répondre en temps réel. Cette mesure fournit à l'enseignant une évaluation de l'implication des élèves, qui peut alors déterminer s'il doit intervenir et comment le faire. Cette recherche a été menée en Turquie auprès d'élèves travaillant sur une plateforme autonome d'enseignement des mathématiques dans le cadre de leur cours. Un dispositif s'appuyant sur l'AAA a permis de suivre les caractéristiques faciales extraites des caméras vidéos, les modèles d'interaction avec la plateforme et les journaux d'URL du navigateur. En combinant les évaluations de l'implication comportementale (élève centré ou non sur la tâche) et émotionnelle (élève s'ennuie, est content, est confus), on a obtenu une note d'implication globale.

On a entré cette mesure dans l'interface SEAT qui a permis aux enseignants d'estimer l'implication des élèves en temps réel grâce à des codes de couleur (vert, jaune, rouge) (Graphique 4.11). Grâce à ces données, les enseignants ont pu intervenir auprès des élèves individuellement, leurs premières stratégies d'interventions consistant à donner des avertissements verbaux, à fournir du renforcement positif, du soutien pédagogique (p. ex., expliquer la question, fournir un conseil) et un suivi attentif (suivre l'écran de l'élève pour vérifier qu'il est centré sur la tâche).

Les chercheurs ont testé SEAT au cours d'une étude qui a duré 16 semaines en s'appuyant sur des méthodes qualitatives et quantitatives. Les entretiens ont révélé que l'expérience sur cette plateforme s'est avérée positive tant pour les enseignants que pour les élèves. Les enseignants se sont montrés très proactifs avec cette interface et ont déclaré qu'elle leur facilitait le suivi des besoins des élèves individuellement dans une grande classe. Les élèves ont également déclaré bénéficier de l'attention individuelle dont ils avaient besoin et se sentaient beaucoup plus impliqués dans la séance d'apprentissage. En conclusion, les élèves d'une classe équipée d'une technologie SEAT ont enregistré des gains d'apprentissage plus élevés (mais non significatifs) par rapport à une classe parallèle d'élèves non équipée de cette technologie. Toutefois, il faut considérer ces résultats avec prudence, car l'étude s'est fondée sur une conception quasi-expérimentale et elle n'a porté que sur 37 élèves de deux classes confondues.

Graphique 4.11 L'interface SEAT : vue d'ensemble de la classe (à gauche) et vue sur un élève particulier (à droite)

Source: Reproduit de Asland et al. (2019[168]).

Conclusions et orientations futures

Les recherches sur l'implication pendant l'apprentissage se sont multipliées ces dernières années. L'étude de l'implication dans l'éducation fait des progrès, mais il en est de même en ce qui concerne les technologies et leur conception qui en font un élément central de leur configuration. L'idée que l'implication est un résultat digne de considération en tant que tel est largement répandue dans les milieux de la recherche scientifique et de la conception technologique. Le risque est, toutefois, que chaque communauté travaille indépendamment de l'autre, et par conséquent passe à côté des avantages évidents que procure la collaboration.

À des fins d'illustration, les deux dernières décennies ont vu fleurir des recherches théoriques et empiriques visant à définir l'implication, identifiant ses causes et ses conséquences, et échafaudant des interventions afin de la renforcer (Christenson, Reschly et Wylie, 2012[18]). Malheureusement, la science de la mesure de l'implication n'a pas suivi ; la plupart des chercheurs s'appuient exclusivement sur les questionnaires comme seule mesure de l'implication (Fredricks et McColskey, 2012[42]), parce que les auto-évaluations sont en partie plus commodes et bien maîtrisées, et peut-être parce que l'accès à des technologies avancées coûte plus cher et peut faire peur. En même temps, dans de nombreux pays, l'ordinateur est devenu un outil indispensable dans l'apprentissage quotidien (Vincent-Lancrin et al., 2019[169]). Au vu du débit croissant de l'information disponible dans des environnements d'apprentissage numérique il n'est peut-être pas judicieux de se reposer sur des méthodes du

XXe siècle pour mesurer l'implication dans des environnements d'apprentissage numérique du XXIe siècle. La recherche scientifique sur l'implication gagnerait à prendre en compte les expériences d'apprentissage numérique et à intégrer les méthodes pertinentes dans la conception des études.

L'arrivée en masse des technologies dans les classes et l'essor des technologies d'apprentissage en ligne génèrent des volumes considérables de données, qui en principe, devraient conduire à des transformations innovantes dans la mesure et au renforcement de l'implication. Ce n'est malheureusement pas encore le cas. Malgré leur volume considérable, bon nombre de données issues de ces technologies sont superficielles et débouchent sur une mesure de l'implication centrée sur des modèles de comportements élémentaires, comme le nombre de connexions, de lectures de vidéos, etc. En outre, malgré de nombreux avantages, le développement de l'apprentissage en ligne a plusieurs effets secondaires, le plus troublant étant le retour à un mode de transmission de l'enseignement aux stratégies d'apprentissage passif inefficaces et l'absence de véritable collaboration, celle-ci figurant pourtant parmi les moyens d'apprentissage les plus motivants et les plus productifs (Dillenbourg, 1999[170] ; Stahl, Koschmann et Suthers, 2006[171]). Les technologies éducatives auraient tout intérêt à intégrer dans leur conception des principes issus de la recherche scientifique sur l'implication.

Quel horizon pour les 10 ou 15 années à venir ? D'un point de vue pessimiste, la recherche poursuivra son chemin, les travaux sur l'implication suivant une direction et ceux sur les technologies éducatives en suivant une autre, les deux ne se rejoignant que rarement. Dans une perspective plus optimiste, les communautés de recherche travailleront de concert, produisant des technologies permettant d'impliquer davantage les élèves et générant encore plus de recherches sur l'implication des élèves avec les technologies d'apprentissage numériques. Dans cette vision, les jeux d'apprentissage – l'une des meilleures façons de favoriser une implication profonde (comme on l'a vu ci-dessus) – intègrent des stratégies telles que le soutien pédagogique qui favorisent l'apprentissage conceptuel en profondeur tout en maintenant l'implication et la motivation des apprenants. Les approches réactives, qui réagissent activement en fonction de l'implication détectée, seront plus faciles à déployer à mesure que les capteurs deviendront omniprésents, portables et peu coûteux, que des garanties rigoureuses seront mises en place pour protéger la vie privée, que des efforts seront faits pour garantir que les modèles d'IA intégrés dans les technologies sont impartiaux et équitables et que les collaborations interdisciplinaires entre les chercheurs en éducation et en informatique se multiplieront.

Il faut souligner que ces technologies doivent être développées en tenant compte de l'éthique, de l'équité et de la justice comme des considérations centrales dès la conception, et non comme des réflexions après-coup, et que les concepteurs doivent sérieusement répondre à la question de savoir ce que les technologies intelligentes *devraient faire* plutôt que ce qu'elles *peuvent faire.* Il faut soigneusement réfléchir à la nature des données collectées et à la durée de leur stockage, le cas échéant, et les utilisateurs finaux (élèves, parents, enseignants) devraient avoir le dernier mot quant à la question de savoir s'il faut évaluer l'implication et à quel moment. Dans le futur, les idées et les recherches décrites dans ce chapitre sortiront du huis clos des laboratoires de recherche et délaisseront les expériences à petite échelle pour entrer dans le monde réel afin de devenir un élément central de l'apprentissage numérique au profit de millions d'élèves dans le monde. Dans ce contexte, la mesure de l'implication à des fins formatives et non évaluatives (tout en protégeant la vie privée des élèves) combinée à des stratégies intelligentes pour renforcer l'implication constitueront des éléments essentiels des technologies d'apprentissage numériques. L'avenir nous réserve un apprentissage numérique efficient, efficace et motivant.

Références

Algebra Nation (s.d.), *Algebra Nation*, https://loveforquotes.com/t/algebra-nation (consulté le 29 avril 2021). [104]

Anderson, J. (1982), « Acquisition of cognitive skill », *Psychological Review*, Vol. 89/4, pp. 369-406. [105]

Arnold, K. et M. Pistilli (2012), *Course signals at Purdue: Using learning analytics to increase student success.* [63]

Aslan, S., N. Alyuz, C. Tanriover, S. Mete, E. Okur, S. D'Mello et A. Esme (2019), « Investigating the Impact of a Real-time, Multimodal Student Engagement Analytics Technology in Authentic Classrooms », dans *Proceedings of the ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2019).*, ACM, New York. [168]

Atkins-Burnett, S., C. Fernandez, L. Akers, J. Jacobson et C. Smither-Wulsin (2012), *Landscape analysis of non-cognitive measures.* [66]

Aung, A., A. Ramakrishnan et J. Whitehill (2018), *Who Are They Looking At? Automatic Eye Gaze Following for Classroom Observation Video Analysis,* Paper presented at the International Conference on Educational Data Mining (EDM). [59]

Baker, R., A.T. Corbett, K.R. Koedinger, S. Evenson, I. Roll, A.Z. Wagner, M. Naim, J. Raspat, D.J. Baker et J.E. Beck (2006), Adapting to when students game an intelligent tutoring system, Paper presented at the Intelligent Tutoring Systems Conference. [162]

Baker, R., S. D'Mello, M.M. Rodrigo et A. Graesser (2010), « Better to be frustrated than bored: The incidence, persistence, and impact of learners' cognitive–affective states during interactions with three different computer-based learning environments », *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 68/4, pp. 223-241. [7]

Baker, R. et J. Ocumpaugh (2015), « Interaction-based affect detection in educational software », dans Calvo, R. et al. (dir. pub.), *The Oxford Handbook of Affective Computing*, Oxford University Press, New York. [70]

Banawan, M., M. Rodrigo et J. Andres (2015), A*n investigation of frustration among students using physics playground. In Doctoral Student Consortium (DSC),* Proceedings of the 23rd International Conference on Computers in Education. [153]

Barab, S., M.K. Thomas, T. Dodge, R. Carteaux et H. Tuzun (2005), « Making learning fun: Quest Atlantis, a game without guns », *Educational technology research and development*, Vol. 53/1, pp. 86-107. [148]

Bidwell, J. et H. Fuchs (2011), « Classroom analytics: Measuring student engagement with automated gaze tracking », *Behav Res Methods*, Vol. 49, pp. 113. [60]

Bixler, R. et S. D'Mello (2016), « Automatic gaze-based user-independent detection of mind wandering during computerized reading », *User Modeling & User-Adapted Interaction*, Vol. 26, pp. 33-68. [90]

Bixler, R. et S. D'Mello (2013), « Detecting engagement and boredom during writing with keystroke analysis, task appraisals, and stable traits », dans *Proceedings of the 2013 International Conference on Intelligent User Interfaces (IUI 2013),* ACM, New York, NY. [81]

Blanchard, N., R. Bixler, T. Joyce et S. D'Mello (2014), "Automated physiological-based detection of mind wandering during learning", in Trausan-Matu, S. et al. (dir. pub.), *Proceedings of the 12th International Conference on Intelligent Tutoring Systems (ITS 2014),* Springer International Publishing, Switzerland. [95]

Blumenfeld, P., E. Soloway, R.W. Marx, J.S. Krajcik, M. Guzdial et A.M. Palincsar (1991), « Motivating project-based learning: Sustaining the doing, supporting the learning », *Educational Psychologist,* Vol. 26/3-4, pp. 369-398. [145]

Bosch, N., H. Chen, S. D'Mello, R. Baker et V. Shute (2015), « Accuracy vs. Availability Heuristic in Multimodal Affect Detection in the Wild », dans *Proceedings of the 17th ACM International Conference on Multimodal Interaction (ICMI 2015),* ACM, New York, NY. [98]

Bosch, N., S. D'Mello, J. Ocumpaugh, R. Baker et V. Shute (2016), « Using video to automatically detect learner affect in computer-enabled classrooms », *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems,* Vol. 6/2, pp. 17.1-17.31. [85]

Bosch, N. et S. D'Mello (2019), « Automatic Detection of Mind Wandering from Video in the Lab and in the Classroom », *IEEE Transactions on Affective Computing*, http://dx.doi.org/10.1109/TAFFC.2019.2908837. [75]

Bransford, J., A. Brown et R. Cocking (2000), *How people learn*, National Academy Press, Washington, DC. [23]

Brom, C., T. Stárková et S. D'Mello (2018), « How effective is emotional design? A meta-analysis on facial anthropomorphisms and pleasant colors during multimedia learning », *Educational Research Review,* Vol. 25, pp. 100-119. [121]

Brown, J. et K. VanLehn (1980), « Repair theory: A generative theory of bugs in procedural skills », *Cognitive Science,* Vol. 4/379-426, http://dx.doi.org/10.1016/S0364-0213(80)80010-3. [106]

Burleson, W. et R. Picard (2007), « Evidence for gender specific approaches to the development of emotionally intelligent learning companions », *IEEE Intelligent Systems*, Vol. 22/4, pp. 62-69. [161]

Charsky, D. (2010), « From edutainment to serious games: A change in the use of game characteristics », *Games and culture*, Vol. 5/2, pp. 177-198. [20]

Chi, M. et R. Wylie (2014), « The ICAP framework: Linking cognitive engagement to active learning outcomes », *Educational Psychologist*, Vol. 49/4, pp. 219-243. [123]

Christenson, S., A. Reschly et C. Wylie (2012), *Handbook of research on student engagement*, Springer, New York. [18]

Coller, B. et M. Scott (2009), « Effectiveness of using a video game to teach a course in mechanical engineering », *Computers & Education*, Vol. 53/3, pp. 900-912. [140]

Conati, C., V. Aleven et A. Mitrovic (2013), « Eye-Tracking for Student Modelling in Intelligent Tutoring Systems », dans Sottilare, R. et al. (dir. pub.), *Design Recommendations for Intelligent Tutoring Systems - Volume 1: Learner Modeling*, Army Research Laboratory, Orlando, FL. [91]

Craig, S., S. D'Mello, A. Witherspoon et A. Graesser (2008), « Emote aloud during learning with AutoTutor: Applying the Facial Action Coding System to cognitive–affective states during learning », *Cognition & Emotion*, Vol. 22/5, pp. 777-788, http://dx.doi.org/10.1080/02699930701516759. [28]

Craig, S., A. Graesser, J. Sullins et B. Gholson (2004), « Affect and learning: An exploratory look into the role of affect in learning », *Journal of Educational Media*, Vol. 29, pp. 241-250, http://dx.doi.org/10.1080/1358165042000283101. [110]

Csikszentmihalyi, M. (1990), *Flow: The psychology of optimal experience*, Harper and Row, New York. [40]

Csikszentmihalyi, M. (1975), *Beyond boredom and anxiety*, Jossey-Bass, San Francisco, CA. [8]

Csikszentmihalyi, M. et R. Larson (1987), « Validity and reliability of the experience-sampling method », *The Journal of nervous and mental disease*, Vol. 175/9, pp. 526-536. [49]

Danckert, J. et C. Merrifield (2018), « Boredom, sustained attention and the default mode network », *Experimental Brain Research*, Vol. 236/9, pp. 2507-2518. [1]

Daniels, L., R.H. Stupnisky, R. Pekrun, T.L. Haynes, R.P. Perry et N.E. Newall (2009), « A longitudinal analysis of achievement goals: From affective antecedents to emotional effects and achievement outcomes », *Journal of Educational Psychology*, Vol. 101/4, pp. 948-963, http://dx.doi.org/10.1037/a0016096. [9]

DeFalco, J., R. Baker et S. D'Mello (2014), « Addressing behavioral disengagement in online learning », dans Sottilare, R. et al. (dir. pub.), *Design Recommendations for Adaptive Intelligent Tutoring Systems: Adaptive Instructional Strategies (Volume 2)*, Army Research Laboratory, Orlando, FL. [80]

Dede, C. (2009), « Immersive interfaces for engagement and learning », *Science*, Vol. 323/5910, pp. 66-69. [147]

DeFalco, J., J.P. Rowe, L. Paquette, V. Georgoulas-Sherry, K. Brawner, B. Mott, R. Baker et J.C. Lester (2018), « Detecting and addressing frustration in a serious game for military training », *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, Vol. 28/2, pp. 152-193. [160]

del Soldato, T. et B. du Boulay (1995), « Implementation of motivational tactics in tutoring systems », *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, Vol. 6, pp. 337-378. [116]

DeRouin-Jessen, R. (2008), *Game on: The Impact of Game Features in Computer-Based Training.* [141]

Dillenbourg, P. (1999), « What do you mean by collaborative learning », dans Dillenbourg, P. (dir. pub.), *Collaborative-learning: Cognitive and computational approaches.* [170]

Dindar, M., J. Malmberg, S. Järvelä, E. Haataja et P.A. Kirschner (2017), « Matching self-reports with electrodermal activity data: Investigating temporal changes in self-regulated learning », *Education and Information Technologies*, pp. 1-18. [96]

D'Mello, S. (2019), « What do we think about when we learn? », dans Millis, K. et al. (dir. pub.), *Deep Comprehension: Multi-Disciplinary Approaches to Understanding, Enhancing, and Measuring Comprehension*, Routledge, New York, NY. [113]

D'Mello, S. (2016), « Giving Eyesight to the Blind: Towards attention-aware AIED », *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, Vol. 26/2, pp. 645-659. [158]

D'Mello, S. (2013), « A selective meta-analysis on the relative incidence of discrete affective states during learning with technology », *Journal of Educational Psychology*, Vol. 105/4, pp. 1082-1099. [111]

D'Mello, S., E. Dieterle et A. Duckworth (2017), « Advanced, Analytic, Automated (AAA) Measurement of Engagement during Learning », *Educational Psychologist*, Vol. 52/2, pp. 104-123. [68]

D'Mello, S. et A. Graesser (2015), « Feeling, thinking, and computing with affect-aware learning technologies », dans Calvo, R. et al. (dir. pub.), *The Oxford Handbook of Affective Computing, Oxford University Press*, New York. [157]

D'Mello, S. et A. Graesser (2014), « Confusion », dans Pekrun, R. and L. Linnenbrink-Garcia (dir. pub.), *International handbook of emotions in education, Routledge*, New York, NY. [164]

D'Mello, S. et A. Graesser (2012), « AutoTutor and Affective AutoTutor: Learning by talking with cognitively and emotionally intelligent computers that talk back », *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems,* Vol. 2/4, pp. 23:2-23:39. [159]

D'Mello, S. et A. Graesser (2012), « Dynamics of affective states during complex learning », *Learning and Instruction,* Vol. 22/2, pp. 145-157, http://dx.doi.org/10.1016/j.learninstruc.2011.10.001. [152]

D'Mello, S. et A. Graesser (2010), « Multimodal semi-automated affect detection from conversational cues, gross body language, and facial features », *User Modeling and User-adapted Interaction*, Vol. 20/2, pp. 147-187. [99]

D'Mello, S. et A. Graesser (2009), « Automatic detection of learners' affect from gross body language », *Applied Artificial Intelligence*, Vol. 23/2, pp. 123 - 150, http://www.informaworld.com/10.1080/08839510802631745. [93]

D'Mello, S., K. Kopp, R.E. Bixler et N. Bosch (2016), « Attending to attention: Detecting and combating mind wandering during computerized reading », dans *Extended Abstracts of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2016)*, ACM, New York. [79]

D'Mello, S., C. Mills, R. Bixler et N. Bosch (2017), « Zone out no more: Mitigating mind wandering during computerized reading », dans Hu, X. et al. (dir. pub.), *Proceedings of the 10th International Conference on Educational Data Mining,* International Educational Data Mining Society. [165]

D'Mello, S., A. Olney, C. Williams et P. Hays (2012), « Gaze tutor: A gaze-reactive intelligent tutoring system », *International Journal of Human-Computer Studies,* Vol. 70/5, pp. 377-398. [163]

D'Mello, S., R. Taylor, K. Davidson et A. Graesser (2008), « Self versus teacher judgments of learner emotions during a tutoring session with AutoTutor », dans Woolf, B. et al. (dir. pub.), *Proceedings of the 9th international conference on Intelligent Tutoring Systems*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-69132-7_6. [58]

Duckworth, A., J. Taxer, L. Eskreis-Winkler, B. Galla et J. Gross (2019), « Self-control and academic achievement », *Annual Review of Psychology,* Vol. 70, pp. 373-399. [31]

Duckworth, A. et D. Yeager (2015), « Measurement matters: Assessing personal qualities other than cognitive ability for educational purposes », *Educational Researcher,* Vol. 44/4, pp. 237-251. [45]

Eastwood, J., A. Frischen, M. Frenske et D. Smilek (2012), « The unengaged mind: Defining boredom in terms of attention », *Perspectives on Psychological Science,* Vol. 7/5, pp. 482-495. [2]

Eccles, J. et M. Wang (2012), « Part I commentary: So what is student engagement anyway? », dans Christenson, S., A. Reschly and C. Wylie (dir. pub.), *Handbook of research on student engagement,* Springer, New York. [32]

Ericsson, K., R. Krampe et C. Tesch-Römer (1993), « The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance », *Psychological Review,* Vol. 100/3, pp. 363. [30]

Faber, M., R. Bixler et S. D'Mello (2018), « An automated behavioral measure of mind wandering during computerized reading », *Behavior Research Methods,* Vol. 50/1, pp. 134-150. [167]

Farrell, E., G. Peguero, R. Lindsey et R. White (1988), « Giving voice to high-school students: Pressure and boredom, ya know what I'm sayin'? », *American Educational Research Journal*, Vol. 25/4, pp. 489-502. [10]

Ferguson, C. et A. Garza (2011), « Call of (civic) duty: Action games and civic behavior in a large sample of youth », *Computers in Human behavior*, Vol. 27/2, pp. 770-775. [139]

Finn, J. et K. Voelkl (1993), « School characteristics related to student engagement », *The Journal of Negro Education*, Vol. 62/3, pp. 249-268. [11]

Forbes-Riley, K. et D. Litman (2011), « Benefits and challenges of real-time uncertainty detection and adaptation in a spoken dialogue computer tutor », *Speech Communication*, Vol. 53/9-10, pp. 1115-1136, http://dx.doi.org/10.1016/j.specom.2011.02.006. [86]

Fredricks, J., P. Blumenfeld et A. Paris (2004), « School engagement: Potential of the concept, state of the evidence », *Review of Educational Research*, Vol. 74/1, pp. 59-109. [34]

Fredricks, J. et W. McColskey (2012), « The measurement of student engagement: A comparative analysis of various methods and student self-report instruments », dans Christenson, S., A. Reschly and C. Wylie (dir. pub.), *Handbook of research on student engagement*, Springer, New York. [42]

Fullerton, T., C. Swain et S. Hoffman (2008), *Game design workshop: a playcentric approach to creating innovative games*, Morgan Kaufmann, Burlington, MA. [129]

Gardner, J., C. Brooks et R. Baker (2019), *Evaluating the fairness of predictive student models through slicing analysis.*, Paper presented at the Proceedings of the 9th International Conference on Learning Analytics & Knowledge. [76]

Gee, J. (2003), *What video games have to teach us about learning and literacy,* Palgrave Macmillan, New York. [41]

Gibson, D., N. Ostashewski, K. Flintoff, S. Grant et E. Knight (2015), « Digital badges in education », *Education and Information Technologies,* Vol. 20/2, pp. 403-410. [117]

Gobert, J., R. Baker et M. Wixon (2015), « Operationalizing and detecting disengagement within online science microworlds », *Educational Psychologist,* Vol. 50/1, pp. 43-57. [82]

Grafsgaard, J., J. Wiggins, K.E. Boyer, E. Wiebe et J.C. Lester (2014), « Predicting learning and affect from multimodal data streams in task-oriented tutorial dialogue », dans Stamper, J. et al. (dir. pub.), *Proceedings of the 7th International Conference on Educational Data Mining,* International Educational Data Mining Society. [100]

Green, C. et D. Bavelier (2012), « Learning, attentional control, and action video games », *Current Biology*, Vol. 22/6, pp. R197-R206. [132]

Green, C. et D. Bavelier (2007), « Action-video-game experience alters the spatial resolution of vision », *Psychological Science,* Vol. 18/1, pp. 88-94. [133]

Greene, B. (2015), « Measuring cognitive engagement with self-report scales: Reflections from over 20 years of research », *Educational Psychologist,* Vol. 50/1, pp. 1-17. [43]

Griffiths, A., E. Lilles, M.J. Furlong et J. Sidhwa (2012), « The relations of adolescent student engagement with troubling and high-risk behaviors », dans Christenson, S., A. Reschly and C. Wylie (dir. pub.), *Handbook of research on student engagement,* Springer, New York. [12]

Hawkins, W., N. Heffernan et R. Baker (2013), « Which is more responsible for boredom in intelligent tutoring systems: students (trait) or problems (state)? », dans Nijholt, A., S. D'Mello and M. Pantic (dir. pub.), *Proceedings of the 5th International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII 2013),* IEEE, Washington, DC. [112]

Heine, S., D. Lehman, K. Peng et J. Greenholtz (2002), « What's wrong with cross-cultural comparisons of subjective Likert scales?: The reference-group effect », *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol. 82/6, pp. 903-918. [47]

Henrie, C., L. Halverson et C. Graham (2015), « Measuring student engagement in technology-mediated learning: A review », *Computers & Education,* Vol. 90, pp. 36-53. [44]

Hidi, S. et K. Renninger (2006), « The four-phase model of interest development », *Educational Psychologist,* Vol. 41/2, pp. 111-127, https://doi.org/10.1207/s15326985ep4102_4. [38]

Hunter, A. et J. Eastwood (2018), « Does state boredom cause failures of attention? Examining the relations between trait boredom, state boredom, and sustained attention », *Experimental Brain Research,* Vol. 236/9, pp. 2483-2492. [3]

Hutt, S., J. Grafsgaard et S. D'Mello (2019), « Time to Scale: Generalizable Affect Detection for Tens of Thousands of Students across An Entire Schoolyear », dans *Proceedings of the ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2019)*, ACM, New York. [83]

Hutt, S., K. Krasich, C. Mills, N. Bosch, S. White, J. Brockmole et S. D'Mello (2019), « Automated Gaze-Based Mind Wandering Detection during Computerized Learning in Classrooms », User Modeling & User-Adapted Interaction. [92]

Ibáñez, M., A. Di Serio, D. Villáran et C Delgado Kloos (2014), « Experimenting with electromagnetism using augmented reality: Impact on flow student experience and educational effectiveness », *Computers & Education,* Vol. 71, pp. 1-13. [156]

Jackson, L., E. Witt, A. Games, H. Fitzgerald, A. von Eye et Y. Zhao (2012), « Information technology use and creativity: Findings from the Children and Technology Project », *Computers in Human behavior*, Vol. 28/2, pp. 370-376. [138]

Jensen, E., S. Hutt et S. D'Mello (2019), *Generalizability of Sensor-Free Affect Detection Models in a Longitudinal Dataset of Tens of Thousands of Students,* Proceedings of the 2019 Educational Data Mining Conference (EDM 2019). International Educational Data Mining Society [77]

Johnson, C. et R. Mayer (2010), « Applying the self-explanation principle to multimedia learning in a computer-based game-like environment », *Computers in Human behavior*, Vol. 26/6, pp. 1246-1252. [127]

Kahneman, D., A. Krueger, D. Schkade, N. Schwartz et A. Stone (2004), « A survey method for characterizing daily life experience: The day reconstruction method », *Science*, Vol. 306/5702, pp. 1776-1780. [50]

Kapoor, A. et R. Picard (2005), « Multimodal affect recognition in learning environments », dans *Proceedings of the 13th annual ACM international conference on Multimedia*, ACM, New York, http://doi.acm.org/10.1145/1101149.1101300. [101]

Kapp, K. (2012), *The gamification of learning and instruction,* Wiley San Francisco. [118]

Karpicke, J. et J. Blunt (2011), « Retrieval practice produces more learning than elaborative studying with concept mapping », *Science*, Vol. 331/6018, pp. 772-775. [24]

Klein, R. et T. Celik (2017), *The Wits Intelligent Teaching System: Detecting student engagement during lectures using convolutional neural networks*, IEEE. [61]

Krosnick, J. (1999), « Survey research », *Annual Review of Psychology*, Vol. 50/1, pp. 537-567. [46]

Lehman, B., M. Matthews, S. D'Mello et N. Person (2008), « What Are You Feeling? Investigating Student Affective States During Expert Human Tutoring Sessions », dans *Intelligent Tutoring Systems, Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-69132-7_10. [57]

Lehr, C., M. Sinclair et S. Christenson (2004), « Addressing student engagement and truancy prevention during the elementary school years: A replication study of the check & connect model », *Journal of education for students placed at risk*, Vol. 9/3, pp. 279-301. [64]

Lepper, M. et J. Henderlong (2000), « Turning "play" into "work" and "work" into "play": 25 years of research on intrinsic versus extrinsic motivation », dans Sansone, C. and J. Harackiewicz (dir. pub.), *Intrinsic and extrinsic motivation: The search for optimal motivation and performance*, Academic Press, San Diego, CA. [124]

Malone, T. et M. Lepper (1987), « Making learning fun: A taxonomy of intrinsic motivations for learning », dans Snow, R. and M. Farr (dir. pub.), *Aptitude, learning, and instruction III: Cognitive and affective process analyses*, Erlbaum, Hilsdale, NJ. [130]

Mann, S. et A. Robinson (2009), « Boredom in the lecture theatre: an investigation into the contributors, moderators and outcomes of boredom amongst university students », *British Educational Research Journal*, Vol. 35/2, pp. 243-258, https://doi.org/10.1080/01411920802042911. [13]

Martín-Gutiérrez, J. et al. (2017), « Virtual technologies trends in education », *EURASIA Journal of Mathematics Science and Technology Education*, Vol. 13/2, pp. 469-486. [154]

Martin, J. (2010), *Lower Merion district's laptop saga ends with $610,000 settlement,* http://articles.philly.com/2010-10-12/news/24981536_1_laptop-students-district-several-million-dollars. [74]

Ma, W., O. Olusola, J. Nesbit et Q. Liu (2014), « Intelligent tutoring systems and learning outcomes: A meta-analysis », *Journal of Educational Psychology*, Vol. 106/4, pp. 901-918. [108]

McNamara, D., T. O'Reilly, R. Best et Y. Ozuru (2006), « Improving adolescent students' reading comprehension with iSTART », *Journal of Educational Computing Research*, Vol. 34/147-171. [27]

Mehl, M., J.W. Pennebaker, D.M. Crow, J. Dabbs et J.H. Price (2001), « The Electronically Activated Recorder (EAR): A device for sampling naturalistic daily activities and conversations », *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, Vol. 33/4, pp. 517-523. [56]

Miller, W., R. Baker, M. Labrum, K. Petsche et A.Z. Wagner (2014), *Boredom Across Activities, and Across the Year, within Reasoning Mind,* Paper presented at the Workshop on Data Mining for Educational Assessment and Feedback (ASSESS 2014), New York, NY. [78]

Mills, C., I. Fridman, W.V. Soussou, D. Waghray, A.M. Olney et S. D'Mello (2017), « Put Your Thinking Cap On: Detecting Cognitive Load using EEG during Learning », dans Molenaar, I., O. X. and S. Dawson (dir. pub.), *Proceedings of the 7th International Learning Analytics and Knowledge Conference (LAK'17),* ACM, New York, NY. [97]

Mills, C., J. Gregg, R. Bixler et S. D'Mello (2020), « Eye-Mind Reader: An Intelligent Reading Interface that Promotes Long-term Comprehension by Detecting and Responding to Mind Wandering », *Human-Computer Interaction*, https://doi.org/10.1080/07370024.2020.1716762. [166]

Monkaresi, H., N. Bosch, R.A. Calvo et S. D'Mello (2017), « Automated detection of engagement using video-based estimation of facial expressions and heart rate », *IEEE Transactions on Affective Computing*, Vol. 8/1, pp. 15-28. [87]

Mota, S. et R. Picard (2003), *Automated posture analysis for detecting learner's interest level.* [94]

Nystrand, M. et A. Gamoran (1991), « Instructional discourse, student engagement, and literature achievement », *Research in the Teaching of English*, Vol. 25/3, pp. 261-290. [52]

Ocumpaugh, J., R. Baker et M. Rodrigo (2015), *Baker Rodrigo Ocumpaugh Monitoring Protocol (BROMP) 2.0 Technical and Training Manual.* [73]

Olney, A., S. D'Mello, N. Person, W. Cade, P. Hays, C. Williams, B. Lehman et A. Graesser (2012), « Guru: A computer tutor that models expert human tutors », dans Cerri, S. et al. (dir. pub.), *Proceedings of the 11th International Conference on Intelligent Tutoring Systems,* Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg. [102]

Papert, S. (1998), « Does easy do it? Children, games, and learning », *Game Developer*, Vol. 5/6, pp. 88. [21]

Pardos, Z., R. Baker, M. San Pedro, S. Gowda et S. Gowda (2013), « Affective states and state tests: Investigating how affect throughout the school year predicts end of year learning outcomes », dans Suthers, D. et al. (dir. pub.), *Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Analytics and Knowledge*, ACM, New York, NY. [84]

Patrick, B., E. Skinner et J. Connell (1993), « What motivates children's behavior and emotion? Joint effects of perceived control and autonomy in the academic domain », *Journal of Personality and Social Psychology,* Vol. 65/4, pp. 781-791, http://dx.doi.org/10.1037/0022-3514.65.4.781 [14]

Pekrun, R., T. Goetz, L. Daniels, R. Stupnisky et R. Perry (2010), « Boredom in achievement settings: Exploring control–value antecedents and performance outcomes of a neglected emotion », *Journal of Educational Psychology*, Vol. 102/3, pp. 531-549, http://dx.doi.org/10.1037/a0019243. [15]

Pekrun, R., N. Hall, R. Perry et T. Goetz (2014), « Boredom and academic achievement: Testing a model of reciprocal causation », *Journal of Educational Psychology,* Vol. 106/3, pp. 696-710. [4]

Pekrun, R. et L. Linnenbrink-Garcia (2012), « Academic emotions and student engagement », dans Christenson, S., A. Reschly and C. Wylie (dir. pub.), *Handbook of research on student engagement,* Springer, New York. [37]

Perkins, R. et A. Hill (1985), « Cognitive and affective aspects of boredom », *British Journal of Psychology,* Vol. 76/MAY, pp. 221-234. [16]

Pham, P. et J. Wang (2015), « AttentiveLearner: improving mobile MOOC learning via implicit heart rate tracking », dans *International Conference on Artificial Intelligence in Education*, Springer, Berlin Heidelberg. [88]

Pianta, R., B. Hamre et J. Allen (2012), « Teacher-student relationships and engagement: Conceptualizing, measuring, and improving the capacity of classroom interactions », dans Christenson, S., A. Reschly and C. Wylie (dir. pub.), *Handbook of research on student engagement*, Springer, New York, NY. [53]

Plass, J., S. Heidig, E.O. Hayward, B. Homer et E. Um (2014), « Emotional design in multimedia learning: Effects of shape and color on affect and learning », *Learning and Instruction,* Vol. 29, pp. 128-140. [119]

Plass, J., B. Homer et C. Kinzer (2015), « Foundations of game-based learning », *Educational Psychologist,* Vol. 50/4, pp. 258-283. [125]

Podsakoff, P., S. MacKenzie, J-Y. Lee et N. Podsakoff (2003), « Common method biases in behavioral research: A critical review of the literature and recommended remedies », *Journal of Applied Psychology*, Vol. 88/5, pp. 879-903. [48]

Porayska-Pomsta, K., M. Mavrikis, S. D'Mello, C. Conati et R. Baker (2013), « Knowledge elicitation methods for affect modelling in education », *International Journal of Artificial Intelligence in Education,* Vol. 22, pp. 107-140. [71]

Psotka, J. (1995), « Immersive training systems: Virtual reality and education and training », *Instructional science,* Vol. 23/5-6, pp. 405-431. [155]

Putwain, D., S. Baker, W. Symes et R. Pekrun (2018), « Reciprocal relations between students' academic enjoyment, boredom, and achievement over time », *Learning and Instruction,* Vol. 54, pp. 73-81. [5]

Raca, M., L. Kidzinski et P. Dillenbourg (2015), « Translating head motion into attention-towards processing of student's body language », dans *Proceedings of the 8th International Conference on Educational Data Mining,* International Educational Data Mining Society. [62]

Randall, J., F. Oswald et M. Beier (2014), « Mind-wandering, cognition, and performance: A theory-driven meta-analysis of attention regulation », *Psychological Bulletin*, Vol. 140/6, pp. 1411-1431. [114]

Reeve, J. et C. Tseng (2011), « Agency as a fourth aspect of students' engagement during learning activities », *Contemporary Educational Psychology,* Vol. 36/4, pp. 257-267. [36]

Renninger, K. et J. Bachrach (2015), « Studying triggers for interest and engagement using observational methods », *Educational Psychologist*, Vol. 50/1, pp. 58-69. [35]

Reschly, A. et S. Christenson (2012), « Jingle, jangle, and conceptual haziness: Evolution and future directions of the engagement construct », dans S. Christenson, A. Reschly and C. Wylie (dir. pub.), *Handbook of research on student engagement,* Springer, Berlin. [33]

Rey, G. (2012), « A review of research and a meta-analysis of the seductive detail effect », *Educational Research Review*, Vol. 7/3, pp. 216-237. [22]

Risko, E., D. Buchanan, S. Medimorec et A. Kingstone (2013), « Everyday attention: mind wandering and computer use during lectures », *Computers & Education*, Vol. 68/1, pp. 275-283. [115]

Ritterfeld, U., M. Cody et P. Vorderer (2009), *Serious games: Mechanisms and effects, Routledge, New York and London.* [126]

Rodrigo, M. et R. Baker (2011), « Comparing Learners' Affect While Using an Intelligent Tutor and an Educational Game », *Research and Practice in Technology Enhanced Learning,* Vol. 6, pp. 43-66. [29]

Roediger, H. et J. Karpicke (2006), « Test-enhanced learning - Taking memory tests improves long-term retention », *Psychological Science,* Vol. 17/3, pp. 249-255. [25]

Rowe, J., B. Mott, S. McQuiggan, J. Robison, S. Lee et J. Lester (2009), *Crystal island: A narrative-centered learning environment for eighth grade microbiology,* Paper presented at the Workshop on Intelligent Educational Games at the 14th International Conference on Artificial Intelligence in Education, Brighton, UK. [149]

Rowe, J., L. Shores, B. Mott et J. Lester (2010), « Integrating learning and engagement in narrative-centered learning environments », dans Kay, J. and V. Aleven (dir. pub.), *Proceedings of the 10th International Conference on Intelligent Tutoring Systems,* Springer, Berlin / Heidelberg. [151]

Ryu, S. et D. Lombardi (2015), « Coding classroom interactions for collective and individual engagement », *Educational Psychologist*, Vol. 50/1, pp. 70-83. [54]

Sabourin, J. et J. Lester (2014), « Affect and Engagement in Game-Based Learning Environments », *IEEE Transactions on Affective Computing*, Vol. 5/1, pp. 45-56. [72]

Sanchez, E., S. Young et C. Jouneau-Sion (2016), « Classcraft: from gamification to ludicization of classroom management », *Education and Information Technologies,* Vol. 22/2, pp. 497-513, http://dx.doi.org/10.1007/s10639-016-9489-6. [122]

Schneider, B., J. Krajcik, J. Lavonen, K. Salmela-aro et M. Geller (2020), *Learning Science-the Value of Crafting Engagement in Science Environments,* New Haven. CT: Yale University Press. [146]

Shechtman, N., A. DeBarger, C. Dornsife, S. Rosier et L. Yarnall (2013), *Promoting grit, tenacity, and perseverance: Critical factors for success in the 21st century.* [67]

Shute, V., L. Rieber et R. Van Eck (2011), « Games... and... learning », dans Reiser, R. and J. Dempsey (dir. pub.), *Trends and issues in instructional design and technology,* Pearson Education, Inc. [131]

Shute, V., M. Ventura et F. Ke (2015), « The power of play: The effects of Portal 2 and Lumosity on cognitive and noncognitive skills », *Computers & Education,* Vol. 80, pp. 58-67. [134]

Shute, V., M. Ventura et Y. Kim (2013), « Assessment and learning of qualitative physics in Newton's playground », *The Journal of Educational Research,* Vol. 106/6, pp. 423-430. [103]

Shute, V., L. Rieber et R. Van Eck (2014), « Video games and learning », dans Tierney, W. et al. (dir. pub.), *Postsecondary play: The role of games and social media in higher education,* John Hopkins Press, Baltimore, MD. [128]

Sinatra, G., B. Heddy et D. Lombardi (2015), « The challenges of defining and measuring student engagement in science », *Educational Psychologist*, Vol. 50/1, pp. 1-13. [39]

Skinner, E. et M. Belmont (1993), « Motivation in the classroom: Reciprocal effects of teacher behavior and student engagement across the school year », *Journal of Educational Psychology*, Vol. 85/4, pp. 571-581. [65]

Skoric, M., L. Teo et R. Neo (2009), « Children and video games: addiction, engagement, and scholastic achievement », *Cyberpsychology & behavior,* Vol. 12/5, pp. 567-572. [135]

Sleeman, D. et J. Brown (1982), *Intelligent tutoring systems*, Academic Press, New York. [107]

Spires, H., J. Rowe, B. Mott et J. Lester (2011), « Problem solving and game-based learning: Effects of middle grade students' hypothesis testing strategies on learning outcomes », *Journal of Educational Computing Research*, Vol. 44/4, pp. 453-472. [150]

Stahl, G., T. Koschmann et D. Suthers (2006), « Computer-supported collaborative learning: An historical perspective », dans Sawyer, K. (dir. pub.), *Cambridge handbook of the learning sciences*, Cambridge University Press, New York, NY. [171]

Steenbergen-Hu, S. et H. Cooper (2014), « A meta-analysis of the effectiveness of intelligent tutoring systems on college students' academic learning », *Journal of Educational Psychology,* Vol. 106/2, pp. 331-347. [26]

Steenbergen-Hu, S. et H. Cooper (2013), « A meta-analysis of the effectiveness of intelligent tutoring systems on K–12 students' mathematical learning », *Journal of Educational Psychology*, Vol. 105/4, pp. 970-987. [109]

Tobias, S. et J. Fletcher (2011), *Computer games and instruction*, Information Age Publishers, Charlotte, NC. [142]

Turner, J. et D. Meyer (2000), « Studying and understanding the instructional contexts of classrooms: Using our past to forge our future », *Educational Psychologist*, Vol. 35/2, pp. 69-85. [51]

Tze, V., L. Daniels et R. Klassen (2016), « Evaluating the relationship between boredom and academic outcomes: a meta-analysis », *Educational Psychology Review*, Vol. 28/1, pp. 119-144. [6]

Um, E., J. Plass, E. Hayward et B. Homer (2012), « Emotional design in multimedia learning », *Journal of Educational Psychology*, Vol. 104/2, pp. 485-498. [120]

Valstar, M., M. Mehu, B. Jiang, M. Pantic et K. Scherer (2012), « Meta-analysis of the first facial expression recognition challenge », *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, Vol. 42/4, pp. 966-979. [69]

Ventura, M., V. Shute et Y. Kim (2012), « Video gameplay, personality and academic performance », *Computers & Education*, Vol. 58/4, pp. 1260-1266. [136]

Ventura, M., V. Shute et W. Zhao (2013), « The relationship between video game use and a performance-based measure of persistence », *Computers & Education*, Vol. 60/1, pp. 52-58, http://dx.doi.org/10.1016/j.compedu.2012.07.003. [137]

Vincent-Lancrin, S., J. Urgel, S. Kar et G. Jacotin (2019), *Measuring Innovation in Education 2019: What Has Changed in the Classroom?*, Educational Research and Innovation, OECD Publishing, Paris, https://dx.doi.org/10.1787/9789264311671-en. [169]

Volpe, R., J. DiPerna, J. Hintze et E. Shapiro (2005), « Observing students in classroom settings: A review of seven coding schemes », *School Psychology Review*, Vol. 34/4, pp. 454-474. [55]

Wasson, A. (1981), « Susceptibility to Boredom and Deviant-Behavior at School », *Psychological Reports*, Vol. 48/3, pp. 901-902. [17]

Whitehill, J., Z. Serpell, Y. Lin, A. Foster et J. Movellan (2014), « The faces of engagement: Automatic recognition of student engagement from facial expressions », *IEEE Transactions on Affective Computing*, Vol. 5/1, pp. 86 - 98. [89]

Wilson, K., W. Bedwell, E. Lazzara, E. Salas, C Burke, J. Estock, K. Orvis et C. Conkey (2009), « Relationships between game attributes and learning outcomes review and research proposals », *Simulation & gaming*, Vol. 40/2, pp. 217-266. [143]

Yang, D., T. Sinha, D. Adamson et C. Penstein Rose (2013), *Turn on, tune in, drop out: Anticipating student dropouts in massive open online courses*, Paper presented at the Proceedings of the 2013 NIPS Data-Driven Education Workshop. [19]

Young, M., S. Slota, A. Cutter, G. Jalette, G. Mullin, B. Lai, Z. Simeoni, M. Tran et M. Yukhymenko (2012), « Our Princess Is in Another Castle: A Review of Trends in Serious Gaming for Education », *Review of Educational Research*, Vol. 82/1, pp. 61-89. [144]

5 Analyse des données de la classe : Du gros plan sur l'élève à une vue générale de la classe

Pierre Dillenbourg
École polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse

Par technologies d'apprentissage, on entend habituellement les activités exécutées par un ou quelques apprenants à l'aide d'un dispositif numérique. Comment les technologies tiennent-elles compte du plus grand nombre en classe ? L'analyse des données de la classe procure aux enseignants un soutien en temps réel dans la gestion de classe : suivre l'implication des élèves dans une classe ; décider quand et comment intervenir dans leurs activités d'apprentissage ; réutiliser le résultat d'une activité dans une autre ; former des groupes d'élèves ; intégrer le travail d'un apprenant dans un cours ; décider quand passer à une nouvelle activité ; ou aider les enseignants à réguler leur propre comportement. Ce chapitre aborde la classe comme un système numérique. Il imagine comment cette vision peut devenir réalité, et ce que l'on peut déjà en retirer, à savoir que le rôle des enseignants dans le succès de l'enseignement numérique est essentiel.

Introduction

L'analyse de l'apprentissage vise à modeler le processus d'apprentissage, c'est-à-dire à définir comment les apprenants développent leurs compétences et talents en effectuant certaines activités. Grâce à ces modèles, et à condition que les activités soient exécutées sur ordinateur, le logiciel peut adapter les activités suivantes aux besoins de l'apprenant. Que se passerait-il si 30 apprenants utilisaient indépendamment ce logiciel d'éducation dans la même classe ? De nombreuses activités importantes se produiraient alors en classe à l'insu du logiciel, des activités que, pour la plupart, l'analyse des données ne pourrait pas prendre en compte, comme les interventions de l'enseignant et les discussions entre pairs, etc. Les élèves s'impliquent-ils davantage dans le système lorsque l'enseignant est à proximité que lorsqu'il est éloigné ? Et si les activités individuelles sur les ordinateurs ne constituaient qu'une partie du cours, en plus du travail d'équipe et des cours magistraux ? L'analyse des données ignorerait ces activités, invisibles pour le logiciel, alors même qu'elles sont importantes en termes de résultats d'apprentissage des apprenants.

Ce chapitre approfondit la portée de l'analyse des données de l'apprentissage, en partant de la modélisation des interactions des apprenants avec les dispositifs numériques pour finir par la saisie de ce qui se passe dans cet écosystème singulier qu'on appelle la classe. L'analyse des données de la classe est multimodale, c'est-à-dire qu'elle recueille des données pertinentes grâce à une variété de capteurs afin d'analyser les modes de conversations, les niveaux d'attention, les postures corporelles, etc. Certains de ces capteurs sont des caméras, ce qui d'emblée soulève des questions d'éthique. L'équilibre entre ces risques et les avantages potentiels de l'analyse des données de la classe est une préoccupation majeure.

Les avantages de l'analyse de la classe sont idéalement de deux ordres. En premier lieu, l'analyse de la classe est conçue pour améliorer la gestion de la classe, par exemple, en affichant un tableau de bord qui permet à l'enseignant de repérer les apprenants expérimentant des difficultés ou qui les aide à déterminer le bon moment pour passer à l'activité suivante. En second lieu, l'amélioration de la gestion de la classe devrait conduire à de meilleurs résultats pour les apprenants, comme l'ont démontré Do-Lenh et al. (2012[1]) ainsi que Holstein, McLaren et Aleven (2018[2]). Autre avantage attendu de l'analyse des données de la classe est celui qui permet d'étendre l'analyse de l'apprentissage à une vaste gamme d'activités d'apprentissage, comme les cours magistraux, le travail en équipe, les activités pratiques ou des discussions en classe, et même certaines activités en dehors de la classe, telles que des sorties éducatives. Le terme « orchestration de la classe » reflète parfaitement ce que recouvre la gestion d'une organisation pédagogique aussi riche, c'est-à-dire qui regroupe des activités individuelles, en groupe et en classe entière, certaines à l'aide des technologies numériques, d'autres non. L'analyse des données de la classe ne mène pas à une prise de décisions à la place des enseignants. Au contraire, elle fournit aux enseignants des informations qu'ils devront interpréter, puisqu'ils connaissent le contexte en général : par exemple, le système peut indiquer qu'un apprenant est en difficulté, alors qu'en fait il est peut-être malade ou en train d'aider un autre élève ou qu'il a des problèmes de connexion. Il devrait toujours y avoir un enseignant présent dans la classe ; l'analyse des données de la classe renforce sa capacité à enseigner de manière efficace.

Ce chapitre examine comment l'analyse de l'apprentissage peut transformer le paysage de l'éducation au cours de la prochaine décennie. Nous prenons pour hypothèse qu'une classe de 2030 ressemblera visuellement à une classe de 2020, tout comme celle-ci est similaire à une classe de 1920. Si un conducteur de voiture de 1920 ressuscitait en 2020, il aurait du mal à conduire une voiture. Il ne discernerait pas non plus qu'une plaque à induction est une cuisinière, ou qu'un Smartphone est un téléphone, mais il saurait qu'il entre dans une « classe ». Le système éducatif évolue lentement. Les enseignants d'aujourd'hui vivent dans la « classe du futur » des enseignants qui vivaient dans les années 1980. En conséquence, l'analyse de l'évolution de l'enseignement numérique au cours des 40 dernières années permet d'établir des projections linéaires pour les 10-20 années à venir. Prédire qu'il y aura encore de vraies salles de classe pourrait paraître conservateur. Certains vont même jusqu'à affirmer que la salle de classe disparaîtra. Ils négligent une réalité désagréable : les établissements scolaires remplissent également une fonction de garderie, c'est-à-dire qu'ils gardent les enfants occupés pendant que les parents travaillent. Ce chapitre postule que les responsables politiques auront encore à faire des choix quant à la salle de classe traditionnelle en 2030. Certaines initiatives de type la « classe du futur » la voient comme un espace peu chaleureux meublé d'écrans et d'ordinateurs individuels. Ce chapitre présente une vision différente dans laquelle les salles de classe demeurent des lieux de vie sociale riches et où les dispositifs numériques restent discrets.

La vision : Les salles de classe comme un système numérique

Entrer dans une salle de classe de demain, cela pourrait être comme monter dans une voiture aujourd'hui. Dans les deux cas, on entre dans un espace physique avec des portes, des sièges, des fenêtres et d'autres personnes, entre autres, équipé également de nombreux capteurs, d'ordinateurs et d'actionneurs. S'asseoir dans une voiture s'assimile à se retrouver dans un système numérique. Cela peut sembler effrayant, mais un système numérique qui déclenche une alarme lorsque le conducteur somnole revêt des avantages qui dépassent les préoccupations éthiques liées à la vidéosurveillance du conducteur. Les systèmes de classe font face au même compromis éthique.

Un système numérique saisit (entrée), traite et communique (sortie) des informations sous forme numérique. Si tout peut être considéré comme étant un système, pourquoi parler d'une classe comme d'un système (numérique) ? Cela accentue la différence entre le point de vue traditionnel selon lequel la salle de classe est un espace physique dans lequel on introduit des systèmes numériques et le point de vue selon lequel la salle de classe devient un système numérique.

Comme pour tout système, la classe est constituée de plusieurs sous-systèmes et ainsi de suite. Cet ensemble de sous-systèmes est un système si ces sous-systèmes remplissent collectivement une fonction qu'aucun d'entre eux ne peut accomplir seul. Une salle de classe pourrait comprendre plusieurs outils numériques (p. ex., un logiciel de mathématiques, un tableur, des robots éducatifs, une plateforme de travail en équipe, etc.) qui remplissent chacun une fonction bien précise. Les personnes dans la pièce, l'enseignant et les apprenants, ainsi que le matériel produit en classe (p. ex., une affiche présentant le tableau périodique), exécutent d'autres fonctions cognitives. Le « système de la salle de classe » remplit une bien plus haute fonction que ces sous-systèmes et l'une d'entre elles est l'orchestration de la salle de classe.

Dans des systèmes d'enseignement personnalisé, les données d'entrée correspondent au comportement des apprenants, la fonction adapte l'enseignement à chaque apprenant et les données de sortie correspondent à l'action suivante du système, par exemple, la rétroaction donnée ou l'activité suivante qui est proposée. Dans l'approche de la classe comme système, les données d'entrée correspondent aux analyses des données collectées dans la classe, la sortie des données aux informations fournies à l'enseignant ou aux apprenants, par exemple, les tableaux de bord, et la fonction correspond à l'orchestration de la classe. Holstein, McLaren et Aleven (2017[3]) ont observé le comportement des enseignants pendant que leurs élèves travaillaient avec un système de tutorat intelligent et ont constaté que les enseignants passaient en moyenne 47 % de leur temps à ne rien faire ou étaient en dehors de la classe. Ils se sentaient tout simplement « hors du coup ». Dans l'analyse de l'apprentissage, il s'agit de garder au minimum une personne impliquée. Il est question de co-orchestration de la salle de classe par l'enseignant et les composants numériques du système (Santos, 2012[4]).

Comment en sommes-nous arrivés là ?

Si l'on regarde l'évolution des technologies d'apprentissage au cours des 40 dernières années, 4 tendances ont mené à l'émergence du concept de la « salle de classe comme un système ».

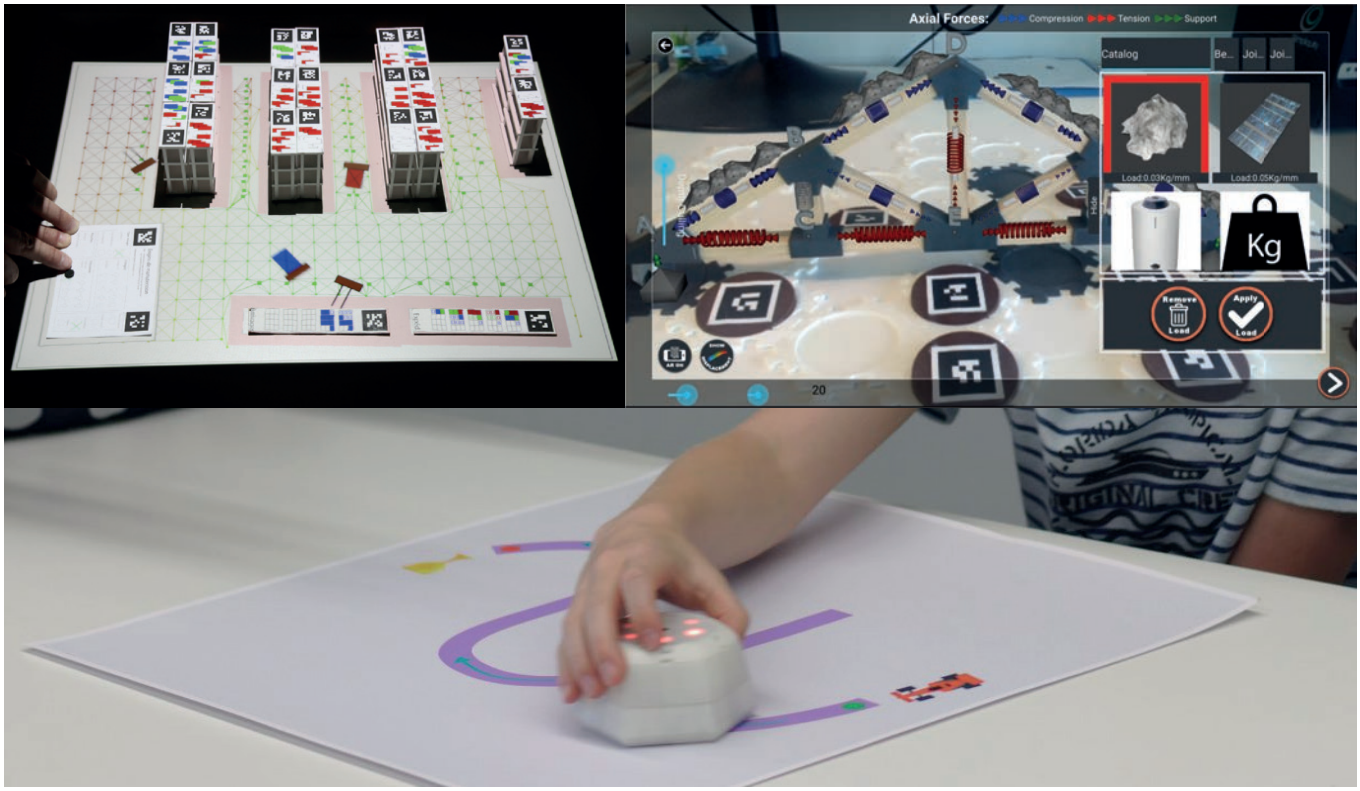
La première tendance est l'intégration grandissante des approches pédagogiques qui ont, pendant des années, été considérées comme mutuellement exclusives. De nombreux outils pédagogiques utilisés dans les établissements s'inspirent de l'idée de « l'apprentissage par la maîtrise » (Bloom, 1968[5]) : décomposer des compétences complexes en compétences simples en fournissant un retour rapide et en travaillant progressivement sur des compétences plus complexes. Les « micromondes » sont une autre famille d'outils (Papert, 1987[6]), des sortes de bacs à sable numériques où les apprenants acquièrent des compétences en résolution de problèmes en faisant des essais et des erreurs, et reflètent les théories constructivistes. La même théorie a inspiré les outils d'apprentissage fondés sur l'exploration, en l'occurrence par l'expérimentation réelle ou simulée. Les cours en ligne (MOOCS) et autres environnements où les apprenants suivent principalement des cours ou lisent des textes se sont inspirés de l'enseignement classique. Ces théories d'apprentissage s'intéressent à l'apprentissage individuel et s'appuient sur la capacité d'adapter l'enseignement à différents apprenants. À l'inverse, des études empiriques ont démontré les avantages de l'apprentissage collaboratif, qui a donné naissance à des environnements conçus pour l'apprentissage en équipe (Dillenbourg, Järvelä et Fischer, 2009[7]) et s'appuient sur les théories de la cognition sociale (Vygotsky, 1964[8]). Ces oppositions ont tendance à s'estomper. Le système cognitif humain est un logiciel social qui fonctionne à l'aide d'un matériel individuel, le cerveau. Pour quelle raison un enseignant devrait-il miser sur une approche éducative numérique unique alors qu'il peut mettre en œuvre plusieurs approches au moment opportun et là où elles s'avèrent pertinentes ?

La deuxième tendance est qu'il y a une compatibilité croissante entre les technologies éducatives utilisées aujourd'hui. Pendant des années, on ne pouvait pas, par exemple, techniquement avoir en même temps un logiciel d'exercices de maths et un lecteur vidéo. Les technologies du Web ont facilité l'interopérabilité de presque tous les composants numériques. Cette possibilité d'intégration de différents outils rejoint la première tendance qui s'intéresse à l'intégration des différentes approches pédagogiques. Cette évolution ne mène pas à un meilleur système de gestion de l'apprentissage qui offrirait toutes les fonctions nécessaires aux activités d'apprentissage, mais plutôt au développement d'écosystèmes d'outils numériques, chacun ayant des fonctions bien précises. À l'heure actuelle, l'interopérabilité des environnements d'apprentissage est encore loin d'être suffisante. Des normes de métadonnées (Duval, 2001[9]) ont été développées pour faciliter l'échange de contenus numériques (telles que Sharable Content Object Reference Model [SCORM] ou Instructional Management System Learning Design [IMS LD]) et d'autres, comme Learning Tools Interoperability (LTI), pour renforcer l'interopérabilité, c'est-à-dire pour échanger les données sur les apprenants (Severance, Hanss et Hardin, 2010[10]). Aujourd'hui, les traces numériques que laissent les apprenants lorsqu'ils utilisent un outil sont collectées et agrégées dans des modèles spécifiques à chaque outil utilisé. Mais si les élèves travaillent avec plusieurs outils numériques, aucun de ces outils ne permettrait d'obtenir un modèle exhaustif de l'élève. De récents projets (Mangaroska, Vesin et Giannakos, 2019[11]) regroupent les données des applications afin d'émettre un résumé synthétique des parcours d'apprentissage des apprenants. À cet égard, l'interface xAPI, norme de partage de contenus entre applications (Bakharia et al., 2016[12]), semble remporter un succès grandissant. La production d'analyses multiplateformes décuple évidemment les risques en matière de protection des données.

La troisième tendance porte sur l'évolution du matériel. Pendant des années, on a utilisé des salles spéciales équipées d'ordinateurs, de soi-disant « laboratoires informatiques », encombrées de rangées de boîtes et d'écrans verticaux qui cachaient pratiquement les élèves aux yeux des enseignants. Puis, les portables ont fait leur entrée dans les véritables salles de classe, suivis des tablettes et des Smartphones, apportant les technologies dans des environnements informels, sur le canapé de la maison, par exemple, ou dans la forêt au cours d'une promenade. Aujourd'hui, la diversité des appareils pouvant être exploités dans le monde de l'éducation a explosé avec l'intégration de capteurs et d'actionneurs dans des chaussures, des tasses, des vêtements, etc. – en fait n'importe quel objet (l' « Internet des objets »). Bien que plus présents, les appareils sont moins visibles ; ils ne disparaissent pas vraiment, mais sont davantage à l'arrière-plan. La frontière entre ce qui est numérique et ce qui ne l'est pas est progressivement devenue floue, comme l'illustrent les exemples dans le Graphique 5.1. Les apprenants, suivis par des capteurs, peuvent manipuler physiquement des objets, le tout combiné à la réalité augmentée. Les technologies physiques-numériques décuplent les compétences que les apprenants peuvent mettre en pratique et qui peuvent être évaluées numériquement, ce qui s'avère particulièrement pertinent dans l'enseignement des comportements professionnels que dispensent les programmes de formation des enseignants.

Toutefois, même si les appareils numériques envahissent les futures salles de classe, ils ne les feront pas ressembler à des salles de contrôle de la NASA, remplies d'écrans et d'appareils. La classe du futur pourrait en fait ressembler davantage à une salle quasiment dépourvue de technologie. Pourquoi pas une salle avec des meubles en bois et une jolie vue sur les jardins ? Plus les outils numériques sont périphériques, moins ils sont gênants pour les interactions sociales (dialogues, contacts visuels, etc.) et l'orchestration de la classe.

Graphique 5.1 Le flou entre physique et numérique



Remarque : Panneau en haut à gauche : des interfaces tangibles permettent aux élèves d'interagir en bougeant des objets bien réels sur une table. Cette simulation d'actions dans un entrepôt permet aux apprentis de visualiser les principes logistiques. Panneau en haut à droite : la réalité augmentée associe des images réelles de l'environnement à l'information numérique affichée sur une tablette ou sur des systèmes d'affichage tête haute. Cette simulation des forces qui s'exercent dans les structures de toit permet aux futurs charpentiers d'acquérir une compréhension intuitive de la statique. Panneau du bas : des robots éducatifs qui sont en même temps des objets physiques et numériques. Ce robot Cellulo envoie aux apprenants des rétroactions tactiles au cours de leurs diverses séances de manipulation.
Source: Do-Lenh et al. (2012[1]); Cuendet et al. (2015[13]).

La quatrième tendance consiste à accorder davantage d'attention à l'activité d'apprentissage qu'aux technologies d'apprentissage. Prenons l'exemple des robots éducatifs employés pour apprendre le codage. Certains robots peuvent s'avérer plus pertinents que d'autres, mais le degré d'apprentissage des enfants dépend moins des caractéristiques du robot que de l'activité qu'ils accomplissent à l'aide du robot. Il en est de même pour les MOOCS, la réalité augmentée ou les outils virtuels, et pour toutes les technologies. La capacité à orchestrer des activités complexes en classe constitue le principal marqueur de réussite. L'orchestration de la classe correspond à la gestion en temps réel de multiples activités en fonction de multiples contraintes (Dillenbourg, 2013[14]). Par multiplicité des activités, on entend l'intégration d'activités individuelles, d'équipe et de classe dans divers environnements ainsi que sans aucun outil numérique. La multiplicité des contraintes souligne plutôt les nombreux aspects pratiques qui influencent la prise de décision des enseignants : la gestion du temps d'enseignement, la prise en charge des apprenants qui ont raté le cours précédent ou qui sont arrivés en retard, la prise en compte de l'espace physique – par exemple, le passage du travail en équipe au cours magistral, le maintien d'un niveau raisonnable de discipline, la diminution de la charge de travail de l'enseignant, etc. Ces contraintes, quelque peu ignorées dans la recherche scientifique, peuvent, néanmoins et probablement, expliquer certaines difficultés auxquelles se heurte l'implantation des technologies d'apprentissage.

La classe : source de données d'entrée

Les traces d'interaction entre l'apprenant et le logiciel ne fournissent qu'un compte rendu partiel (et limité) de ce qui se passe dans une classe, c'est pourquoi il est nécessaire de voir plus loin que la saisie avec un clavier et la souris. Même lorsque les apprenants sont censés interagir exclusivement avec un appareil personnel, ils effectuent souvent des activités « hors logiciel », dont certaines sont liées à l'activité (p. ex., demander de l'aide à l'enseignant), tandis que d'autres sont « hors sujet » (p. ex., discuter en ligne, naviguer sur le Web, rêvasser, etc.). Certains élèves demanderont de l'aide à l'enseignant et, inversement, ce dernier peut intervenir pour donner un coup de pouce à un apprenant inactif.

Nous proposons l'expression « analyse des données de la classe » pour souligner que toute action dans la classe peut être saisie et analysée pour modeler le processus d'apprentissage et pédagogique. Holstein et al. (2017[3]) ont utilisé un outil de restitution de la salle de classe pour tenir compte des interactions « hors logiciels » et de l'analyse des données issue des « interactions avec le logiciel ». On peut, en effet, collecter les données de toute activité en classe, y compris celles qui font appel à des accessoires technologiques. Ainsi, les « clickers » ou les « systèmes de réponse personnels » visent à renforcer la participation durant les cours magistraux ainsi qu'à collecter des données : 1) l'enseignant interrompt son cours et pose une question à choix multiple ; 2) les apprenants sélectionnent individuellement une réponse sur un dispositif personnel ; 3) leurs réponses sont recueillies et visualisées sur les diapositives de l'enseignant (sortie), permettant à celui-ci de faire des retours et de commenter les erreurs fréquentes. Ce scénario ouvre de nombreuses possibilités qui permettent des questions ouvertes, des questions graphiques, des mécanismes de vote, etc. Dans des situations d'enseignement par les pairs, entre les phases de réponse individuelle (2) et les commentaires de l'enseignant (3), on demande aux élèves de comparer leur réponse avec celle de leur voisin et d'expliquer leur choix. Fagen, Crouch et Mazur (2002[15]) ont solidement démontré que ce type de fonctionnement en classe améliore réellement les notes des étudiants aux examens universitaires de physique. L'Encadré 5.1 décrit un autre exemple piloté au Chili.

L'analyse multimodale (Ochoa et Worsley, 2016[17]) multiplie les possibilités de collecte des données de comportements dans le cadre de l'analyse de la classe. Dans une classe équipée de capteurs, tout regard, geste, pause corporelle, niveau de stress, etc. peut être saisi comme une entrée informatique. Sachant que le Smartphone de chaque élève est déjà équipé de 15 à 20 capteurs, chaque classe est potentiellement équipée de centaines de capteurs. Ahuja et al. (2019[18]) ont placé des microphones et des caméras dans des salles de classe afin de détecter les élèves qui levaient la main, la posture et le comportement vocal qu'ils adoptaient et ont établi une corrélation entre ces caractéristiques et l'efficacité du cours. Des universitaires comme Yanga et al. (2018[19]) ont mis sur pied des algorithmes pour identifier les émotions à partir d'images faciales. Les données d'entrée ne sont pas uniquement constituées de comportements (p. ex., des réponses posant une question), mais de ce qu'on pourrait appeler des « résidus de comportement », c'est-à-dire des fragments de comportement comme la rotation de la tête (Graphique 5.3), un soupir ou un regard fixe. On peut à peine interpréter ces fragments si on les prend séparément ; mais regroupés dans le temps ou recoupés avec ceux des autres apprenants, ils finissent par

devenir significatifs. Par exemple, l'approche adoptée par Raca, Kidzinski et Dillenbourg (2015[20]) ne consistait pas à estimer le niveau individuel d'attention puis à en faire la moyenne pour tous les élèves. Ils ont plutôt mis au point une mesure qui ne pouvait être calculée que pour une classe : les apprenants qui écoutent le cours ont tendance à tourner la tête en même temps, simplement parce qu'ils sont attentifs à un objet en mouvement, l'enseignant.

Encadré 5.1 Logiciel de groupe à affichage unique : un outil peu coûteux qui permet à l'enseignant de suivre l'activité de l'élève (Chili)

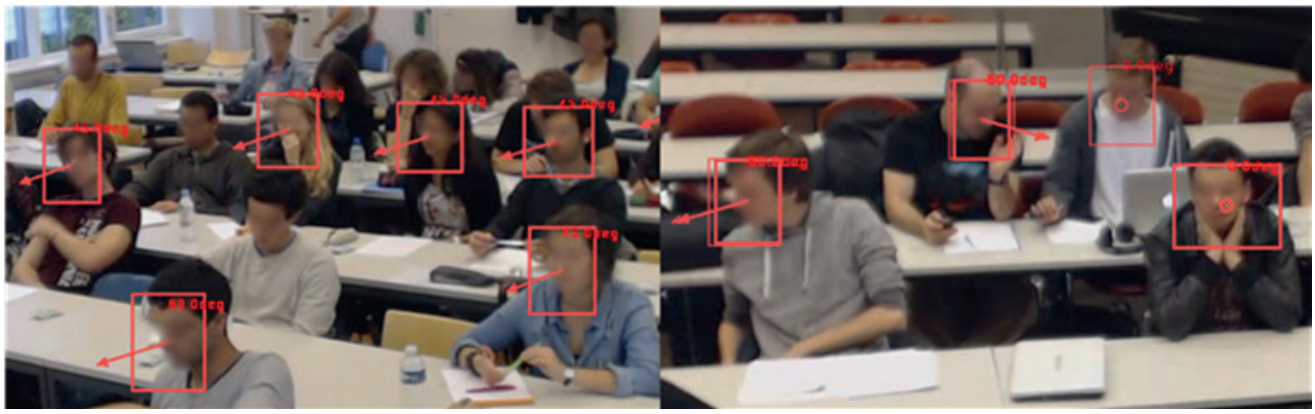
Le logiciel de groupe à affichage unique (LGA) est la preuve que l'analyse des données de la classe peut potentiellement intéresser les établissements des pays en développement, car il ne nécessite pas beaucoup d'équipements. Le LGA permet à plusieurs personnes de travailler et de collaborer sur un seul écran, chacun contrôlant son propre périphérique d'entrée. L'application LGA « Une souris par élève pour les maths » est un programme configuré par les chercheurs du Chili pour la classe et qui nécessite seulement un PC, un projecteur, une souris pour l'enseignant et une souris pour chaque élève participant à l'activité (Alcoholado et al., 2012[16]). Le programme intègre l'apprentissage personnalisé dans la classe, ce qui est particulièrement utile dans les contextes où l'enseignant doit gérer une classe d'élèves à des niveaux différents.

Comme l'illustre le Graphique 5.2, l'écran – que tout le monde peut voir grâce au projecteur – affiche des cellules individuelles, le nombre de cellules correspondant au nombre de souris connectées au système. Les élèves résolvent les exercices d'arithmétique dans leur propre cellule, passant à un nouvel exercice lorsque la réponse est correcte et à la difficulté supérieure lorsqu'ils ont résolu plusieurs exercices à la suite. Sur la droite de l'écran, les élèves sont classés en fonction du nombre de problèmes résolus et du niveau de difficulté atteint. Ils connaissent donc leur performance relative dans la classe, ce qui ajoute un élément de compétition et d'amusement à l'activité, et permet à l'enseignant d'identifier les élèves qui sont à la traîne. L'enseignant peut librement bouger son curseur sur l'écran pour aider les élèves individuellement, ou pour passer du mode « pratique » au mode « enseignement » en vue de résoudre des exercices types et d'expliquer des règles mathématiques à la classe. Les résultats d'une évaluation expérimentale menée dans un établissement d'enseignement primaire à Santiago à l'aide de prétests et de post-tests indiquent que le programme a un impact positif sur les résultats, particulièrement pour les élèves peu performants.

Graphique 5.2 Une souris par élève pour les maths

Remarque : les élèves travaillent sur des exercices de maths dans des cellules individuelles. Les icônes au milieu des cellules offrent quatre types de rétroaction : correct, incorrect, niveau suivant, souris inactive. Le panneau de droite affiche le classement des élèves en fonction du nombre d'exercices résolus et des résultats atteints.
Source: Alcoholado et al. (2012[16]) (reproduit avec autorisation).

Graphique 5.3 Estimation du niveau moyen d'attention dans une classe grâce à l'analyse des mouvements de la tête



Source: Raca, Kidzinski et Dillenbourg (2015[20]).

La modélisation d'une salle de classe entière est plus complexe que la modélisation des interactions au sein d'un environnement numérique dans lequel les bonnes et mauvaises réponses sont souvent définies d'avance. Certaines variantes du traçage bayésien des connaissances intègrent dans le modèle les interventions pédagogiques déclenchées par le système (Lin et Chi, 2016[21]) ; on pourrait également y ajouter les interventions de l'enseignant. Plus un environnement d'apprentissage est complexe et ouvert, moins les prédictions peuvent être précises. Cette moindre précision n'est, toutefois, pas un problème dans une situation de classe puisque la méthode informatique ne vise pas à prendre des décisions autonomes, mais à informer un enseignant qui prendra ensuite les décisions. Ce type de système, qui conjugue à la fois intelligence artificielle et humaine, permet de garder la personne humaine impliquée. L'analyse des données de la classe cherche *à faire participer l'enseignant.*

Transformer la classe en un dispositif d'entrée de données fait aussitôt s'agiter le drapeau rouge de l'éthique. Dans certains projets, les apprenants ou les enseignants sont équipés de capteurs (électroencéphalographe, capteur de conductivité de la peau, accéléromètres, fréquence cardiaque, oculométrie, etc.). Mettre des caméras dans une salle de classe est moins intrusif, mais ne respecte pas les principes de protection des données. Pour être conforme, le système pourrait ne pas stocker les images, mais les supprimer aussitôt les caractéristiques pertinentes extraites. En dépit de cette possibilité, nous estimons que le risque de mise sous surveillance des établissements demeure élevé et inacceptable dans de nombreuses cultures. Comme dans beaucoup de débats sur la protection des données, le risque doit être comparé aux avantages, à savoir la valeur du résultat. Selon Raca, Kidzinski et Dillenbourg (2015[20]), avertir un enseignant que l'attention d'un élève vient de chuter peut s'avérer utile aux enseignants débutants ou à ceux qui ont du mal à garder l'intérêt des élèves en classe. Toutefois, on n'en voit pas toujours les avantages. De nombreux universitaires comme Yanga et al. (2018[19]) ont mis au point des algorithmes pour déduire les émotions à partir d'images faciales. Quel est le rôle du système en cas de détection de la frustration d'un élève ? Quand les sentiments négatifs d'un élève sont intenses, sa motivation peut baisser, mais lorsque le niveau de confusion est modéré, il peut y puiser la motivation à fournir davantage d'efforts (D'Mello et al., 2014[22]). L'entrée de données de la classe devrait se limiter à ce qui peut réellement apporter une plus-value claire à l'apprentissage et à l'enseignement, et se fonder sur des théories qui ont été suffisamment démontrées empiriquement ou à des théories d'action très plausibles.

La classe : sortie des résultats d'analyse

Dans les systèmes de personnalisation adaptée, le résultat de l'analyse de l'apprentissage est, en général, une décision d'adapter l'enseignement aux besoins de l'apprenant. Dans l'analyse de la classe, le résultat est une information donnée aux humains impliqués – enseignants et apprenants – qui peuvent alors prendre une décision. Cette information prend souvent la forme d'un tableau de bord, c'est-à-dire une visualisation de l'état des apprenants ou des progrès de la classe, projetée sur les murs de la salle ou présentée sur écran.

La configuration de ces tableaux de bord comporte un défi d'utilisabilité : fournir des informations aux enseignants sans augmenter leur charge cognitive. La plupart des tableaux de bord élaborés jusqu'à maintenant submergent littéralement les enseignants par un surplus de détails. Une façon d'y remédier consisterait à mettre au point des interfaces capables de zoomer, c'est-à-dire qui donnent une vue d'ensemble, avec un minimum d'information par apprenant, mais qui permettent à l'enseignant d'obtenir des informations détaillées sur chaque apprenant. Le tableau de bord ne devrait pas entraîner une baisse de l'attention visuelle que les enseignants accordent à la classe. De nombreuses solutions présentent des avantages et des inconvénients : l'affichage du tableau de bord sur l'écran de la classe permet aux enseignants d'avoir un accès permanent à ces informations (voir le Graphique 5.4), mais les informations – y compris les difficultés personnelles – sont également visibles par toute la classe ; l'affichage du tableau de bord sur le bureau de l'enseignant protège la vie privée, mais l'oblige à retourner à son bureau ; l'affichage du tableau de bord sur une tablette permet un accès permanent et confidentiel, mais peut devenir encombrant ; l'affichage du tableau sur un dispositif de visualisation tête haute (p. ex., des lunettes) (Holstein et al., 2018[23]) fournit les deux informations tout en maintenant le contact visuel avec les apprenants et en gardant les mains libres, mais il n'est pas très naturel. D'autres dimensions conceptuelles concernent la nature des données affichées (p. ex., le contenu des réponses par rapport au score), le niveau social (p. ex., individu, équipes, classe), etc. Un choix de conception qui a particulièrement son importance dans l'orchestration de la classe est la configuration spatiale des informations (la position de Jean sur le tableau correspond-elle à son emplacement physique dans la classe ?).

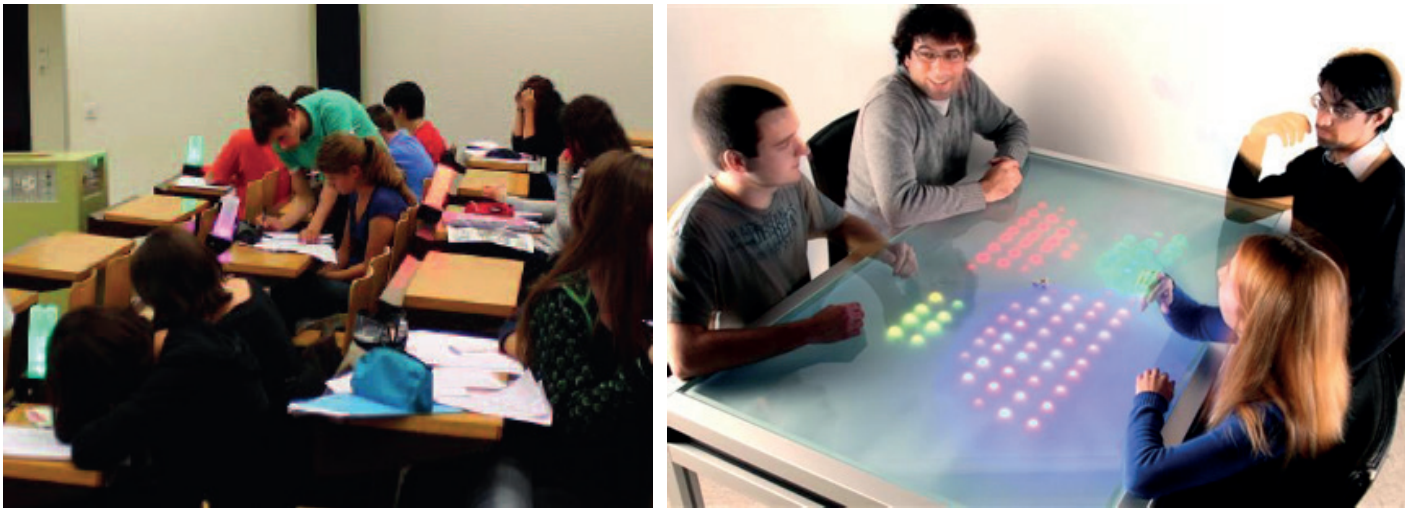
Les tableaux de bord peuvent être centralisés (sur un écran), répartis (sur divers écrans de la salle) ou « ambiants » (fournissant une information minimale aux enseignants par le biais d'indices répartis ou centralisés). C'est un autre choix de configuration qui revêt son importance. Les tableaux de bord sont en général centralisés, mais les tableaux répartis ont aussi leurs avantages dans l'orchestration de l'enseignement et de l'apprentissage. Le Graphique 5.4 montre une série de dispositifs en forme de lanternes (*Lantern*) disséminés dans la classe : ils constituent un tableau de bord réparti. Alavi et Dillenbourg (2012[24]) l'ont comparé avec un tableau centralisé également visible à tous, qui affiche exactement la même information, et ils ont constaté que celui qui est centralisé avait tendance à déclencher la compétition entre les élèves de sexe masculin alors que le tableau réparti déclenchait des interactions entre les équipes voisines.

Comme l'attention visuelle de l'enseignant est saturée par les éléments qu'il doit suivre, on pourrait exploiter la vision périphérique et fournir aux enseignants un tableau « ambiant ». Par exemple, Tomitsch, Grechenig et Mayrhofer (2007[25]) affichaient l'information sur le plafond. On n'attend pas, bien sûr, de l'enseignant qu'il regarde au plafond, mais si la couleur du plafond soudainement s'assombrit, il le remarquera. Gellersen, Schmidt et Beigl (1999[26]) ont transmis de l'information en modifiant l'intensité des diverses lampes ou en contrôlant le débit d'une fontaine d'intérieur. La vision périphérique ne transmet pas d'information précise, telle qu'une valeur numérique, mais une impression générale. L'expression « informatique ambiante » désigne les technologies qui ne requièrent pas toute l'attention, mais changent des éléments contextuels ou d'arrière-plan. Aujourd'hui, les intervenants dans le domaine de l'éducation ne connaissent pas l'informatique ambiante, mais celle-ci a le grand potentiel de transformer la classe entière en un écran géant. L'affichage de cette forme d'« informatique modeste » (Dillenbourg et al., 2011[27]) n'est pas configuré pour offrir des informations précises : si le score moyen des apprenants dans la classe est de 75 %, il peut être communiqué en réglant la couleur du mur du fond de la classe (auquel les enseignants font souvent face) avec une nuance de bleu qui n'est pas aussi précise que l'affichage du chiffre 75, mais est visible en permanence par l'enseignant. Avec le dispositif de la lanterne (Graphique 5.4, tableau de gauche), l'enseignant peut voir, par exemple, quelle équipe a attendu plus qu'une autre, sans savoir exactement combien de temps elle a attendu. De même, sur la table-écran (Graphique 5.4, panneau de droite), la couleur de la zone de table devant chaque apprenant permet d'évaluer approximativement la quantité de paroles qu'il prononce, mais n'en donne pas un compte exact. Il se peut qu'un participant prenne la parole un certain temps simplement parce qu'une introduction générale ou une longue explication est nécessaire. Il se peut également que des participants jouent le jeu en parlant délibérément et inutilement trop. Dans les deux cas, les participants sont conscients de la conversation qui a eu lieu, ils savent à quoi correspond l'affichage du tableau. Comme évoqué plus tôt, ce sont ces éléments qui nécessitent la présence humaine : sachant que le contexte permet aux humains d'interpréter les rétroactions (alors que l'informatique pourrait mal les interpréter).

Graphique 5.4 Les tableaux de bord répartis en classe

A. A Diriger l'attention de l'enseignant grâce à un dispositif de Lanternes (*Lantern*)

B. Réguler les dialogues au cours d'un travail d'équipe à l'aide d'une table-écran



Remarques : Panneau de gauche : diriger l'attention de l'assistant. Durant les séances de travaux dirigés, les élèves font part de leurs progrès à l'assistant virtuel de l'enseignant en se servant d'un petit dispositif en forme de lanterne (Lantern). La couleur indique les exercices sur lesquels ils travaillent, le nombre de LEDs indique combien de temps ils ont travaillé dessus. Pour demander de l'aide, ils appuient sur la lanterne, qui commence à clignoter d'abord lentement puis plus vite, ce qui révèle leur temps d'attente. Panneau de droite : réguler les dialogues dans l'équipe. Une palette de micros située au milieu de la table-écran capte l'endroit d'où proviennent les voix et, de fait, identifie celui ou celle qui parle. Plus une personne parle, plus les LEDs devant elle s'allumeront.
Source: À gauche : Alavi et Dillenbourg (2012[24]), À droite : Bachour, Kaplan et Dillenbourg (2010[28]).

Les exemples précédents reposent sur la perception visuelle, mais Moher et al. (2010[29]), ont également utilisé le son dans le cas d'une simulation sismologique en classe. La classe a simulé 21 tremblements de terre, sur une période de 6 semaines. Un caisson de basse produisait un grondement à basse fréquence et des affichages situés dans différentes parties de la salle reproduisaient des sismographes, en montrant un enregistrement graphique en temps réel des vibrations du sol. Puis, durant les cours sur les tremblements de terre, les élèves analysaient les courbes du sismographe afin de localiser l'épicentre du séisme dans la classe et d'en indiquer l'emplacement en suspendant au plafond une boule en polystyrène dont la couleur indiquait la magnitude du séisme. Alors que d'habitude les simulations scientifiques en classe sont faites sur ordinateurs, cette simulation était intégrée dans l'espace physique, c'est-à-dire que la salle de classe était le résultat informatique.

Fonctions des systèmes

Un système numérique traite les données entre leur entrée et leur sortie : le regroupement des données dans le temps ou recoupement entre apprenants en est un exemple typique. Ces processus mettent en œuvre les fonctions attendues du système. La fonction primordiale de l'analyse des données de la classe, l'orchestration de la classe, se fait par la mise en œuvre de fonctions bien précises. Sept d'entre elles permettent de comprendre les possibilités actuelles qu'ouvre l'analyse des données de la classe : le suivi et l'intervention, la diffusion des données, la formation d'équipes, les bilans (*debriefing*), les transitions temporelles, l'autorégulation des enseignants et l'orchestration dans son ensemble.

Suivi et intervention

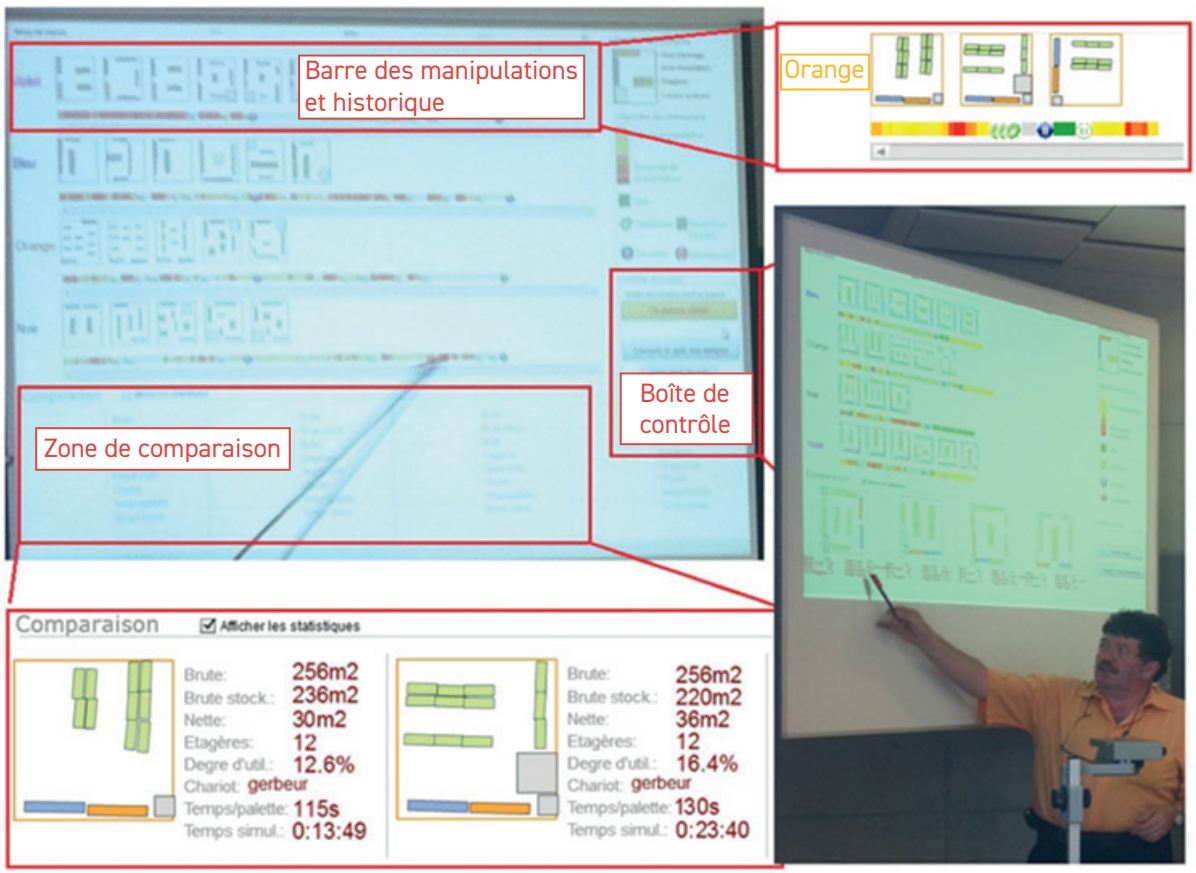
La principale fonction des tableaux de bord est de suivre la progression des apprenants afin de détecter l'apprenant inactif ou qui a des difficultés, les équipes qui ne coopèrent pas bien, l'élève qui pourrait en aider un autre, etc. Dans quelle mesure cette information est-elle utile à l'enseignant, alors qu'en un seul coup œil il peut voir ce que font les élèves de la classe ? Les réponses à cette question sont multiples : lorsque le nombre d'élèves est élevé ; quand les activités des apprenants ne sont pas facilement visibles par l'enseignant (p. ex., travail sur un ordinateur portable) ; quand l'activité de l'élève ne peut s'évaluer d'un simple coup œil (p. ex., si l'élève écrit un code complexe) ; quand l'observation directe est ingérable (p. ex., suivre 15 équipes de 2 élèves) ; quand ce qui importe n'est pas la

situation présente, mais ce que l'apprenant a fait depuis le début du cours, etc. En bref, la fonctionnalité clé d'un système est de *rendre visible ce qui est invisible*, par exemple, savoir combien de temps un apprenant est resté silencieux, connaître l'ascendant d'un élève sur ses coéquipiers dans un groupe de discussion, etc.

Le Graphique 5.5 illustre ce principe. Quatre équipes utilisent les outils tangibles de simulation logistique présentés dans le Graphique 5.1. Les quatre rangées du haut montrent l'historique de l'implantation de l'entrepôt imaginée par chaque équipe, ce qui permet à l'enseignant de suivre leur stratégie. Les expériences menées par Do Lenh et al. (2012[1]) ont montré que les binômes qui ont modifié l'implantation de l'entrepôt sans trop réfléchir et qui ont fréquemment exécuté la simulation n'ont pas appris grand-chose. C'est pourquoi le tableau de bord affiche une barre de couleur sous l'historique qui enregistre la fréquence des manipulations de l'entrepôt, du jaune au rouge (trop de manipulations). Les étudiants qui manipulent les étagères de plastique sur la table sont visibles, mais les fluctuations de la fréquence de ces manipulations par les quatre équipes ne sont pas visibles.

Pour cette fonction, les traitements de données mis en œuvre sont l'agrégation et l'évaluation. L'agrégation consiste à cumuler les réponses ou les comportements dans le temps et dans les équipes afin de fournir aux enseignants des visuels (lignes de temps, histogrammes, etc.) qui restituent l'effet du « coup œil ». Des processus simples d'évaluation comparent les données agrégées à certains seuils (p. ex., plus de 5 minutes d'inactivité ; moins de 30 % de bonnes réponses) ou utilisent un code couleur allant du moins au plus souhaitable comme dans le Graphique 5.5. La synthèse de code (p. ex., la mise en évidence des lignes incorrectes dans le code écrit par les étudiants) et le traitement de texte (p. ex., la recherche de similitudes entre les textes) sont des exemples de méthodes d'évaluation plus sophistiquées. L'objectif *n'est pas* d'intervenir à la place de l'enseignant, mais de déclencher une alerte à l'intention de l'enseignant, une invitation à prêter attention à quelqu'un ou quelque chose. Ainsi, dans le Graphique 5.5, dès que la barre de couleur comporte plusieurs sections rouges, l'enseignant peut interrompre la simulation et demander aux équipes de prédire les résultats de la prochaine simulation avant de la reprendre. Cela demande aux étudiants de fournir un effort de réflexion. Comme nous l'avons observé précédemment, les acquis des équipes qui ont lésiné sur les phases de réflexion sont plus faibles.

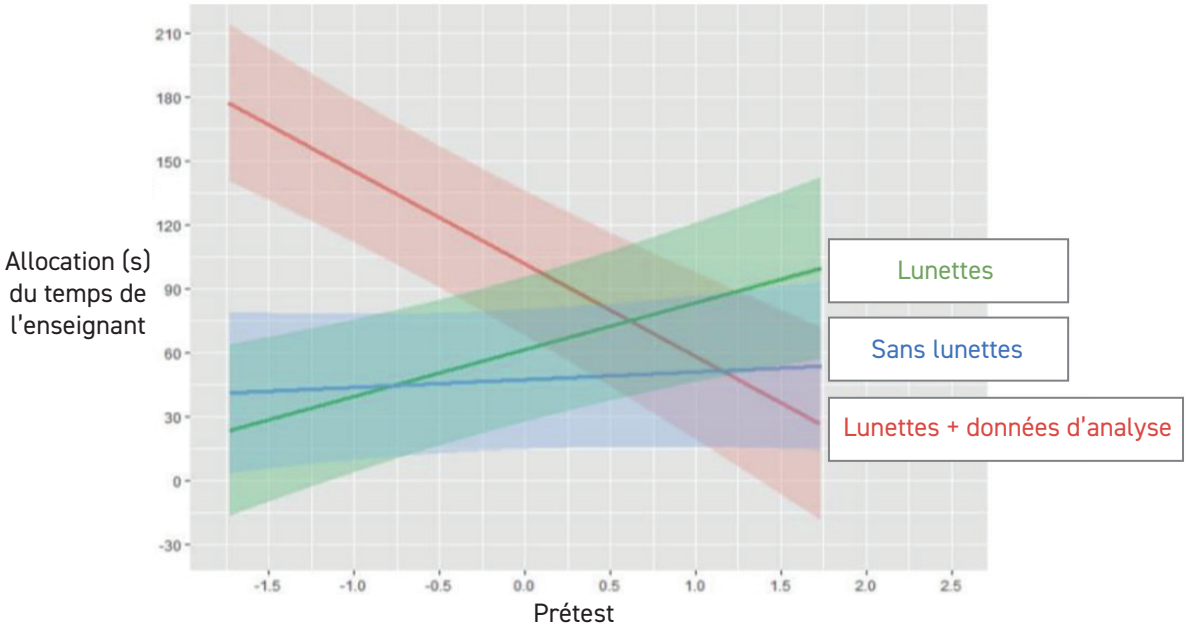
Graphique 5.5 Le tableau de bord d'un cours sur la logistique



Source: Do-Lenh et al. (2012[1]).

Une hypothèse plausible est que les tableaux de bord permettraient d'atteindre de meilleurs résultats d'apprentissage, en aidant les enseignants dans le suivi et l'intervention relatifs aux tâches et processus d'apprentissage qu'ils pourraient autrement ne pas voir. Pour l'instant, peu d'éléments permettent de confirmer cette hypothèse. Dans l'exemple précédent, Do-Lenh et al. (2012[1]) ont montré que l'utilisation du tableau de bord a effectivement permis d'atteindre des gains d'apprentissage plus élevés, mais comme il était conjugué à d'autres outils d'orchestration, ces résultats ne sont peut-être pas uniquement dus au seul tableau de bord. La recherche dans ce domaine est encore très récente. Schwendimann et al. (2017[30]) ont analysé 55 publications à ce sujet ; seules 15 d'entre elles comportaient une évaluation dans des environnements réels, la majorité s'appuyant sur des questionnaires à l'intention des enseignants ou des élèves. Seules quatre de ces études ont réellement mesuré les effets sur l'apprentissage. Une expérience auprès de 286 élèves de l'enseignement secondaire a donné des résultats très probants : Holstein, Mc Laren et Aleven (2018[2]) ont démontré que des tableaux de bord intégrés à des dispositifs de visualisation tête haute permettaient, en fait, une meilleure orchestration qui, à son tour, permettait d'obtenir de meilleurs résultats d'apprentissage chez les élèves se servant d'un système de tutorat intelligent en mathématiques. Il est intéressant d'examiner de plus près la relation entre l'existence d'un tableau de bord et l'augmentation des résultats d'apprentissage. Holstein, Mc Laren et Aleven (2019[31]) ont observé (Graphique 5.6) que l'utilisation des tableaux de bord a conduit les enseignants à modifier la répartition de leur temps et à accorder une plus grande attention aux élèves plus faibles, alors qu'ils faisaient l'inverse sans tableau de bord.

Graphique 5.6 L'utilisation du tableau de bord pour augmenter les gains d'apprentissage



Remarques : les enseignants ayant un tableau de bord qui s'affiche sur leurs lunettes (ligne rouge) accordent une plus grande attention visuelle (axe vertical) aux élèves en difficulté, c.-à-d. ceux ayant obtenu un faible score au prétest (extrémité gauche de l'axe horizontal), que les enseignants sans lunettes (groupe de contrôle) ou ayant des lunettes inactives (groupe placebo). Les parties ombrées indiquent les écarts-types.
Source: Holstein, McLaren et Aleven (2019[31]).

Diffusion des données

Une autre fonction d'orchestration prise en charge par les tableaux de bord et les analyses des données de la classe consiste à construire une activité avec les données issues d'une autre activité. Par exemple :

1. Au cours de la première activité, les équipes A et B inventent chacune un petit problème de maths. Dans l'activité suivante, A trouve la solution au problème de B et vice-versa. Le traitement des données consiste à faire tourner les énoncés de problèmes entre les équipes.

2. En premier lieu, les élèves sont invités à saisir le pays de naissance de leurs grands-parents. Dans l'activité suivante, l'enseignant montre une carte qui illustre le flux migratoire sur deux générations. Le traitement des données va agréger et visualiser les données individuelles.

3. Les apprenants prennent des photos de champignons au cours d'une promenade en forêt. Dans l'activité suivante, ils travaillent en équipe pour classifier l'ensemble des photos prises par la classe. Le traitement des données consiste à regrouper toutes les images, mais il pourrait également inclure l'annotation automatique des photos à l'aide de guides existants sur les champignons.

La liste d'exemples est infinie et n'est limitée que par l'imagination des enseignants. La fonction de « diffusion des données » correspond à une situation d'apprentissage au cours de laquelle une activité produit des objets (ou des données) qui sont traités par un opérateur pour enrichir une activité ultérieure. Pour les objets physiques, l'opérateur est physique : dans la première situation, les équipes A et B pouvaient simplement s'échanger une feuille de papier. Pour les objets numériques, Dillenbourg (2015[32]) a proposé une taxinomie de 26 opérateurs qui relient 2 activités d'apprentissage ou plus. Ce flux de données dans les activités, que l'on appelle le « flux de travail », favorise la mise en place de scénarios pédagogiques fouillés. Il peut également occasionner une forme de rigidité, par exemple dans le cas où une équipe décroche. Il s'agit de développer des flux de travail souples qui permettraient à l'enseignant de régler au fur et à mesure les événements qui émaillent inévitablement la vie de la classe.

Les deux sous-sections suivantes présentent deux cas bien précis de diffusion des données qui sont particulièrement pertinents pour l'orchestration en classe : la formation d'équipes et le bilan (*debriefing*).

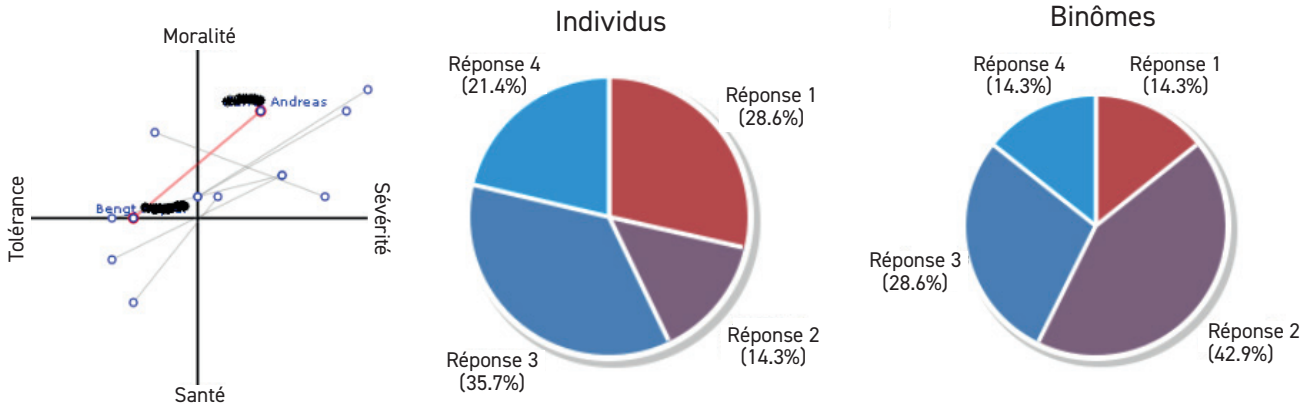
Formation d'équipes

Une fonction précise de l'analyse de la classe est de traiter les données produites par les élèves dans une activité afin de former des équipes dynamiques en vue d'une activité ultérieure. Un scénario pédagogique souvent testé qui étaye le conflit cognitif entre pairs illustre très bien cette fonction (Dillenbourg et Jermann, 2007[33]). Il s'inspire des théories socioconstructivistes qui prédisent que les interactions nécessaires pour surmonter un conflit cognitif améliorent l'apprentissage (Doise, Mugny et Perret-Clermont, 1975[34]). Dans la première activité, chaque étudiant répond à un questionnaire à choix multiple en ligne. Les réponses à ces questions ne sont ni bonnes ni mauvaises, mais reflètent différents points de vue. Pour chaque réponse, les étudiants doivent justifier leur choix en quelques mots. Dans la deuxième activité, le système génère un tableau de bord particulier, une carte d'opinions (Graphique 5.7, panneau de gauche) : chaque réponse de la première activité est associée à une valeur x, y sur la carte. L'enseignant discute de ce tableau de bord avec les étudiants, qui émettent souvent des commentaires sur leurs positions. Le système forme des binômes d'étudiants en fonction de la distance maximum qui les sépare sur la carte ; c'est-à-dire qu'il repère les étudiants dont les réponses révèlent des opinions contraires. Dans la troisième activité, on demande aux binômes de répondre de nouveau au questionnaire en ligne de la première activité. L'environnement leur fournit les réponses et justifications fournies individuellement. Dans la quatrième activité, l'enseignant utilise un autre tableau de bord (Graphique 5.7, panneau de droite) pour l'activité de bilan (debriefing) (Le bilan (debriefing)).

L'opérateur de données en jeu pour cette fonction est l'optimisation des différences au sein même des équipes. C'est également le cas dans l'exemple de Gijlers et De Jong (2005[35]) sur l'apprentissage à partir de simulations : ils ont formé des équipes d'individus qui ont antérieurement exprimé des hypothèses contraires afin de réduire le biais naturel consistant à concevoir des expériences qui confirment leurs propres hypothèses.

Dans un autre scénario pédagogique, on pourrait exploiter un opérateur qui minimise les différences entre les membres d'une équipe, c'est-à-dire composer des équipes d'apprenants qui ont commis la même erreur dans les exercices précédents. La formation de groupe est un exemple de diffusion des données dans lequel les données introduites dans une activité ne sont pas l'objet de l'activité, mais son organisation sociale.

Graphique 5.7 Utilisation de tableaux de bord pour former des équipes dynamiques



Remarques : Panneau de gauche : la carte représente les opinions des étudiants et les lignes indiquent de quelle façon les individus aux opinions contraires ont été jumelés. Panneau de droite : le diagramme circulaire indique comment les opinions changent entre les activités individuelles et les activités collaboratives, ce que l'enseignant exploite au moment du bilan.
Source: Dillenbourg et Jermann (2007[33]).

Le bilan (debriefing)

Le tableau de bord présenté dans le Graphique 5.5 comporte un outil (partie du bas) qui permet à l'enseignant de choisir deux implantations d'entrepôt par équipe et de les comparer en termes de capacité et de performance. Grâce à cela, l'enseignant peut faire un bilan des activités d'exploration de ses étudiants. Le bilan consiste à réfléchir sur ce qui a été fait afin d'en sortir les concepts ou les principes à retenir. En comparant les entrepôts, l'enseignant illustrera, par exemple, le compromis qui a été fait entre capacité et performance. Le tableau de bord à droite dans le Graphique 5.7 permet à l'enseignant d'inciter les élèves à expliquer pourquoi ils changent d'opinion entre les phases individuelles et collectives afin de relier plus tard leurs explications au débat scientifique.

Les activités de bilan sont une étape cruciale de l'orchestration dans les scénarios d'apprentissage constructivistes, reposant sur des activités de découverte ou de résolution de problèmes ouverts. Certains ont formulé des critiques à l'égard de ces approches, leur reprochant d'être non-productives en soi. Toutefois, Bransford et Schwartz (1998[36]) ou Kapur (2015[37]) ont montré que, si cette étape d'exploration est suivie d'un enseignement direct, le cours est en réalité plus efficace que l'inverse, c'est-à-dire si l'enseignement direct est suivi d'exercices d'application. La raison en est que, durant l'activité d'exploration, les apprenants s'écrient rarement « Eurêka ». Ils ont plus souvent une certaine intuition, des idées floues, à partir desquelles les concepts sont clarifiés ultérieurement. Ils se posent des questions qui orienteront le cours de l'enseignant. Comme Bransford et Schwartz (1998[36]) l'ont exprimé, il y a un « temps pour dire », mais cette étape d'enseignement doit se construire à partir de ce que les apprenants ont fait au cours de l'étape exploratoire. Il ne peut s'agir d'un cours normal déconnecté de leur expérience. Cette activité est très exigeante pour les enseignants, car elle suppose de l'improvisation. La fonction de « bilan » de l'analyse de la classe a pour but de faciliter cette tâche en collectant les trouvailles des apprenants, en les comparant, en les annotant, entre autres, et en facilitant leur exploitation par l'enseignant.

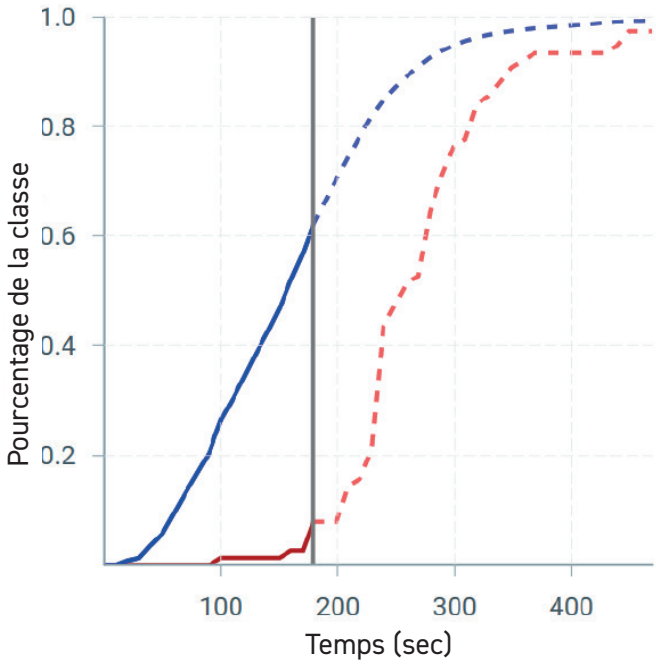
Transitions temporelles

L'orchestration de l'apprentissage dans la classe est un processus fortement contraint dans le temps. Les enseignants vérifient en permanence le temps de classe restant par rapport aux activités pédagogiques à réaliser. En outre, l'orchestration de scénarios d'apprentissage diversifiés est difficile quand il faut assurer la transition entre des activités impliquant ce que l'on appelle différents « niveaux sociaux » : activités individuelles, activités en équipe ou en classe entière. Le compromis auquel arrive l'enseignant, en général, est le suivant : il envisage de consacrer 15 minutes à un exercice individuel pour pratiquer une compétence, qui sera nécessaire à l'accomplissement de l'activité suivante en équipes. Au bout de 15 minutes, l'enseignant se rend compte que certains élèves n'ont pas terminé leur exercice. S'il décide néanmoins de commencer l'activité suivante, il pénalise les élèves en retard et leurs coéquipiers. S'il accorde cinq minutes de plus aux élèves en retard, il devra diminuer le temps prévu pour l'activité suivante et, de plus, il sera confronté à une majorité d'élèves qui perdront leur temps

et auront des interactions hors sujets. On retrouve ces mêmes contraintes quand, comme dans les exemples de la section Formation d'équipes, les réponses individuelles sont nécessaires pour pouvoir passer à la formation automatique d'équipes.

L'un des exemples de l'analyse des données de la classe qui traite de cette question est celui du « gain de prolongation de temps », c'est-à-dire le pourcentage d'élèves supplémentaires qui termineront l'activité si sa durée était prolongée d'une seule unité de temps. Sur le diagramme de progression présenté dans le Graphique 5.8, le « gain de prolongation de temps » correspond à la pente de la courbe (Faucon et al., 2020[38]). Lorsque la courbe s'aplatit, il faut passer à l'activité suivante. Ce diagramme a servi en temps réel pour orchestrer une série d'activités dans des cours en amphithéâtres. On attend des futurs tableaux de bord qu'ils fournissent davantage d'exemples d'outils de prédiction du temps similaires, ce qui aidera les enseignants à proposer des activités de courtes durées sans perdre de temps.

Graphique 5.8 Diagramme de l'évolution du gain de prolongation de temps



Remarques : lorsque les élèves sont impliqués dans une activité comportant des étapes multiples, ce tableau de bord affiche le pourcentage des élèves qui travaillent sur l'activité (en bleu) et le pourcentage de ceux qui ont terminé (en rouge). La barre verticale indique le moment ou cet instantané a été pris. Les lignes pleines à gauche reflètent les données observées tandis que les lignes en pointillés sur la droite sont les prédictions qui s'appuient sur les données collectées lors d'expériences antérieures. Dans cet exemple, l'enseignant peut passer à autre chose après environ 300 secondes, lorsqu'environ 95 % de la classe a terminé l'activité. Trois minutes supplémentaires (jusqu'à 480 secondes) permettraient virtuellement à tous les élèves de terminer l'activité, mais 95 % de la classe aurait perdu son temps.
Source: Faucon et al. (2020[38]).

L'autorégulation des enseignants

N'importe quel événement dans la classe peut fournir des données d'entrée pour l'analyse de la classe, c'est donc également le cas en ce qui concerne le comportement de l'enseignant. Jusqu'à maintenant, les analyses de l'apprentissage n'ont pas souvent intégré l'enseignant dans leur analyse puisqu'elles traitent des comportements dans un environnement d'apprentissage où l'enseignant a peu ou prou d'occasions d'intervenir. Au contraire, la modélisation des processus de la classe nécessite de modéliser le comportement de l'enseignant, car il joue un rôle important dans les processus d'enseignement et d'apprentissage : combien de fois l'enseignant parle-t-il, a-t-il accordé une attention verbale à tous les élèves, comment décide-t-il à qui il va poser une question, s'est-il promené dans la classe, son ton de voix varie-t-il ?

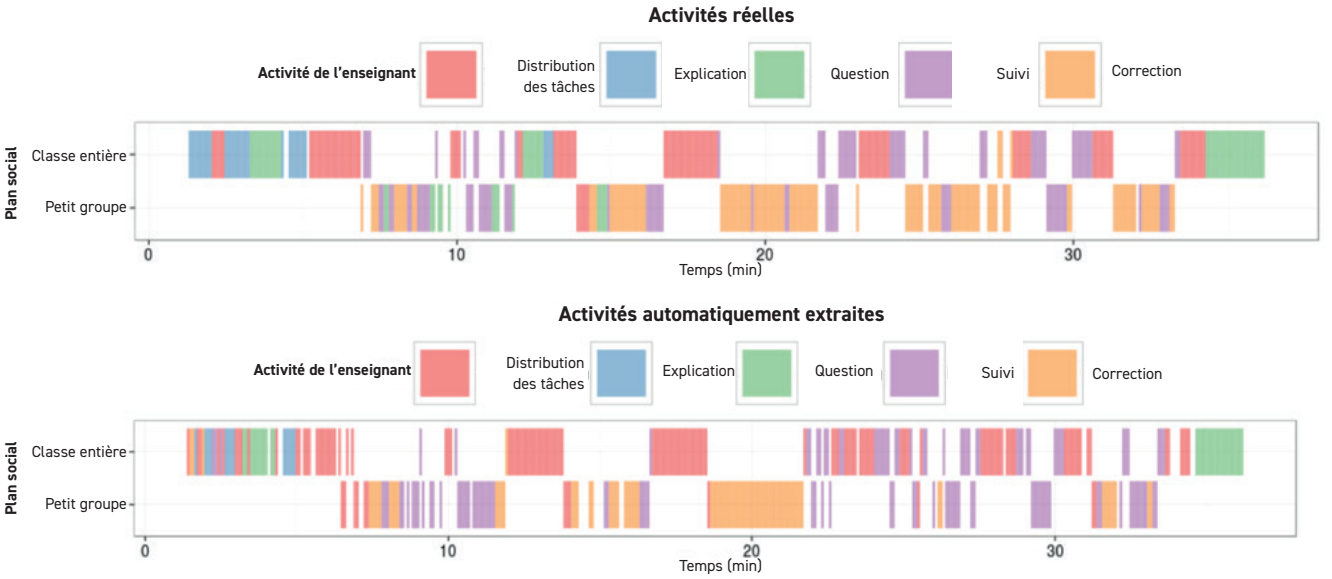
Par exemple, grâce à l'analyse des données de la classe, l'enseignant peut se rendre compte qu'il a parlé plus longtemps que prévu ou qu'il a négligé certains apprenants. Elle permet l'autorégulation en temps réel, ce que

Schön (2017[39]) appelle la « réflexion dans l'action », qui est exigeante sur le plan cognitif. Il est également (ou alternativement) possible d'obtenir une analyse des données de la classe plus perfectionnée une fois le cours terminé, et favoriser ainsi la « réflexion sur l'action », qui poussera l'enseignant à réfléchir ultérieurement afin d'améliorer son enseignement au fil de temps – une forme puissante de développement professionnel.

Prieto, Sharma et Dillenbourg (2015[40]) ont conjugué l'oculométrie à des questionnaires personnels pour estimer ce que le fardeau de l'orchestration représente pour les enseignants dans la classe. Ils ont constaté que ce fardeau s'alourdit dans les moments où les enseignants donnent des explications ou posent des questions à l'ensemble de la classe, souvent en regardant les visages des élèves pour tenter d'évaluer leur progrès et leur compréhension, ce qui confirme la pertinence des tableaux de bord qui fournissent une telle information. En revanche, ce fardeau a tendance à s'alléger lors des commentaires individuels ou en petits groupes, au cours desquels l'enseignant se concentre souvent sur les feuilles de travail ou les ordinateurs portables des élèves. En combinant des mesures de suivi oculaire avec des capteurs (électroencéphalogramme, accéléromètre, etc.), Prieto et al. (2016[41]) ont appliqué des méthodes d'apprentissage automatique (les algorithmes des forêts aléatoires et arbres de décision boostés par gradient) qui automatiquement caractérisent les activités en cours. Le cours reposait sur un diagramme d'orchestration composé uniquement de deux plans : activités de classe et en équipe. Dans le Graphique 5.9, la couleur représente l'activité de l'enseignant. L'algorithme a identifié le plan des interactions avec une précision de 90 %, mais a été moins précis, seulement 67 %, pour identifier l'activité de l'enseignant à partir de ces observations numériques.

À présent, tout outil d'observation conçu pour le développement professionnel des enseignants peut rapidement devenir un outil de contrôle ou d'évaluation de l'enseignant. Pour cette question d'éthique délicate, nous recommandons de s'en tenir au minimum (saisir uniquement l'information qui peut améliorer l'enseignement) et de faire confiance à la réglementation et à l'autorégulation des acteurs de l'éducation (montrer les données aux seuls enseignants et non aux chefs d'établissement, aux autres personnes de leur hiérarchie, aux parents et aux élèves).

Graphique 5.9 Diagramme de l'évolution du gain de prolongation de temps

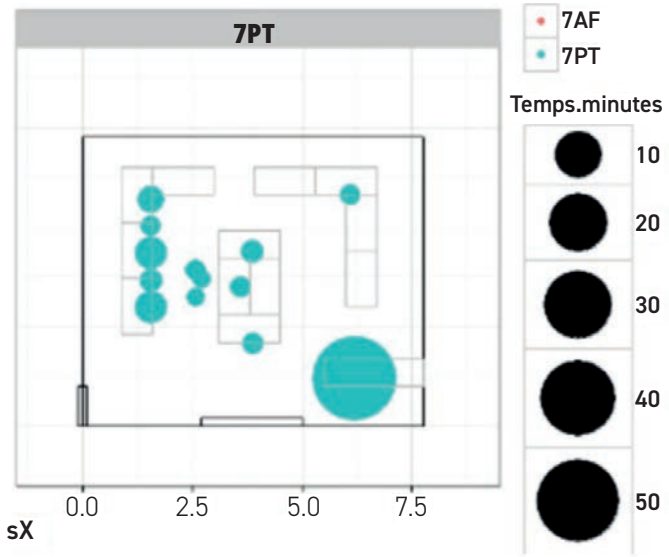


Remarque : ces diagrammes d'orchestration simplifiés représentent les activités exécutées réellement durant le cours (panneau du haut) et celles identifiées par l'algorithme d'analyse de l'enseignement (panneau du bas).
Source: Prieto et al. (2016[41]).

Comme pour l'analyse de l'apprentissage, l'analyse des données de la classe centrée sur l'enseignement est utile si elle permet aux enseignants de réfléchir sur leur pratique afin de l'améliorer. Dans une autre étude, Prieto et al. (2017[42]) ont montré aux enseignants leurs déplacements dans la classe. Un enseignant, dont les déplacements dans la classe durant le cours sont représentés dans le Graphique 5.10, s'est vraiment montré surpris de découvrir

qu'il avait négligé la partie droite de la classe et aidé principalement les tables de gauche et du milieu (quand il n'était pas à son bureau). Ce comportement n'est pas problématique en tant que tel : peut-être que les élèves de ces tables avaient besoin de plus d'aide que ceux de la partie droite de la salle. Toutefois, cela illustre bien comment l'analyse de la classe peut aider les enseignants à identifier certaines caractéristiques ou problématiques possibles dans leur pratique – par exemple, si l'analyse leur démontre qu'ils aident principalement les élèves qui sont plus forts plutôt que ceux qui ont des difficultés, qu'ils ignorent les filles pendant le cours de sciences, ou les élèves issus de minorités ou de milieux défavorisés, etc.

Graphique 5.10 Montrer aux enseignants leurs déplacements dans la classe



Source: Prieto et al. (2017[42]).

L'orchestration

L'analyse des données de la classe vise à faciliter l'orchestration des activités d'apprentissage, ce qui n'est pas une simple fonction, mais un concept d'ensemble qui se décline de multiples manières. Parmi ces fonctions, on en a décrit six dans les sous-sections précédentes. Fondamentalement, les analyses des données de la classe sont conçues pour donner aux enseignants les moyens de proposer des scénarios variés, comportant des activités individuelles, en classe et à l'échelle de la classe, avec ou sans outil numérique, et tenant compte de toutes les contraintes pratiques de la vie quotidienne en classe. À l'heure où de nombreux universitaires définissent le rôle de l'enseignant comme étant celui d'un facilitateur ou d'un guide accompagnateur, cette idée de donner aux enseignants les moyens de mieux orchestrer l'apprentissage dans leur salle de classe peut être perçue comme une provocation. Cependant, il ne s'agit pas d'augmenter le temps de cours ; il s'agit de les épauler dans le pilotage de leurs scénarios d'apprentissage enrichis, quelles qu'en soient leurs composantes réelles. La mise en place de scénarios d'apprentissage constructivistes avec 30 élèves demande à l'enseignant de se sentir à l'aise pour mettre en œuvre ces diverses activités pédagogiques qui les composent.

Les technologies peuvent y contribuer de nombreuses façons. Ou pas. Par exemple, une erreur typique est de, tout à coup, distribuer une tablette à chaque élève de la classe, au risque de détruire les habitudes d'orchestration établies par les enseignants. Que doivent faire les apprenants ? Comment l'enseignant peut-il obtenir leur attention ? La plupart des tentatives pour implanter massivement les technologies en éducation se sont soldées par un échec parce que la disponibilité du matériel ne suivait pas. Fournir aux enseignants des scénarios décrivant les activités d'apprentissages qui peuvent être accomplies à l'aide des technologies est essentiel. Il ne s'agit pas de proposer aux élèves une ou deux activités précises, mais des scénarios qui comportent plusieurs activités, avec ou sans technologie, et qui englobent toute la vie de la classe. Telle est la proposition éducative de l'analyse des données de la classe – une nouvelle façon de donner les moyens aux enseignants d'agir dans leur classe.

Perspectives

Ce chapitre présente une autre vision selon laquelle on peut considérer la future salle de classe comme un système numérique. C'est pourquoi le mot « numériclasse » décrit bien un tel système numérique qui saisit et soutient les processus de classe. C'est un concept pour les années à venir. Les salles de classe ne sont pas encore des systèmes numériques, et très peu de systèmes d'analyses de la classe pourraient être qualifiés de « numériclasse ». Le chapitre a développé un langage graphique pour modéliser les scénarios pédagogiques intégrés, des « graphiques d'orchestration » (Dillenbourg, 2015[32]), première étape vers la modélisation des flux de données nécessaires à l'orchestration de la classe.

Reprenons l'exemple de la voiture – ou peut-être l'idée de la « maison connectée », les salles de classe des établissements scolaires pourraient ressembler beaucoup à ce qu'elles sont aujourd'hui, mais elles pourraient être équipées de capteurs produisant des données pour l'analyse de l'apprentissage et des outils numériques qui non seulement permettraient aux enseignants d'orchestrer de fructueux scénarios pédagogiques en classe, mais leur fourniraient également des retours d'information sur leur enseignement en temps réel ainsi que des éléments de réflexion pour l'améliorer, et, par conséquent, faire progresser les résultats d'apprentissage des élèves. Pour que ce nouveau modèle scolaire émerge, il faut poursuivre la recherche et le développement sur l'analyse de la classe et avoir une meilleure compréhension des types de tableaux de bord qui pourraient rendre l'affichage d'information encore plus utile aux enseignants. Il faudra également s'occuper des questions d'éthique et de confidentialité que ces avancées pourraient soulever.

Cette vision a, toutefois, plusieurs implications immédiates.

En premier lieu, elle se veut un outil de réflexion pour les décideurs politiques lors de la conception ou de l'évaluation des projets éducatifs. Ceux-ci devraient privilégier des projets qui ne misent pas sur une seule approche pédagogique ou une seule technologie. Plutôt que de favoriser des projets centrés, par exemple, sur le travail d'équipe et qui négligent la pratique individuelle, ils devraient soutenir des projets qui englobent des activités individuelles, des activités d'équipe et en classe entière dans des scénarios pédagogiques cohérents. Ce n'est pas la seule technologie qui définit les bons projets de développement, comme « la réalité virtuelle pour X » ou les « imprimantes 3D pour Y ». Croire que les technologies ont des effets intrinsèques s'est révélé faux à plusieurs reprises. Un établissement scolaire ou un projet de recherche prometteur en éducation doit être défini par des objectifs pédagogiques qui articulent la séquence nécessaire des activités en classe, quelle que soit la technologie qui soutient ces activités et leur orchestration à ce stade. Les technologies peuvent contribuer à l'apprentissage individuel, mais elles peuvent également aider et habiliter les enseignants à concevoir des scénarios pédagogiques mixtes, avec des activités sans aucune technologie, des activités réalisées avec ou sans technologie, ou des activités entièrement numériques. Tous ces scénarios sont possibles, et aucun n'est intrinsèquement meilleur que les autres.

En deuxième lieu, cette proposition suppose que la configuration des technologies pédagogiques incorpore ces fonctions d'orchestration de la classe. Les établissements n'exploiteront pleinement le potentiel des technologies numériques que si les enseignants se sentent habilités à les utiliser et à l'aise pour le faire. Ce n'est pas près d'arriver, mais les technologies pourraient y aider. À l'heure actuelle, la concurrence entre différents outils caractérise le marché des technologies éducatives (EdTech), alors que pour bâtir des écosystèmes numériques – et un marché EdTech durable – il faudrait plutôt intégrer ces outils numériques.

En troisième lieu, tous les programmes de formation des enseignants devraient offrir des cours sur les technologies d'apprentissage numériques. Aujourd'hui, ils n'offrent souvent qu'un ou deux cours à ce sujet, alors que les technologies numériques peuvent et doivent soutenir tout type d'enseignement.

Finalement, les décideurs politiques et autres acteurs de l'éducation doivent s'occuper des questions de réglementation et d'éthique en matière d'analyse des données de la classe. Tout ce qui peut être fait dans un cadre réglementaire n'est pas forcément souhaitable. Il faudrait davantage de collaboration entre chercheurs dans le domaine de l'apprentissage et celui de la protection des données pour encadrer la réglementation et les pratiques éthiques.

Il faudra du temps pour que les technologies pédagogiques et l'analyse des données de la classe arrivent à maturité. Mais nous pourrions voir la lumière au bout du tunnel beaucoup plus tôt qu'on ne le pense.

Remerciements

Les technologies présentées dans ce chapitre ont été développées par des membres, anciens ou actuels, du labo : Jennifer Olsen, Patrick Jermann, Stian Haklev, Louis Faucon, Luis Prieto Santos, Son Do Lenh, Sébastien Cuendet, Guillaume Zufferey, Hamed Alavi, Khaled Bachour et Fredéric Kaplan. L'essor d'une communauté de recherche sur l'orchestration a bénéficié des interactions avec Frank Fischer, Miguel Nussbaum, Yannis Dimitriadis, Manu Kapur, Nikol Rummel, Vincent Aleven et Chee Kit Looi. L'auteur désire également remercier les collègues qui ont revu ce chapitre (Ryan Baker et Stéphan Vincent-Lancrin).

Références

Ahuja, K., D. Kim, F. Xhakaj, V. Varga, A. Xie, S. Zhang, J.E. Townsend, C. Harrison, A. Ogan et Y. Agarwal (2019), « EduSense », *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 3/3, pp. 1-26, http://dx.doi.org/10.1145/3351229. [18]

Alavi, H. et P. Dillenbourg (2012), « An Ambient Awareness Tool for Supporting Supervised Collaborative Problem Solving », *IEEE Transactions on Learning Technologies*, Vol. 5/3, pp. 264-274, http://dx.doi.org/10.1109/tlt.2012.7. [24]

Alcoholado, C., N. Nussbaum, A. Tagle, F. Gomez, F. Denardin, H. Susaeta, M. Villalta et K. Toyama (2012), « One Mouse per Child: interpersonal computer for individual arithmetic practice », *Journal of Computer Assisted Learning*, Vol. 28/4, pp. 295-309, http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2729.2011.00438.x. [16]

Bachour, K., F. Kaplan et P. Dillenbourg (2010), « An Interactive Table for Supporting Participation Balance in Face-to-Face Collaborative Learning », *IEEE Transactions on Learning Technologies*, Vol. 3/3, pp. 203-213, http://dx.doi.org/10.1109/tlt.2010.18. [28]

Bakharia, A., K. Kitto, A. Pardo, D. Gašević et S. Dawson (2016), « Recipe for success », *Proceedings of the Sixth International Conference on Learning Analytics & Knowledge - LAK '16*, http://dx.doi.org/10.1145/2883851.2883882. [12]

Bloom, B. (1968), « Learning for mastery: Instruction and curriculum », *Regional Education Laboratory for the Carolinas and Virginia. Topical Papers and Reprints.*, Vol. 1, https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED053419.pdf. [5]

Cuendet, S., J. Dehler-Zufferey, G. Ortoleva et P. Dillenbourg (2015), « An integrated way of using a tangible user interface in a classroom », *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*, Vol. 10/2, pp. 183-208, http://dx.doi.org/10.1007/s11412-015-9213-3. [13]

D'Mello, S., B. Lehman, R. Pekrun et A. Graesser (2014), « Confusion can be beneficial for learning », *Learning and Instruction*, Vol. 29, pp. 153-170, http://dx.doi.org/10.1016/j.learninstruc.2012.05.003. [22]

Dillenbourg, P. (2015), *Orchestration Graphs*, EPFL. [32]

Dillenbourg, P. (2013), « Design for classroom orchestration », *Computers & Education*, Vol. 69, pp. 485-492, http://dx.doi.org/10.1016/j.compedu.2013.04.013. [14]

Dillenbourg, P., S. Järvelä et F. Fischer (2009), « The Evolution of Research on Computer-Supported Collaborative Learning », dans *Technology-Enhanced Learning,* Springer Netherlands, Dordrecht, http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-9827-7_1. [7]

Dillenbourg, P. et P. Jermann (2007), « Designing Integrative Scripts », in *Scripting Computer-Supported Collaborative Learning*, Springer US, Boston, MA, http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-36949-5_16. [33]

Dillenbourg, P., G. Zufferey, H. Alavi, P. Jermann, S. Do-Lenh et Q. Bonnard (2011), *Classroom orchestration: The third circle of usability.,* Proceedings of the 9th Computer-Supported Collaborative Learning Conference, Hong-Kong. July 4-8, 2011. [27]

Doise, W., G. Mugny et A. Perret-Clermont (1975), « Social interaction and the development of cognitive operations », *European Journal of Social Psychology*, Vol. 5/3, pp. 367-383, http://dx.doi.org/10.1002/ejsp.2420050309. [34]

Do-Lenh, S., P. Jermann, A. Legge, G. Zufferey et P. Dillenbourg (2012), « TinkerLamp 2.0: Designing and Evaluating Orchestration Technologies for the Classroom », in *Lecture Notes in Computer Science, 21st Century Learning for 21st Century Skills,* Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-33263-0_6. [1]

Duval, E. (2001), « Metadata standards: What, who & why », *Journal of Universal Computer Science*, Vol. 7/7, pp. 591-601. [9]

Fagen, A., C. Crouch et E. Mazur (2002), « Peer Instruction: Results from a Range of Classrooms », *The Physics Teacher,* Vol. 40/4, pp. 206-209, http://dx.doi.org/10.1119/1.1474140. [15]

Faucon, L., J.K. Olsen, S. Haklev et P. Dillenbourg (2020), « Real-Time Prediction of Students' Activity Progress and Completion Rates », *Journal of Learning Analytics,* Vol. 7/2, pp. 18-44, http://dx.doi.org/10.18608/jla.2020.72.2. [38]

Gellersen, H., A. Schmidt et M. Beigl (1999), « Ambient media for peripheral information display », *Personal Technologies,* Vol. 3/4, pp. 199-208, http://dx.doi.org/10.1007/bf01540553. [26]

Gijlers, H. et T. de Jong (2005), *Confronting ideas in collaborative scientific discovery learning,* Paper presented at AERA 2005. [35]

Holstein, K., G. Hong, M. Tegene, B. McLaren et V. Aleven (2018), « The classroom as a dashboard », P*roceedings of the 8th International Conference on Learning Analytics and Knowledge*, http://dx.doi.org/10.1145/3170358.3170377. [23]

Holstein, K., B. McLaren et V. Aleven (2019), « Co-Designing a Real-Time Classroom Orchestration Tool to Support Teacher–AI Complementarity », *Journal of Learning Analytics*, Vol. 6/2, http://dx.doi.org/10.18608/jla.2019.62.3. [31]

Holstein, K., B. McLaren et V. Aleven (2018), « Student Learning Benefits of a Mixed-Reality Teacher Awareness Tool in AI-Enhanced Classrooms », dans *Lecture Notes in Computer Science, Artificial Intelligence in Education,* Springer International Publishing, Cham, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-93843-1_12. [2]

Holstein, K., B. McLaren et V. Aleven (2017), « SPACLE », *Proceedings of the Seventh International Learning Analytics & Knowledge Conference*, http://dx.doi.org/10.1145/3027385.3027450. [3]

Kapur, M. (2015), « The preparatory effects of problem solving versus problem posing on learning from instruction », *Learning and Instruction,* Vol. 39, pp. 23-31, http://dx.doi.org/10.1016/j.learninstruc.2015.05.004. [37]

Lin, C. et M. Chi (2016), « Intervention-BKT: Incorporating Instructional Interventions into Bayesian Knowledge Tracing », dans *Intelligent Tutoring Systems, Lecture Notes in Computer Science,* Springer International Publishing, Cham, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-39583-8_20. [21]

Mangaroska, K., B. Vesin et M. Giannakos (2019), « Cross-Platform Analytics », *Proceedings of the 9th International Conference on Learning Analytics & Knowledge*, http://dx.doi.org/10.1145/3303772.3303825. [11]

Moher, T., J. Wiley, A. Jaeger, B. Lopez Silva, F. Novellis et D. Lyman Kilb (2010), « Spatial and temporal embedding for science inquiry: An empirical study of student learning », *Proceedings of the 9th International Conference of the Learning Sciences,* Vol. 1, pp. 826-833. [29]

Ochoa, X. et M. Worsley (2016), « Editorial: Augmenting Learning Analytics with Multimodal Sensory Data », *Journal of Learning Analytics,* Vol. 3/2, pp. 213-219, http://dx.doi.org/10.18608/jla.2016.32.10. [17]

Papert, S. (1987), « Microworlds: Transforming education », *Artificial Intelligence and Education*, Vol. 1: Learning Environments and Systems, pp. 79-94. [6]

Prieto, L., P. Magnuson, P. Dillenbourg et M. Saar (2017), *Reflection for Action: Designing Tools to Support Teacher Reflection on Everyday Evidence,* Center for Open Science, http://dx.doi.org/10.31219/osf.io/bj2rp. [42]

Prieto, L., K. Sharma et P. Dillenbourg (2015), « Studying Teacher Orchestration Load in Technology-Enhanced Classrooms », dans *Design for Teaching and Learning in a Networked World, Lecture Notes in Computer Science*, Springer International Publishing, Cham, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-24258-3_20. [40]

Prieto, L., K. Sharma, P. Dillenbourg et M. Jesús (2016), « Teaching analytics », *Proceedings of the Sixth International Conference on Learning Analytics & Knowledge - LAK '16*, http://dx.doi.org/10.1145/2883851.2883927. [41]

Raca, M., L. Kidzinski et P. Dillenbourg (2015), *Translating head motion into attention-towards processing of student's body language*, Proceedings of the 8th International Conference on Educational Data Mining, https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED560534.pdf. [20]

Santos, P. (2012), *Supporting orchestration of blended CSCL scenarios in distributed learning environments,* Doctoral dissertation - Universidad de Valladolid, http://dx.doi.org/10.35376/10324/1794. [4]

Schön, D. (2017), *The Reflective Practitioner: How Professionals Think In Action.,* Routledge. [39]

Schwartz, D. et J. Bransford (1998), « A time for telling », *Cognition and Instruction,* Vol. 16/4, pp. 475-522, http://www.jstor.org/stable/3233709. [36]

Schwendimann, B., M. Jesús, A. Vozniuk, L. Prieto, M. Shrivani Boroujeni, A. Holzer, D. Gillet et P. Dillenbourg (2017), « Perceiving Learning at a Glance: A Systematic Literature Review of Learning Dashboard Research », *IEEE Transactions on Learning Technologies*, Vol. 10/1, pp. 30-41, http://dx.doi.org/10.1109/tlt.2016.2599522. [30]

Severance, C., T. Hanss et J. Hardin (2010), « Ims learning tools interoperability: Enabling a mash-up approach to teaching and learning tools », Technology, *Instruction, Cognition and Learning,* Vol. 7/3-4, pp. 245-262. [10]

Tomitsch, M., T. Grechenig et S. Mayrhofer (2007), « Mobility and emotional distance: exploring the ceiling as an ambient display to provide remote awareness », *3rd IET International Conference on Intelligent Environments (IE 07),* http://dx.doi.org/10.1049/cp:20070362. [25]

Vygotsky, L. (1964), « Thought and language », *Bulletin of the Orton Society,* Vol. 14/1, pp. 97-98, http://dx.doi.org/10.1007/bf02928399. [8]

Yang,D., A. Alsadoon, P.W.C. Prasad, A.K. Singh et A. Elchouemic (2018), « An Emotion Recognition Model Based on Facial Recognition in Virtual Learning Environment », *Procedia Computer Science*, Vol. 125, pp. 2-10, http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2017.12.003. [19]

6 Mieux aider les élèves ayant des besoins spécifiques : L'apport des technologies

Judith Good
Université d'Amsterdam, Pays-Bas. Anciennement de l'Université du Sussex, Royaume-Uni

Ce chapitre examine comment les technologies peuvent soutenir les élèves ayant des besoins spécifiques d'éducation. Les technologies peuvent aussi bien faciliter l'accès des élèves handicapés aux programmes d'enseignement que leur fournir un soutien bien ciblé afin qu'ils puissent s'intégrer à des environnements scolaires inclusifs. Ce chapitre s'attache à démontrer qu'il est essentiel d'aider les élèves ayant des besoins spécifiques et décrit comment les technologies peuvent répondre à une variété de ces besoins. Il se penche ensuite sur trois technologies de pointe qui visent à : 1) soutenir le développement des compétences sociales des enfants autistes, 2) diagnostiquer et accompagner les élèves atteints de dysgraphie et 3) donner accès à du matériel graphique aux élèves non-voyants et malvoyants. Les exemples dans ce chapitre illustrent l'importance d'impliquer les élèves et les parties prenantes dans l'élaboration de solutions et qu'il est impératif que les développeurs considèrent l'accessibilité comme un élément essentiel de leur développement.

Introduction

L'aide qu'apportent les technologies aux élèves ayant des besoins spécifiques est largement reconnue, l'efficacité de plateformes matérielles comme les dispositifs mobiles (Chelkowski, Yan et Asaro-Saddler, 2019[1] ; Ok et Kim, 2017[2]), ainsi que les nombreux logiciels et applications spécialisés n'est plus à démontrer. Les technologies éducatives sont susceptibles de jouer un rôle de plus en plus significatif auprès des élèves ayant des besoins spécifiques, et on demande aux professionnels de l'éducation qu'ils se tiennent au courant des développements des technologies afin de prendre des décisions éclairées sur l'emploi de ces technologies en classe (McLeskey et al., 2017[3]).

Il est toutefois intéressant de noter que, malgré la pléthore de technologies éducatives adaptées à des besoins spécifiques - voir p. ex., (Cheng et Lai, 2020[4] ; Erdem, 2017[5]), peu d'entre elles sont jugées « intelligentes ». La question de l'intelligence artificielle (IA) et de l'éducation fait l'objet de recherches considérables depuis très longtemps [pour les récentes études, voir (Alkhatlan et Kalita, 2018[6] ; Chen, Chen et Lin, 2020[7]), et l'efficacité des systèmes de tutorat intelligents a été clairement démontrée bien au-delà des autres formes d'apprentissage assisté par ordinateur (Kulik et Fletcher, 2016[8]). Pourtant, les systèmes d'IA spécialement conçus pour les élèves ayant des besoins spécifiques font défaut. En vérité, un examen des articles publiés dans *l'International Journal of Artificial Intelligence in Education* dans les cinq dernières années n'a pas permis d'en trouver un seul qui traitait de l'inclusion, l'accessibilité ou les besoins spécifiques d'éducation. Comme le remarquent Kazimzade et al. (2019[9]), bien que les technologies éducatives adaptées et l'inclusion, au sens le plus large du terme, sont deux considérations essentielles dans le paysage éducatif actuel, elles se croisent plus rarement qu'on ne le pense.

Il est difficile d'expliquer pourquoi il y a si peu de chevauchement entre ces deux domaines. En ce qui concerne l'offre éducative pour les enfants ayant des besoins spécifiques, l'Organisation mondiale de la santé (2011[10]) a souligné la nécessité d'adopter des approches davantage centrées sur l'apprenant, qui reconnaissent les différences dans la façon dont les humains apprennent et qui sont à même de s'adapter de manière souple aux apprenants individuels. Ce chapitre est donc une occasion idéale d'examiner comment on peut développer et adapter les méthodes et approches déjà existantes ainsi que celles en pleine émergence, dans le domaine de l'IA et de l'éducation, afin qu'elles accompagnent les enfants ayant des besoins spécifiques.

Le potentiel des technologies intelligentes configurées pour servir et aider les élèves ayant des besoins spécifiques est particulièrement significatif à l'aune de l'augmentation probable des élèves ayant de tels besoins. En 2000, l'OCDE a estimé que, à un moment donné au cours de leur scolarité, environ 15 à 20 % de jeunes seraient considérés comme ayant des besoins spécifiques d'éducation (OECD, 2000[11]). Vingt ans plus tard, ce chiffre risque d'être plus élevé, étant donné que la reconnaissance du handicap chez les enfants a augmenté constamment, année après année (Houtrow et al., 2014[12]). Bien que le taux de handicaps physiques ait baissé au fil du temps, celui des troubles du développement a, quant à lui, fortement augmenté (Zablotsky et al., 2019[13]), et on estime aujourd'hui que ce dernier touche 17,8 % des enfants aux États-Unis (Zablotsky et Black, 2020[14]).

Le changement des définitions de ce qui constitue un handicap particulier (dans le cas de l'autisme, Volkmar et McPartland (2014[15]) présentent un tableau détaillé de l'évolution des conceptualisations depuis sa description officielle en 1943) ainsi que l'amélioration de l'accès aux services de diagnostic figurent parmi les multiples raisons de cette augmentation. L'étude approfondie de ces phénomènes dépasse le cadre de ce chapitre, toutefois, deux points sont particulièrement importants. Tout d'abord, le fait qu'un enfant sur six aujourd'hui présente un trouble du développement signifie fort probablement que toute classe ordinaire comptera au moins un élève, voire plus, qui nécessitera des ressources supplémentaires pour l'accompagner dans son apprentissage. Ensuite, la hausse constante des taux de diagnostic pourrait se poursuivre à mesure que nous découvrons de nouvelles formes de handicaps et que nous devenons plus précis dans l'identification de ceux que nous connaissons déjà, ce qui ne fait qu'accroître davantage le nombre d'enfants qui auront besoin d'un soutien supplémentaire.

Dans un contexte éducatif, les enfants handicapés sont désavantagés par rapport à leurs condisciples au développement typique. Selon l'Organisation mondiale de la santé (2011, p. 208[10]), « [Aussi,] malgré les progrès enregistrés ces dernières décennies, les enfants et les jeunes handicapés sont-ils moins susceptibles d'entamer une scolarité ou de la poursuivre que les autres enfants. Leur taux de passage en classe supérieure est également plus faible », et la tendance se poursuit (UNESCO Institute for Statistics, 2018[16]). Cette situation entraîne des effets négatifs à long terme sur l'avenir des enfants, risquant de freiner leur intégration dans la société et d'assombrir leurs perspectives de carrière. Par exemple, au Royaume-Uni, seuls 16 % des adultes autistes ont des emplois salariés à temps plein, alors qu'ils sont 77 % à avoir exprimé le désir de travailler (National Autistic Society, 2016[17]). En outre, dans la petite minorité qui travaille, ils sont plus de la moitié à estimer que leur emploi ne fait pas appel aux compétences qu'ils possèdent réellement.

Enfin, il faut prendre sérieusement en considération que, en raison de ce taux croissant de besoins de développement, le soutien aux élèves ayant des besoins spécifiques recoupe de plus en plus l'objectif global de l'équité. Le développement des technologies qui permettent de diagnostiquer et de traiter les troubles des élèves (par exemple, la dyslexie, la dysgraphie, la dyscalculie, des déficiences auditives ou visuelles) facilitera la réduction des écarts en matière de rendement et permettra d'améliorer les résultats d'apprentissage dans les pays.

Dans ce chapitre, nous examinons l'avenir proche du développement des technologies « intelligentes » adaptées aux élèves ayant des besoins spécifiques, en nous attardant sur trois études de cas et en tirant des conclusions utiles aux travaux futurs. Mais tout d'abord, intéressons-nous en détail aux définitions de handicap et de besoins spécifiques, ainsi qu'à leur relation avec l'éducation et les technologies.

Sciences de l'éducation, technologies et besoins spécifiques

De manière générale, par soutien aux élèves ayant des besoins spécifiques dans un environnement pédagogique, on entend le soutien dont un élève handicapé peut bénéficier en raison de besoins qui sont différents de ceux de ses condisciples ayant un développement typique (voir l'Encadré 6.1 pour la terminologie). Fournir une aide efficace à un élève ayant des besoins spécifiques est compliqué et demande une réflexion et une planification méticuleuses. Les besoins des élèves évoluent au fil du temps en raison de divers facteurs (leur trajectoire individuelle de

développement, le soutien antérieur, etc.). Leurs besoins peuvent diminuer ou augmenter, ce qui demande de les réévaluer constamment afin de savoir ce qui leur convient à tout moment. La co-morbidité, c'est-à-dire avoir plus qu'un handicap (aussi qualifiée de « multimorbidité » selon la source), est un autre facteur de complication.

Encadré 6.1 Besoins spécifiques et handicap : définitions

Il n'y a pas d'unanimité en termes de définition du handicap ou des besoins spécifiques et, de plus, la relation entre les deux n'est pas toujours évidente. Les définitions varient selon les pays, et sont catégorisées et classifiées de différentes façons. Les processus de diagnostic et les parcours varient également, tant au sein d'un même pays qu'entre les pays, et évoluent dans le temps. Toutefois, il est crucial d'avoir une compréhension élémentaire des différents points de vue concernant la nature du handicap, car ils ont de sérieuses conséquences sur l'apprentissage et l'éducation.

Notre compréhension du handicap évolue et se développe, tout comme la terminologie utilisée pour le décrire, ce qui a donné lieu à différents modèles de handicaps (Marks, 1997[18]). Les modèles classiques, comme le modèle médical, se focalisent sur la « déficience », et situent l'origine de cette déficience au niveau de l'individu, souvent dans le but d'essayer de trouver un « traitement ». En revanche, les modèles sociaux s'intéressent à l'intersection entre les individus et leurs environnements et, particulièrement, à la façon dont un environnement spécifique peut occasionner une déficience. Par exemple, dans le modèle médical, un usager en fauteuil roulant serait vu comme ayant une déficience prima facie, alors que dans le modèle social, on considérerait que la déficience provient du fait qu'un bâtiment donné n'a pas de rampe ou d'ascenseur, plutôt que d'être une caractéristique intrinsèque de l'individu.

En outre, certains mots ont une connotation négative comme le mot anglais pour handicapé, « *disabled* », qui sous-entend que la plupart des individus sont capables, « abled ». Il peut en résulter une stigmatisation et une exclusion (Sayce, 1998[19]). Les partisans du mot « *neurodiversité* » – à l'origine créé par Singer (1999[20]) – en référence à l'autisme, mais usité plus largement aujourd'hui pour toutes sortes de conditions, notamment le trouble du déficit de l'attention avec hyperactivité (TDAH) et la dyslexie, estiment que ces conditions sont des variations neurologiques qui ont à la fois des aspects positifs et négatifs. Ils rejettent les tentatives de « normalisation » et plaident plutôt en faveur d'une meilleure compréhension de ces différentes façons d'être dans le monde et d'y interagir.

Il est important de reconnaître les tensions inhérentes à ces différents points de vue sur la déficience, et la manière dont elles façonnent nos perspectives sur les types d'accompagnement nécessaires ainsi que les types de technologies qui en découlent.

Les ressources supplémentaires que nécessite ce soutien peuvent prendre différentes formes, financières, humaines (p. ex., des enseignants supplémentaires), ou matérielles. Ce chapitre s'intéresse tout particulièrement à ce dernier type de ressources, et examine comment les technologies, et les technologies intelligentes en particulier, contribuent à soutenir les élèves ayant des besoins supplémentaires.

On pourrait catégoriser davantage ce soutien de bien des façons, mais il peut être plus utile de s'intéresser à *l'objectif* de ce type de soutien sur un continuum. À une extrémité se trouvent les technologies configurées pour faciliter l'accès aux programmes d'enseignement et permettre aux élèves ayant un handicap de participer à des activités d'apprentissage dans une salle de classe ordinaire. Dans ce cas, grâce à ces technologies, les élèves accèdent au même contenu d'enseignement que leurs condisciples ayant un développement typique. À titre d'exemple, en fournissant aux élèves aveugles ou malvoyants des technologies qui ont des capacités de reconnaissance vocale, on leur donne accès (du moins en partie) à des matériels d'enseignement utilisés par leurs camarades, ce qui rend leur apprentissage plus facile dans un environnement scolaire inclusif.

À l'autre extrémité du continuum se trouvent les technologies configurées pour aborder les questions liées au handicap de l'enfant et pour lui fournir l'encadrement adéquat. Dans ce cas, le contenu de l'intervention ne fait généralement pas partie du cadre du programme d'enseignement. Les interventions conçues pour encadrer le développement des compétences sociales et de communications des élèves autistes sont un exemple de ce type de technologie. Les technologies qui se situent à cette extrémité du continuum sont davantage controversées : comme mentionné plus haut, les différents points de vue sur le handicap peuvent susciter des débats sur les types d'interventions et de technologies qui conviendront le mieux aux élèves handicapés. Ces points de vue sont souvent implicites, mais ils n'en sont pas moins à l'origine du développement de la technologie éducative, et ont une influence sur les décisions quant aux types de soutien qui conviennent et pourquoi.

Une récente étude sur les technologies pour les enfants autistes a observé qu'une grande part des technologies sont centrées sur le développement des aptitudes sociales (Spiel et al., 2019[21]), ce qui sous-entend que c'est le domaine qui préoccupe le plus parents et professionnels de l'éducation (même si ce n'est pas forcément le cas). Les auteurs soutiennent que bon nombre de ces technologies exigent des enfants qu'ils

> *« apprennent les modes d'interaction jugés adéquats par les adultes neurotypiques sans que les adultes aient à apprendre comment les enfants autistes pourraient vouloir s'impliquer… » (Spiel et al., 2019, p. 18[21]).*

En même temps, les auteurs reconnaissent que l'acquisition de telles compétences permettrait à l'enfant autiste de développer des stratégies pour affronter un monde neurotypique. Il se peut que l'amélioration des capacités d'adaptation entraîne, à son tour, un mieux-être mental, ce qui, en effet, semble être le cas : les interventions ciblant les compétences sociales réduisent à la fois la dépression et l'anxiété (Rumney et MacMahon, 2017[22]).

Finalement, il faut prendre note que de nombreuses technologies configurées à l'origine pour fournir un soutien à l'enfant handicapé dans certains aspects spécifiques pourraient bien avoir l'effet secondaire d'améliorer l'accès aux programmes d'enseignement classique. Ainsi, le fait d'offrir du soutien aux élèves autistes pour qu'ils améliorent leurs compétences sociales et de communication (encadrement de besoins spécifiques) pourrait faciliter leur participation à des activités du programme qui demandent du travail de groupe et de la collaboration (accès aux programmes d'enseignement). De même, les technologies configurées pour aider les enfants atteints de TDAH à acquérir des compétences d'autorégulation, telles que celles décrites dans l'Encadré 6.2 (les technologies en renfort), pourraient bien leur permettre de s'intéresser à un plus grand nombre de sujets enseignés ou de les approfondir.

Exemples d'approches des technologies intelligentes axées sur l'apprenant

Comment les technologies peuvent-elles favoriser des démarches centrées sur l'apprenant qui soient souples et adaptables pour les enfants ayant des besoins spécifiques (World Health Organization, 2011[10]) ? Dans cette section, nous décrivons trois démarches de ce type qui s'intéressent à l'autisme, la dysgraphie et la déficience visuelle respectivement.

L'environnement ECHOES

ECHOES (Porayska-Pomsta et al., 2018[27]) est un environnement d'apprentissage amélioré par la technologie destiné à aider les enfants autistes à explorer et à acquérir des compétences en communication sociale grâce à une série d'activités d'apprentissage ludiques, certaines d'entre elles mettant en scène un personnage virtuel avec lequel l'enfant peut interagir. Le groupe cible de cet environnement est les enfants ayant un âge de développement qui se situe entre 4 et 7 ans (dans le cas d'enfants autistes, il convient de mentionner que leur âge chronologique peut être beaucoup plus élevé en raison de difficultés d'apprentissage supplémentaires).

L'environnement de travail ECHOES (Graphique 6.1) a été conçu pour fonctionner sur un grand écran tactile multipoint avec sortie audio. Les enfants peuvent s'asseoir ou rester debout devant l'écran, et interagir physiquement avec le système en glissant, tapotant et secouant les objets.

Les interactions se font au sein d'un « jardin magique », les objets du jardin ont des propriétés inhabituelles destinées à aiguiser la curiosité et à encourager l'exploration. Par exemple, l'enfant peut toucher et faire glisser la tête d'une fleur qui, ce faisant, se détache de la tige et se transforme en ballon. Le jardin magique abrite également Andy, un agent intelligent, avec lequel l'enfant peut jouer et interagir. Andy joue à la fois un rôle de guide auprès de l'enfant, lui expliquant les activités et lui fournissant de l'aide, et également de condisciple, en se relayant avec l'enfant dans des activités telles que le tri.

Encadré 6.2 Trouble de l'attention avec hyperactivité (TDAH) : les technologies en renfort

Les technologies conçues pour les élèves atteints de TDAH s'intéressent à divers aspects de cette maladie, par exemple l'autorégulation (c.-à-d., l'apprentissage permettant de gérer ses pensées, ses comportements et émotions). Les technologies exposées ci-après ne sont pas largement répandues, mais sont mises à l'essai dans divers pays.

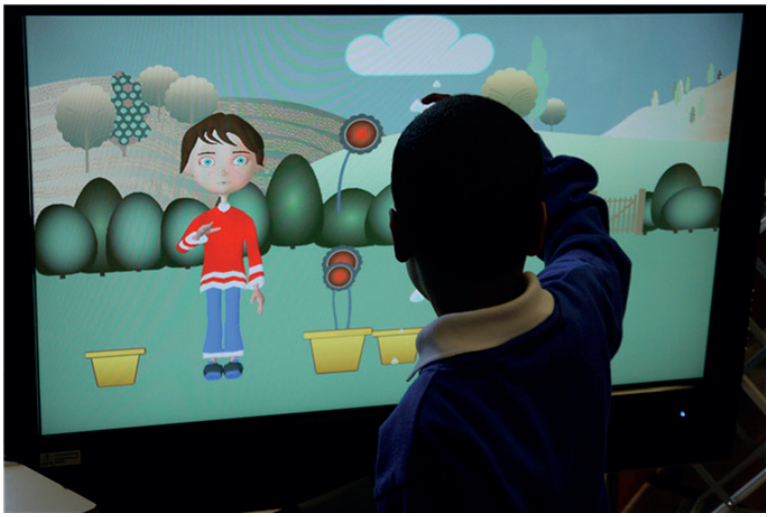
La régulation émotionnelle, consistant à apprendre à reconnaître ses émotions et à les gérer de manière convenable, est un élément clé de l'autorégulation. Les exercices de respiration sont une des options permettant de réguler les émotions et de réduire le stress. Toutefois, les enfants peuvent ne pas trouver ces exercices très stimulants ou motivants. Le système danois ChillFish est un jeu de rétroaction biologique équipé d'un contrôleur de jeu actionné par la respiration de l'enfant pour faire se mouvoir un poisson sur l'écran. L'objectif est de faire en sorte que le poisson collecte autant d'étoiles de mer que possible, et ce grâce à un rythme de respiration lent et continu (Sonne et Jensen, 2016[23] ; Sonne et Jensen, 2016[24]). L'impact de ChillFish, mesuré à l'aide de la Viabilité de la fréquence cardiaque et de l'activité électrodermale, s'est avéré aussi apaisant que des exercices de relaxation pour des élèves atteints de TDAH.

Des chercheurs nord-américains travaillent actuellement sur une application de montre/Smartphone intelligent appelé CoolCraig (Doan et al., 2020[25]) qui faciliterait la co-régulation (lorsque les parents et les enseignants aident l'enfant, en contribuant, par exemple, à rediriger l'attention de l'enfant, en l'amenant à commencer des tâches, ou en le félicitant, etc.) des enfants atteints de TDAH. Les parents et les enseignants utilisent l'appli CoolCraig sur leur téléphone afin de fixer des objectifs à l'enfant, qui peut alors sélectionner un objectif dans son propre Smartphone. Une fois l'objectif atteint, le parent ou l'enseignant reçoit un signal, et l'enfant reçoit un nombre de points déterminés par l'adulte, qu'il peut ensuite échanger contre une récompense. Cette application contribue également à la régulation émotionnelle en demandant aux enfants de rendre compte de leur état émotionnel actuel (à l'aide d'un système de couleurs). Elle peut faire des suggestions adaptées (p. ex., « prenez une grande respiration ») et également permettre aux enfants et aux adultes de visualiser leur humeur dans le temps, ce qui peut favoriser la réflexion.

Même si les chercheurs pensent que l'approche CoolCraig peut être bénéfique, leur travail préliminaire de configuration avec des enfants atteints de TDAH a également mis en évidence un certain nombre de difficultés (Cibrian et al., 2020[26]). Ainsi, les enfants ont fait part d'hésitations quant à l'efficacité du soutien apporté par une application (plutôt que de passer par un parent ou un enseignant), ils craignaient que ce soutien soit en fait un facteur de distraction, ils avaient peur de la stigmatisation et de la gêne potentielle qu'il risquait d'occasionner (se refusant à recevoir des alertes ou des signaux devant leurs amis), et ils souhaitaient préserver leur vie privée (se refusant d'être obligés de transmettre leur information personnelle à leurs parents et/ou enseignants). De telles problématiques font qu'il est essentiel d'écouter les enfants et de comprendre leurs propres expériences afin de bien configurer les technologies destinées à les aider, autrement ces technologies risquent de ne pas avoir l'impact souhaité.

L'autisme est un trouble neurodéveloppemental chronique qui affecte les compétences de communication et les interactions d'une personne avec les autres, ainsi que la manière dont cette personne perçoit le monde qui l'entoure (National Autistic Society, 2016[28]). Les difficultés d'interactions sociales et de communication constituent l'une des caractéristiques de l'autisme et, étant donné qu'il s'agit d'un trouble du spectre, ces difficultés se manifesteront de différentes façons à différents points du spectre (p. ex., elles peuvent aller de la difficulté à comprendre les échanges au cours d'une conversation typique à l'absence totale de communication). On peut également voir émerger des différences notables entre des individus censés se situer au même point du spectre, voire chez un même individu à différents moments (p. ex., dans des situations de stress ou d'anxiété, ces difficultés sont susceptibles d'être exacerbées).

Graphique 6.1 L'environnement ECHOES



Source: Base de données d'images et de vidéos ECHOES (reproduit avec autorisation).

Les difficultés sociales et de communication peuvent avoir une influence profonde et durable sur le bien-être social et émotionnel d'un individu, causant des problèmes pour nouer et entretenir des relations (Kuo et al., 2013[29]), entraînant de la solitude (Locke et al., 2010[30]), de l'isolement (Chamberlain, Kasari et Rotheram-Fuller, 2007[31]), et une sensible augmentation de la probabilité d'être harcelé (Cappadocia, Weiss et Pepler, 2012[32]). Au fil du temps, ces difficultés peuvent avoir des conséquences profondément négatives sur la santé mentale de l'enfant (Whitehouse et al., 2009[33]), et entamer sa confiance en lui et son estime de soi (Bauminger, Shulman et Agam, 2004[34]). En outre, ces difficultés persistent toute la vie, de nombreux adultes autistes faisant état d'un fort sentiment d'isolement, malgré leur désir de s'impliquer davantage avec les autres (Müller, Schuler et Yates, 2008[35]).

ECHOES s'appuie sur le modèle SCERTS de communication sociale, de régulation émotionnelle, et de soutien transactionnel (*Social Communication, Emotional Regulation, Transactional Support*) (Prizant et al., 2006[36]). L'un des objectifs généraux de SCERTS est d'encadrer les enfants autistes dans le développement de compétences et de la confiance dans les activités sociales. SCERT a pour particularité remarquable de chercher à identifier les forces des enfants et de s'appuyer dessus pour développer d'autres compétences.

Ce que SCERTS qualifie de « soutien transactionnel » est un autre aspect intéressant qui prend en compte le rôle de l'environnement de l'enfant, y compris les personnes qui en font partie, dans le développement des compétences en question. Les enfants réussiront mieux à développer des compétences sociales si l'environnement s'adapte à leurs besoins particuliers afin de les aider au mieux (et cela englobe les contacts sociaux : les compétences sociales des enfants augmentent quand ils sont entourés d'interlocuteurs qui les comprennent, les soutiennent et aiment interagir avec eux).

En ce qui concerne la communication sociale, le modèle SCERTS s'intéresse à deux compétences fondamentales, à savoir, l'attention conjointe et l'utilisation de symboles. Par attention conjointe, on entend la capacité de partager l'attention, les émotions et les intentions avec des partenaires, à s'engager dans des interactions sociales réciproques ou alternées. L'utilisation de symboles consiste à utiliser des objets, des images, des mots ou des signes pour représenter les choses et partager les intentions, et avoir la capacité d'utiliser des objets dans le jeu.

En configurant l'environnement virtuel, l'équipe d'ECHOES a opté pour une approche participative impliquant une grande variété d'intervenants, les parents, les aidants, les praticiens, les enseignants et, surtout, les enfants autistes (Frauenberger, Good et Keay-Bright, 2011[37] ; Frauenberger et al., 2013[38]).

L'objectif d'ECHOES était de créer un environnement dans lequel les forces et habiletés des enfants pouvaient se révéler et servir de tremplin, et à cet effet, il présentait à la fois des activités exploratoires et axées sur la tâche.

Les activités exploratoires ont été conçues pour donner aux enfants un sentiment d'autonomie et de capacité d'agir avec l'environnement, alors que les activités axées sur la tâche ont permis à l'agent de modeler les comportements d'initiation et de réponse de l'enfant. Par exemple, l'activité où l'enfant et l'agent virtuel, Andy, trient à tour de rôle un nombre fixe de ballons de différentes couleurs et les placent dans les boîtes de la couleur correspondante, est centrée sur la tâche. Dans le cas d'activités exploratoires, il n'y a pas de fin déterminée : on peut par exemple se relayer avec l'agent pour secouer les nuages, ce qui fait pleuvoir et fait pousser les fleurs (voir Graphique 6.2). Le praticien peut s'appuyer sur l'intérêt et la motivation de l'enfant afin de décider de la durée de l'activité, et quand passer à une autre activité.

Les actions et comportements du personnage virtuel intelligent, Andy, sont étayés par un agent de planification autonome. Le planificateur travaille au niveau réactif et au niveau délibératif. Le niveau délibératif se préoccupe de plans à plus long terme en relation avec une activité d'apprentissage particulière. Par exemple, si l'objectif à long terme de l'activité est d'encourager l'enfant à ramasser un panier, le niveau délibératif s'attachera à l'ensemble des actions qu'Andy devra faire pour que cela se produise. Par contraste, le niveau réactif consiste à générer les réactions de l'agent en réponse aux actions immédiates de l'interface de l'enfant (par exemple, ce que l'enfant touche, pendant combien de temps, si c'est le bon objet, etc.).

Si le système est capable de percevoir les comportements tactiles de l'enfant et d'y répondre en conséquence, il ne peut détecter d'autres aspects de l'interaction de l'enfant avec le système ou les comportements généraux, et, ainsi, il est incapable de déterminer à quel moment il conviendrait de répéter une activité particulière (parce que l'enfant la trouve apaisante ou agréable), de passer à une autre activité (parce que l'enfant s'ennuie ou est frustré), ou d'arrêter la séance.

Graphique 6.2 Faire pleuvoir avec ECHOES

Source: Base de données d'images et de vidéos ECHOES (reproduit avec autorisation).

C'est plutôt le praticien encadrant l'enfant qui prend les décisions en utilisant une interface spécialement conçue à cet usage. On accède à l'interface du praticien par un écran distinct de l'écran principal d'ECHOES, pour ne pas détourner l'attention de l'enfant. Cette interface permet au praticien de contrôler le choix, la durée et la séquence de chaque activité d'apprentissage. Cet écran peut également lui servir à demander à l'agent de répéter un comportement, ou de passer à autre chose, lorsque cela s'avère nécessaire. L'action dans l'environnement ECHOES est donc déterminée par la combinaison de l'expertise du professionnel/chercheur et de la planification intelligente du système.

Comme on l'a fait remarquer ci-dessus, l'équipe a privilégié un processus participatif, dans le but d'impliquer autant que possible les utilisateurs finaux dans la conception du système. Sachant que les méthodes classiques de collecte de commentaires, telles que les groupes de discussion et les entretiens ne conviennent pas, l'équipe s'est lancée dans la conception rapide des prototypes afin de mieux impliquer les enfants autistes et pouvoir observer comment ils s'en servaient. Dans l'un de ces cas, l'équipe a été amenée à redéfinir complètement le rôle d'ECHOES dans un contexte plus large. À l'origine, l'équipe avait pensé que les interactions sociales primaires se produiraient

entre l'enfant et l'agent social, et a poursuivi la configuration de l'étude en ce sens, le chercheur restant en retrait, et hors de vue de l'enfant. Toutefois, après l'essai du prototype initial, l'équipe de recherche a remarqué que les enfants se tournaient souvent vers le chercheur ou le praticien pour partager l'affect avec eux, pour débuter une conversation, en général à propos de quelque chose se produisant dans l'environnement ECHOES. Elle a donc replacé le programme ECHOES dans un contexte plus large, en reconnaissant l'importance du rôle de l'adulte comme partenaire social supplémentaire, et en arrangeant la configuration de manière à faciliter l'interaction de l'enfant avec l'adulte ou les adultes présents dans la salle (voir l'Graphique 6.3).

Graphique 6.3 Un enfant interagissant avec ECHOES partage sa joie avec l'un des chercheurs

Source: Reproduit avec l'autorisation de Alcorn (2016[39]).

ECHOES : Faits marquants

Dans une interaction sociale, l'échange naturel se fait à l'aide *d'initiations* verbales et non verbales (p. ex., poser une question, faire une observation, pointer quelque chose pour attirer l'attention d'une autre personne) et de *réponses* à ces initiations (p. ex., répondre à une question, hocher la tête, suivre des yeux le geste de pointage vers l'objet en question). Bien que les enfants autistes éprouvent généralement des difficultés avec les deux types d'interactions sociales, les initiations leur sont généralement plus difficiles que les réponses.

En évaluant l'environnement ECHOES, l'équipe cherchait à déterminer si, lors de l'utilisation d'ECHOES, les initiations et réponses des enfants autistes avaient tendance à augmenter, et s'il y avait des différences selon que ces interactions sociales impliquaient soit l'agent, soit l'humain. Les chercheurs ont, par ailleurs, cherché à déterminer si les enfants transposaient des améliorations hors de l'environnement ECHOES (dans ce cas, lors d'une séance de jeu libre avec un professionnel).

Il est intéressant de noter que lorsque les enfants interagissaient avec ECHOES, leurs initiations s'amélioraient avec le temps, et ce tant à l'égard de l'humain que de l'agent (même si cette amélioration n'était pas statistiquement significative). Les réponses des enfants au partenaire humain ont, elles aussi, augmenté substantiellement, mais leurs réponses à l'agent intelligent ont diminué. Les améliorations des comportements d'initiations et de réponses n'ont, toutefois, pas été transposées à la séance de jeu libre.

Ces observations sont pertinentes et ont des implications particulièrement intéressantes pour l'utilisation des technologies dans un environnement pédagogique. L'augmentation des initiations est positive, et il faut noter que, au fil du temps, les enfants répondaient davantage au partenaire humain, mais moins à l'agent. On peut supposer qu'ils se sont rendu compte des limites des technologies, comprenant qu'Andy pouvait uniquement détecter leur réponse que si elle était exprimée de manière tactile, contrairement au partenaire humain.

Au-delà des évolutions des initiations et réponses, ce qu'il faut retenir de l'expérience avec ECHOES, c'est le fait que les enfants ont semblé véritablement aimer interagir avec lui. Comme mentionné ci dessus, même si l'équipe avait imaginé au départ que les enfants interagiraient principalement avec l'agent virtuel, ils ont remarqué que les

enfants désiraient souvent partager leur expérience avec quelqu'un dans la pièce (comme dans le cas de l'enfant dans le Graphique 6.3 qui exprime sa joie avec l'une des chercheuses).

Ceci explique probablement deux choses en ce qui concerne les résultats. En premier lieu, il est possible que l'amélioration de la communication sociale dans l'environnement ECHOES soit due au fait qu'aux yeux de l'enfant les éléments avec lesquels il interagissait sur écran « valaient la peine de communiquer » (Alcorn, Pain et Good, 2014[40]). Cela pourrait également expliquer la dégradation des comportements en communication sociale une fois quitté l'univers ECHOES. Il faudrait donc, tout d'abord, réfléchir à la manière dont nous pouvons configurer les technologies qui, plutôt que d'adopter une méthode d'apprentissage des compétences fondée sur l'exercice et la pratique, devraient viser à offrir des expériences engageantes et motivantes. Idéalement et si possible, il faudrait réfléchir au moyen de rendre ces expériences agréables, en enracinant l'apprentissage, par exemple, dans des environnements qui permettent une exploration ludique et autorégulée (Mora-Guiard et al., 2016[41]) ou des expériences d'apprentissage multisensorielles ludiques (Gelsomini et al., 2019[42]).

En second lieu, plutôt que de considérer les technologies comme des entités discrètes permettant à l'enfant de transposer des compétences dans le « monde réel », il serait plus judicieux de réfléchir comment on peut effectivement incorporer et intégrer les expériences des enfants avec les technologies d'apprentissage dans un environnement éducatif plus large. Il est, par conséquent, important d'appréhender les systèmes être humain-machine comme des formes de systèmes sociaux, et de les considérer dans leur ensemble.

La dysgraphie : diagnostic et solutions

Comme mentionné ci-dessus, le domaine des besoins spécifiques et des handicaps est vaste et varié, car il embrasse les handicaps physiques autant que les troubles cognitifs et neurodéveloppementaux. Le diagnostic de tout handicap nécessite l'intervention et l'évaluation d'un spécialiste. Toutefois, certains troubles, comme la dyslexie ou la dysgraphie, par exemple, peuvent ne se révéler que dans un cadre éducatif, de sorte que la présomption d'un trouble potentiel repose sur l'observation de l'enseignant.

Le processus permettant de diagnostiquer un enfant ayant des besoins spécifiques est généralement long, fastidieux et stressant pour les enfants et leurs familles. Pourtant, une intervention précoce, spécialement ajustée aux besoins de l'enfant, est souvent ce qui peut le mieux l'aider à se développer et à progresser. Par conséquent, tout outil susceptible d'amener les enseignants à reconnaître les signes précurseurs d'un trouble potentiel et de soutenir les enfants et leurs familles dans la recherche d'un diagnostic spécialisé pourrait avoir un énorme impact sur l'éducation d'un enfant et son avenir. Il ne s'agit en aucun cas de suggérer que les enseignants eux-mêmes devraient poser un diagnostic. Toutefois, dans le cadre du processus de diagnostic, l'avis de l'enseignant est souvent sollicité en tant que contribution à ce processus, et prend généralement la forme d'un rapport, d'un questionnaire à remplir, etc. Par conséquent, si les enseignants disposaient d'outils leur permettant de repérer plus rapidement les différences dans le développement d'un enfant dans un cadre éducatif, cela pourrait potentiellement permettre aux familles d'amorcer plus rapidement un processus de diagnostic. Mieux encore, le fait de donner aux spécialistes des informations plus détaillées pourrait également favoriser un diagnostic plus rapide, ce qui ne serait pas le cas autrement.

Une équipe de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) a mis au point une méthode pour détecter la dysgraphie chez les enfants qui a donné des résultats très prometteurs (Asselborn et al., 2018[43] ; Asselborn, Chapatte et Dillenbourg, 2020[44] ; Zolna et al., 2019[45]). Par dysgraphie, on entend la difficulté à écrire, qui peut se manifester par une écriture illisible et de la peine à former les lettres correctement, des lettres parfois écrites à l'envers et/ou en désordre. Elle peut également s'accompagner de problèmes connexes d'orthographe.

La dysgraphie est en général diagnostiquée grâce à l'un des nombreux tests normalisés existants. Bien que les tests varient entre eux, ils demandent tous à l'enfant de copier du texte, celui-ci étant évalué ensuite par un expert afin de déterminer la *lisibilité* (en la mesurant à l'aide d'un ensemble de critères) et *l'efficience* (en comptant la quantité de texte produite dans un laps de temps donné) (Biotteau et al., 2019[46]).

Ces tests ont les désavantages d'être subjectifs et coûteux. En outre, ils se concentrent principalement sur le résultat, c'est-à-dire le texte écrit, plutôt que sur les processus mis en œuvre pour arriver à ce résultat. Asselborn et ses collègues ont mis au point un algorithme d'apprentissage automatique qui peut détecter la dysgraphie, et qui fonctionne sur une tablette standard disponible sur le marché. Afin de développer cet outil, ils ont tout d'abord

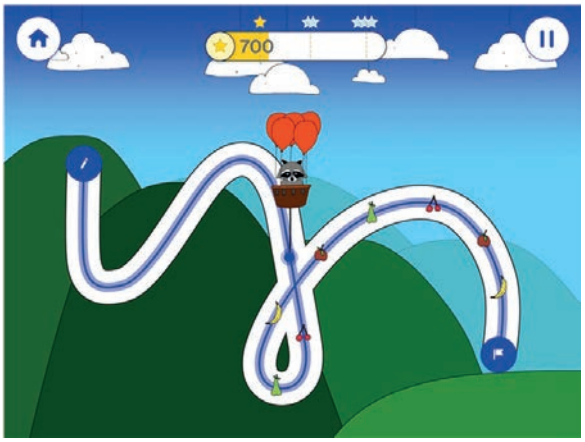
recueilli des données auprès de 300 enfants (au développement typique ou atteints de dysgraphie) à qui ils ont demandé de copier un texte sur une tablette dont la surface était recouverte d'une feuille de papier (pour imiter les pratiques d'écriture typiques). Ils ont ensuite utilisé une partie de ces données pour former un classifieur d'apprentissage automatique afin qu'il détecte la dysgraphie, et les données restantes pour tester la précision du classifieur. Le taux de détection de la dysgraphie était d'une précision très élevée (Asselborn et al., 2018[43]).

Au cours de ce processus, les chercheurs ont extrait 53 caractéristiques qui décrivent les multiples aspects d'une écriture enfantine, telles que les inclinaisons du stylo, la pression, la vitesse et les changements de vitesse. Ils ont ensuite pu déterminer lesquelles de ces caractéristiques étaient les plus discriminatoires, en d'autres termes, lesquelles permettaient de distinguer l'écriture des enfants atteints de dysgraphie de celle des enfants au développement typique.

L'un des avantages pratiques de ce système est qu'il ne nécessite pas de matériel spécialisé : il fonctionne sur une tablette graphique standard, est donc peu coûteux, et peut être utilisable par des non-spécialistes. En outre, comparé aux méthodes classiques de diagnostic de la dysgraphie, le système peut analyser le *processus* de l'écriture, plutôt que simplement le *produit*. Les caractéristiques mentionnées plus haut, comme la pression sur le stylo, les inclinaisons du stylo, et d'autres encore, peuvent fournir une analyse encore plus fine des difficultés que l'enfant expérimente, plutôt que de simplement identifier si l'enfant est ou n'est pas dysgraphique. Cela signifie donc qu'il est possible de répondre de manière plus ciblée et plus spécifique aux besoins de l'enfant.

Ces résultats ont servi au développement de Dynamico (www.dynamico.ch/), une application sur tablette qui sera bientôt disponible dans le commerce. Configuré pour un iPad et un stylo Apple, Dynamico aide les enfants ayant des difficultés d'écriture dans de nombreux environnements, et peut être utilisé à la maison, dans la classe ou avec des thérapeutes. L'appli est constituée d'outils qui peuvent analyser l'écriture des enfants en 30 secondes, ce qui permet ensuite au thérapeute de créer un programme sur mesure pour pallier ce trouble, en fonction des résultats de l'analyse. Cet outil s'avérera également utile aux enseignants pour créer des séquences d'activités d'apprentissage individualisées. Il aura aussi son utilité au domicile de l'enfant, les enseignants et/ou le thérapeute pouvant suivre ses progrès à distance. Du point de vue de l'enfant, les activités sont présentées sous forme de jeux configurés pour être amusants et motivants. Le Graphique 6.4 présente une capture d'écran de l'application sur laquelle les enfants s'entraînent à tracer des lettres à l'aide du stylet : ce faisant, le raton laveur se déplace du début à la fin, et les enfants peuvent recevoir des récompenses en cours de route lorsque leur tracé est précis.

Graphique 6.4 Une capture d'écran de l'application Dynamico



Source: Avec l'aimable autorisation de Thibault Asselborn.

À l'heure actuelle, la recherche développe des technologies pour aider également les élèves atteints de dyslexie et de dyscalculie : l'Encadré 6.3 présente quelques exemples.

Encadré 6.3 Les technologies intelligentes au secours de la dyslexie et de la dyscalculie

Un bon nombre de technologies peuvent fournir du soutien aux élèves atteints de dyslexie, allant d'outils génériques qui peuvent servir dans un environnement éducatif à ceux qui sont conçus spécialement pour une utilisation pédagogique. Les modules d'extension de navigateur web, qui visent à faciliter la lecture en donnant aux utilisateurs la possibilité de modifier certains aspects de la page web, tels que la couleur de fond, la taille de police, l'espacement des mots, etc. constituent un bon exemple d'outils génériques. Help me read! (Berton et al., 2020[47]) en est un exemple, en ce qu'il fournit également « un mode de lecture facile », en soulignant et grossissant un seul mot du texte à la fois, permettant aux utilisateurs de se concentrer sur chaque mot, et de passer au suivant à leur propre rythme.

L'utilisation des technologies intelligentes pour diagnostiquer la dyslexie gagne également du terrain. Fait intéressant, le diagnostic de la dyslexie peut être plus ou moins difficile en fonction de la langue. Les langues sont différentes en termes de correspondance entre le graphème (la lettre) et le phonème (le son). Dans les langues aux correspondances opaques, comme l'anglais, les enfants atteints de dyslexie peuvent avoir davantage de difficultés à apprendre à lire, tandis que dans les langues ayant des correspondances plus claires, comme l'espagnol, la dyslexie peut n'être détectée que beaucoup plus tard, ce qui réduit les possibilités d'interventions précoces. Les chercheurs en Espagne et aux États-Unis ont mis au point Dytective, jeu en ligne utilisant des algorithmes d'apprentissage automatique, qui peut diagnostiquer avec justesse la dyslexie chez des natifs espagnols avec un taux de précision au-dessus de 80 % (Rello et al., 2016[48]), augmentant ainsi la possibilité pour les enfants d'avoir le soutien dont ils ont besoin aussi tôt que possible.

Outre la détection et le diagnostic, les technologies intelligentes peuvent contribuer également au développement de compétences chez les enfants dyslexiques. PhonoBlocks, un système qui comporte des lettres tangibles en 3D que les enfants peuvent manipuler pour épeler les mots, est un exemple de ces technologies (Fan et al., 2017[49]). Les lettres changent de couleur en fonction du son qu'elles produisent pour un mot donné. Par exemple, la couleur de la lettre S pourrait être le jaune dans le mot « oiseau » mais passer au rouge dans le mot « histoire », aidant ainsi l'enfant à mieux comprendre la relation entre la lettre et le son qu'elle produit, et la manière dont ces relations peuvent différer.

À l'inverse de la dyslexie, très peu de technologies sont configurées pour aider les élèves atteints de dyscalculie (une difficulté dans la compréhension des nombres et des calculs mathématiques). Toutefois, une équipe de chercheurs en Allemagne a récemment mis au point un système appelé *Hands-on-Maths*, qui a pour objectif d'aider les enfants à apprendre à utiliser leurs doigts pour représenter les chiffres et réussir de simples calculs (Erfurt et al., 2019[50]). En général, cela s'apprend au cours d'une séance en tête à tête avec un professionnel chevronné, et c'est la raison pour laquelle les enfants y ont un accès limité. Le système prononce des chiffres ou fait des calculs mathématiques simples à voix haute que les enfants doivent représenter avec leurs doigts. L'enfant porte des gants avec des balises fixées à chaque doigt, tandis que le système peut utiliser une caméra pour suivre les calculs de l'enfant et déterminer s'ils sont bons. Le programme Hands-on-Maths est en cours de développement et a fait l'objet de critiques très positives.

Déficience visuelle et graphiques interactifs tactiles

Contexte

Comme pour les autres handicaps, les élèves aveugles ou malvoyants sont confrontés à des lacunes en matière de niveau de formation, ils ont moins accès aux classes et à l'enseignement supérieur, connaissent des taux de chômage élevés et n'accèdent pas facilement à certaines carrières.

Dans de nombreux pays de l'OCDE, la grande majorité des élèves aveugles ou malvoyants sont scolarisés ou sont encouragés à le faire dans un établissement ordinaire. Assurer leur participation à des activités quotidiennes dans la classe entraîne un certain nombre de difficultés. Metatla (2017[51]) présente un excellent aperçu de certaines

d'entre elles, comme de privilégier le travail collaboratif alors que les enfants aveugles ou malvoyants et les voyants utilisent du matériel qu'ils ne peuvent pas partager, ou le fait que les murs des classes sont en général couverts de matériel visuel, comme des affiches, des diagrammes, entre autres, que l'on estime essentiels à l'apprentissage, mais qui sont inutiles aux aveugles et malvoyants. Dans cette section, nous nous attachons exclusivement à examiner l'accès au matériel scolaire, particulièrement les graphiques.

La plupart du matériel éducatif comporte un élément visuel significatif, qu'il prenne la forme d'un texte ou d'un graphique (ou, généralement, une combinaison des deux). Il existe de nombreuses options pour avoir accès à un texte écrit. Bien qu'ils ne soient pas exempts de problèmes de convivialité, les lecteurs d'écran traitent les documents numériques qu'ils retranscrivent sous forme audio grâce à la synthèse vocale. Les lecteurs d'écran sont largement répandus tant sur les PC que sur les appareils mobiles (p. ex., JAWS ou NVDA pour Windows, ou VoiceOver pour MAC et IOS). Dans les cas où la personne aveugle ou malvoyante préfère lire le texte plutôt que l'écouter, les plages Braille offrent une solution. Ces afficheurs sont un élément matériel séparé qui reçoit les données du lecteur d'écran et les traduit en braille (à l'aide de picots mobiles), celles-ci pouvant ensuite être lues par l'utilisateur (il faut noter que ces afficheurs sont également des dispositifs d'entrée et permettent aux utilisateurs non-voyants ou malvoyants d'entrer du texte dans un ordinateur) (Encadré 6.4). Bon nombre de ces dispositifs peuvent, toutefois, s'avérer onéreux.

Encadré 6.4 Les technologies au secours des élèves aveugles et malvoyants

Un certain nombre de technologies répondent aux besoins pédagogiques des élèves aveugles ou malvoyants.

Le premier type est constitué de matériels qui pourraient aider les élèves à la fois pour la prise de note et dans la lecture. De telles solutions sont mises en œuvre dans les pays à revenu faible ou moyen. Les afficheurs braille dynamiques mobiles dotés de cellules brailles à six ou huit points permettent aux élèves aveugles et malvoyants d'avoir accès à du matériel pédagogique écrit et des livres en braille. Cette technologie fonctionne dans plusieurs langues, elle peut lire des textes en braille (simple lecteur) ainsi que traduire d'autres formats de textes à partir de diverses applications (traducteur braille) et permet d'imprimer sur des imprimantes braille. Elle peut fonctionner avec d'autres dispositifs utilisant Bluetooth ou USB et donc permettre aux enseignants d'interagir avec leurs élèves aveugles ou malvoyants qui utilisent des applications compatibles sur leur Smartphone, ordinateur ou tablette — grâce auxquelles les enseignants obtiennent une traduction textuelle en temps réel du braille lu ou écrit par l'élève sur son appareil (ou l'inverse). Braille Me, BrailleRing et Orbit Reader sont des exemples de ces appareils. Ainsi, eKatibu, EdTech Hub et la fondation Leonard Cheshire se sont servis d'Orbit Reader 20 dans la région de Nyanza au Kenya pendant les fermetures d'école dues à la COVID-19 en conjonction avec un programme de formation des enseignants afin de s'assurer que les élèves aveugles et malvoyants puissent continuer d'apprendre (voir https://edtechhub.org/2021/01/08/using-innovative-methods-to-train-teachers-of-blind-children-what-we-learned/). Un autre type de dispositif reposant sur l'IA et conçu pour aider les élèves (et les personnes) aveugles et malvoyants est Finger Reader, dispositif portable qui se porte comme un anneau à l'index et qui lit à haute voix ce que le doigt lui désigne grâce à sa caméra et à ses algorithmes de reconnaissance de texte et de synthèse vocale (Shilkrot et al., 2015[52]).

D'autres formes de technologies reposent sur des logiciels et utilisent des ordinateurs ordinaires pour renforcer l'autonomie des étudiants aveugles ou malvoyants. Par exemple, SuperNova permet aux utilisateurs d'utiliser la fonction grossissement, d'annoncer la ponctuation, de remplacer les couleurs difficiles à distinguer, d'augmenter la verbosité, d'entendre les pages web et d'activer le braille. Ce système permet à l'utilisateur d'entendre les caractères et les mots au fur et à mesure qu'il les tape, et lit à haute voix les pages web, les applications, les documents et courriels à l'utilisateur. En facilitant ainsi la lecture, ces programmes sont essentiels aux étudiants malvoyants en leur procurant davantage d'autonomie dans une classe ordinaire, et ils sont utilisés dans le monde entier à cette fin. Outre SuperNova, on peut citer les programmes comme Jaws, Microsoft Narrator, NDVA, Orca et Window Eyes. En dehors du fait qu'elle aide les élèves aveugles ou malvoyants, cette technologie peut également accompagner les élèves atteints de dyslexie ou de formes associées de difficultés d'apprentissage.

Toutefois, les capacités de synthèse vocale et les plages Braille dynamiques sont conçues pour travailler avec du matériel textuel. Pour ce qui est des représentations graphiques, il n'existe pas de solution analogue peu coûteuse, ce qui signifie que l'accès des élèves aveugles ou malvoyants à des contenus graphiques représente encore un défi. Sur les pages web, on peut utiliser l'attribut alt-text (texte alternatif) pour obtenir une description textuelle d'une image, qui est alors lue par le lecteur d'écran. Toutefois, ces descriptions en texte alternatif sont parfois absentes (car leur inclusion dans le code source de la page dépend de la volonté du créateur de contenu de la page web) et leur qualité varie souvent (car le créateur de contenu a toute latitude pour décider de la meilleure façon de décrire l'image).

De récentes recherches, bien que pas spécifiquement axées sur l'éducation, mais pertinentes et certainement opportunes, suggèrent une autre raison à l'origine de ces difficultés. Dans une étude sur l'accès aux informations de santé publique concernant la pandémie de COVID-19, Holloway et al. (2020[53]) ont constaté que plus de 70 % des sites web qu'ils ont étudiés faisaient appel à des représentations graphiques pour transmettre de l'information sur la pandémie (par exemple, des visualisations en temps réel des données statistiques). Toutefois, moins d'un quart comprenait le texte alternatif correspondant à ces graphiques, non pas parce que le créateur de contenu de la page web ne l'a pas mis, mais parce que les graphiques qui sont interactifs, ou automatiquement mis à jour, ne supportent pas le texte alternatif. Les utilisateurs aveugles et malvoyants n'ont donc pas moyen d'accéder à l'information importante qui figure dans ces visualisations.

Malheureusement, cette inégalité d'accès à l'information graphique semble se creuser davantage en raison de la tendance grandissante à privilégier les graphiques par rapport au texte comme moyen d'échange d'informations (Gorlewicz et al., 2018[54]), et cet échange dans un format numérique est à la fois plus facile et plus rentable comparé aux alternatives sur papier. Paradoxalement, les nouvelles technologies pédagogiques interactives risquent de réduire davantage l'accès des enfants aveugles ou malvoyants à l'information, du fait qu'elles reposent sur le contenu visuel et les interactions telles que le glisser-déposer (Metatla et al., 2018[55]). Certaines matières des programmes d'enseignement présentent également des difficultés. Dans certaines d'entre elles, le rôle des informations graphiques est purement illustratif ou vise à compléter des informations textuelles, mais dans d'autres il s'avère complexe de présenter certains types d'informations autrement. C'est particulièrement le cas des STIM, qui reposent en grande partie sur les représentations telles que les tableaux et les graphiques.

Une méthode reposant sur le toucher, similaire au braille, pourrait permettre aux élèves aveugles ou malvoyants d'avoir accès à de telles représentations. On peut créer des graphiques tactiles à l'aide d'une gaufreuse, qui met en relief les éléments du graphique afin de le rendre perceptible au toucher, ou à l'aide de papier gonflant, papier spécialisé chauffé par des machines qui font gonfler les parties imprimées d'une image, celle-ci devenant alors perceptible au toucher. Toutefois, le résultat de telles méthodes est statique, et il faudra créer un nouveau graphique en cas de modifications ou de mises à jour. Étant donné l'importance des graphiques dynamiques en éducation (p. ex., comprendre comment différentes valeurs de m affectent la courbe d'une ligne dans l'équation $y = mx+b$), il est clair que ces types de graphiques tactiles représentent une solution partielle.

Des technologies analogues à la plage Braille dynamique ont été mises au point, en utilisant des rangées de picots, pour l'affichage graphique dynamique, afin de permettre aux utilisateurs aveugles ou malvoyants d'explorer le graphique via le toucher. Toutefois, ces solutions reposent sur du matériel sur mesure et sont extrêmement coûteuses. Même les technologies récemment éditées, p. ex., Graphiti (https://www.orbitresearch.com/product/graphiti/), qui utilisent une rangée de picots pouvant être placés à différentes hauteurs pour transmettre une information topographique, sont encore du matériel spécialisé. S'il est vrai que l'objectif est de pouvoir réduire à terme le prix de Graphiti à 5 000 USD grâce à des commandes groupées, cela représente néanmoins une dépense significative pour un établissement, surtout pour du matériel ne pouvant servir que dans un seul but.

En résumé, faire en sorte que l'accès aux graphiques dynamiques ne nécessite pas de matériel spécialisé est un défi majeur et pourtant incroyablement important. Cela pourrait non seulement transformer le secteur de l'éducation, mais presque tous les aspects de la vie quotidienne d'un individu aveugle ou malvoyant.

Les approches prometteuses

En tentant d'aborder la question de l'accès aux graphiques d'une manière qui profite au plus grand nombre d'utilisateurs, Gorlewicz et al. (2018[54]) plaident pour l'utilisation d'appareils intelligents à écran tactile tels que les téléphones ou les tablettes comme plateformes matérielles.

Une telle approche a de multiples avantages. En premier lieu, la plateforme matérielle est peu coûteuse, facilement disponible et déjà largement répandue parmi une vaste proportion du groupe d'utilisateurs ciblé.

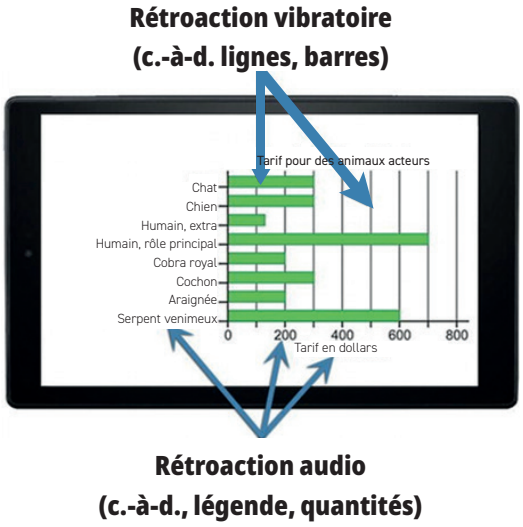
En outre, ces appareils ont déjà la capacité intégrée de fournir de l'information par le biais de multiples modalités, notamment visuelles, auditives et tactiles. Presque tous les dispositifs à écran tactile comprennent une carte de son et un haut-parleur, ainsi que des capacités de synthèse vocale, ce qui signifie qu'ils peuvent fournir un accès auditif à l'information aux utilisateurs aveugles ou malvoyants. De plus, le fait que nombre d'écrans tactiles possèdent également des capacités de vibration leur donne la possibilité de fournir une rétroaction vibrotactile. Ce type de rétroaction n'est pas habituellement utilisé comme forme première d'interaction avec un appareil, mais rien ne l'en empêche, et, dans le cas des utilisateurs aveugles ou malvoyants, c'est une modalité supplémentaire qui permet de fournir des informations.

En conséquence, cette approche offre des avantages par rapport aux solutions existantes telles que les affichages graphiques tactiles, qui ne présentent les informations que par le biais d'une seule modalité : le toucher. Ces caractéristiques étant déjà présentes dans la plupart des écrans tactiles, il n'est nul besoin ou presque de créer du matériel onéreux et spécialisé pour un usage restreint.

Gorlewicz et al. (2018[54]) envisagent un affichage comme celui du Graphique 6.5. Dans ce cas, l'information textuelle du diagramme à barres peut être convertie en informations auditives, tandis que les éléments graphiques et spatiaux du diagramme (en l'occurrence les barres) peuvent être transmis par le biais de rétroactions vibratoires. C'est clairement un atout par rapport aux systèmes qui ne peuvent fournir que deux types d'informations inhérentes au diagramme par le biais d'une seule modalité.

Dans cet exemple, bien que la technologie existe pour offrir une solution potentielle à un problème clé, des recherches approfondies sont nécessaires avant qu'un tel système devienne réalité. Plus particulièrement, Gorlewicz et al. (2018[54]) soulignent la nécessité de mener des recherches pour comprendre comment se fait l'encodage, l'interprétation et la représentation des informations graphiques présentées par des canaux non visuels. S'ils constatent que les recherches précédentes ont examiné ces questions en relation aux graphiques tangibles (c'est-à-dire en relief), ils estiment que les résultats ne sont pas forcément applicables, car l'écran tactile n'offre pas une expérience tangible analogue et est donc susceptible de déclencher des récepteurs sensoriels différents. En même temps, une étude récente qui compare l'utilisation de graphiques sur écran tactile à des graphiques en relief a montré qu'il n'y avait pas de différences significatives en termes de performance (Gorlewicz et al., 2020[56]), ce qui laisse entendre qu'il s'agit d'un domaine prometteur qu'il faut continuer d'explorer.

Graphique 6.5 Utilisation d'une combinaison de rétroactions auditives et vibratoires pour transmettre une information graphique



Source: Avec l'aimable autorisation de Thibault Asselborn.

Regards sur le futur

La recherche présentée dans ce chapitre offre trois pistes prometteuses en termes de développement et de déploiement de technologies intelligentes qui pourraient avoir le plus d'impact sur la vie des apprenants ayant des besoins spécifiques d'éducation. La première vise un développement plus holistique des systèmes intelligents, tenant compte des besoins, de l'utilisateur et de l'environnement d'utilisation. La deuxième est la création de systèmes intelligents exploitant les technologies qui ont de grandes chances d'être mises à la disposition des utilisateurs visés (« systèmes intelligents pour tous »). Finalement, les systèmes qui intègrent un mélange d'intelligence humaine et artificielle sont très prometteurs, et il est primordial de poursuivre la recherche afin d'atteindre le mariage idéal. J'examine ces pistes successivement ci-dessous.

Les systèmes intelligents holistiques

Si nous voulons que les technologies intelligentes apportent une aide efficace aux enfants ayant des besoins spécifiques à court et à moyen terme, nous devrions privilégier la mise au point de « systèmes intelligents holistiques », c'est-à-dire de technologies qui 1) répondent à un réel besoin, et qui sont conçues en tenant compte à la fois 2) des utilisateurs finaux et 3) de l'environnement d'utilisation. La négligence de l'un de ces aspects est susceptible de créer des technologies qui ne seront pas adoptées ou qui seront rapidement abandonnées.

Répondre à un réel besoin

Comme nous l'avons vu plus haut, le besoin d'accompagner les apprenants ayant des besoins spécifiques se fait cruellement sentir. Ces besoins sont nombreux, et certains types de handicaps font l'objet d'une recherche et d'un développement moins importants que d'autres (p. ex., la dyscalculie). Même s'il est clair que les technologies jouent, et joueront encore longtemps, un rôle croissant en contribuant à l'apprentissage des personnes ayant des besoins spécifiques, il faut prendre le temps de comprendre ce qui est réellement nécessaire, plutôt que de se fier à ce que les aidants ou les vendeurs estiment nécessaire. De même, il faut regarder où se situe le plus grand impact potentiel : le cas de l'accès des utilisateurs aveugles ou malvoyants au contenu graphique a permis de voir qu'une solution facilement disponible et peu coûteuse pouvait avoir un impact extrêmement important, à la fois dans la salle de classe et en dehors.

Configuration pour les utilisateurs

L'Organisation mondiale de la santé (2011[10]) souligne l'importance de s'assurer que la voix des enfants handicapés soit entendue, tout en reconnaissant que ce n'est malheureusement pas toujours le cas, et qu'il en va de même pour la conception de nouvelles technologies.

La participation d'enfants handicapés aux activités de conception de technologies intelligentes destinées à soutenir leur apprentissage peut présenter des défis supplémentaires (par exemple, comment faire en sorte que les besoins et les souhaits des enfants non verbaux puissent être exprimés durant le processus de conception), mais il est d'autant plus important qu'ils participent que leurs besoins et souhaits sont susceptibles d'être très différents de ceux des adultes qui conçoivent la technologie. Heureusement, de nombreux travaux se sont consacrés à la conception participative avec des enfants ayant des types divers de handicaps : Benton et Johnson (2015[57]) fournissent une bonne vue d'ensemble.

En plus des enfants, il est nécessaire de faire participer les enseignants dans la conception de toute technologie d'apprentissage. Pour commencer, ils ont une bonne perception et expertise en matière d'accompagnement des enfants ayant des besoins spécifiques d'éducation, et pourront faire valoir leurs idées sur ce qui est susceptible de fonctionner ou pas (Alcorn et al., 2019[58]).

Configuration pour l'environnement

Il faut non seulement configurer pour les utilisateurs, mais il est également essentiel d'avoir une bonne compréhension de l'environnement d'utilisation. Tout type de technologie existe dans un écosystème pédagogique élargi (en général, il comprend la classe et l'établissement scolaire) et l'introduction de technologies avancées dans un tel environnement nécessite de prendre conscience des contraintes existantes avec lesquelles les technologies doivent compter. Il s'agit notamment de considérations pratiques telles que les budgets et priorités de financement de l'établissement, l'adéquation avec les programmes d'enseignement, la robustesse des technologies, leur coût, et leur intégration potentielle avec les technologies existantes. La facilité d'utilisation (tant pour les enseignants

que pour les élèves) est une sérieuse préoccupation, tout comme les questions de maintenance et d'assistance technique.

La facilité d'utilisation est un aspect que l'on peut aborder pendant le processus de configuration (idéalement en impliquant les utilisateurs finaux à tout moment) ; toutefois, le choix initial du matériel est une décision qui aura une influence déterminante sur l'utilisation effective de la technologie.

Si l'on considère l'adoption potentielle de technologies destinées à l'apprentissage, il existe deux extrêmes (et un continuum entre les deux). À une extrémité, on trouve les technologies en cours de développement qui sont peu susceptibles d'entrer dans la classe, soit parce qu'elles sont trop chères, soit que le matériel ou le logiciel est trop compliqué à installer, à utiliser et/ou à entretenir (comme ECHOES) pour des non-spécialistes. À l'autre extrémité, on trouve les systèmes qui utilisent des technologies existantes et peu coûteuses qui sont conçues pour être facilement utilisables par des non-spécialistes (comme l'appli Dynamico et des systèmes qui, une fois développés, utilisent des écrans tactiles pour des graphiques vibrotactiles).

Bien que non exploitable en classe, ECHOES nous a permis de mieux comprendre comment créer des environnements susceptibles d'offrir des interactions ludiques et motivantes. Ces informations ont ensuite été reprises dans un système qui se voulait à la fois technologiquement plus simple tout en permettant également aux non-spécialistes de créer leur propre contenu (Porayska-Pomsta et al., 2013[59]). Le projet ECHOES a également remis en question les conceptions admises sur la nature de l'autisme, particulièrement le prétendu « besoin d'uniformité », ce qui a conduit à d'autres recherches et explorations qui ont apporté une contribution théorique importante au domaine (Alcorn, 2016[39]). Il faut étudier et développer les deux types de systèmes, mais, en même temps, les chercheurs doivent savoir clairement où se situent leurs systèmes sur ce continuum.

Des systèmes intelligents pour tous

Une partie du problème de la conception en fonction de l'environnement d'utilisation consiste à comprendre les questions de coût et de disponibilité. De nombreuses technologies d'assistance sont beaucoup trop onéreuses pour les établissements publics et nécessitent un matériel spécialisé qui, dans bien des cas, est limité à un seul type d'usage. Les enfants ne peuvent donc pas avoir accès à des technologies qui pourraient leur apporter un soutien dans leur apprentissage. Pour que les technologies intelligentes aient un impact positif sur les élèves ayant des besoins spécifiques d'éducation à court terme, nous devons réfléchir à la meilleure façon de faire profiter les établissements scolaires des dernières avancées de l'IA, et ce de manière abordable et facilement accessible.

L'utilisation d'appareils à écran tactile, c'est-à-dire les Smartphones et les tablettes, est un moyen très prometteur d'y parvenir, et ce pour deux raisons. Tout d'abord, ces appareils sont disponibles sur le marché, sont raisonnablement abordables et multifonctionnels. Cela leur confère des avantages évidents comparés aux systèmes informatiques spécialisés et sur mesure qui sont développés pour un usage unique et qui sont généralement très coûteux (comme de nombreuses solutions concernant les élèves aveugles ou malvoyants). Ensuite, au-delà de leur puissance de traitement, les écrans tactiles modernes intègrent de nombreux capteurs qui offrent de multiples possibilités d'entrées et de sorties multimodales. Ils offrent des occasions de créer des expériences d'apprentissage nouvelles et innovantes pour les élèves ayant des besoins spécifiques, tout en veillant à ce qu'elles restent relativement peu coûteuses et largement disponibles.

Deux des études de cas présentées dans ce chapitre (pour la dysgraphie et l'accès aux informations graphiques respectivement) montrent très bien que c'est faisable. Dynamico repose sur une recherche scientifique robuste et utilise des algorithmes d'IA complexes qui peuvent fonctionner sur des tablettes disponibles dans le commerce. De plus, il utilise les capteurs intégrés à la tablette (p. ex., la pression) pour pouvoir analyser l'écriture d'un enfant et détecter la dysgraphie. Les chercheurs qui se sont penchés sur l'accès aux informations graphiques ont adopté la même approche, mais n'en sont cependant qu'à un stade encore précoce. Ils mènent aujourd'hui des recherches fondamentales afin de mieux comprendre comment les étudiants aveugles ou malvoyants comprennent et utilisent les graphiques présentés sur une tablette multisensorielle (Hahn, Mueller et Gorlewicz, 2019[60]), et soulignent que de nombreuses autres recherches seront nécessaires avant la création d'un produit commercial. Toutefois, leur objectif final est d'utiliser les capacités des écrans tactiles de manière innovante afin d'offrir des résultats multimodaux aux étudiants aveugles ou malvoyants (dans ce cas, une combinaison de rétroactions auditives et vibrotactiles).

La recherche sur l'exploitation des capacités sophistiquées des écrans tactiles modernes dans le but d'aider les élèves ayant un large éventail de besoins spécifiques, et ce par le biais de formes nouvelles et innovantes d'entrées de données et de résultats, semble être une voie très prometteuse.

La combinaison de l'intelligence humaine et artificielle

Baker (2016[61]) souligne que la mise au point de systèmes de tutorat intelligents était, au départ, guidée par la vision ambitieuse d'en faire des systèmes aussi compétents que les tuteurs humains, capables d'utiliser les mêmes stratégies que les tuteurs humains chevronnés, intégrant des savoirs sur la matière et sur la manière de l'enseigner. Alors qu'aujourd'hui de nombreux systèmes de tutorat intelligents sont mis en œuvre à grande échelle, des centaines de milliers d'élèves en bénéficiant (par exemple, Cognitive Tutor, ALEKS, Mindspark, et Alef), ils ne sont plus que des versions simplifiées de ce qui était prévu à l'origine.

Comme le remarque Baker, la rigidité est l'un des problèmes des interventions automatisées, c'est-à-dire que si une intervention ne fonctionne pas, le système a du mal à le reconnaître et à réagir en conséquence. Ces ruptures d'interaction ne passent pas inaperçues auprès des apprenants. Au cours d'une étude sur la façon dont des enfants percevaient un robot tuteur, humanoïde et empathique, Serholt (2019[62]) a constaté que les enfants qui avaient déjà interagi avec le robot se sont montrés plus critiques à l'égard du concept de la reconnaissance des émotions chez les robots que ceux qui n'avaient pas eu cette expérience. Un enfant a gentiment déclaré que les robots sociaux « pourraient devenir plus utiles à l'avenir, à condition de laisser encore [aux chercheurs/développeurs] quelques années de plus pour les mettre au point et les rendre plus humains » (Serholt, 2019, p. 95[62]). L'expérience de ECHOES est similaire : bien que les enfants n'aient pas été en mesure de le verbaliser, le fait qu'ils aient cessé de répondre à Andy aussi souvent laisse penser qu'ils avaient compris les limites de ses capacités d'interaction. De même, un certain nombre de leurs initiations envers Andy consistaient à lui offrir de l'aide lorsque, en raison de problèmes de planificateur, il ne se comportait pas comme prévu (par exemple, accomplissement de mauvais mouvements dans la tâche de tri, sortie de l'écran…).

Dans le même ordre d'idées, certains aspects de l'enseignement s'avèrent tout simplement plus faciles à effectuer pour les humains, du moins à l'heure actuelle. Ce point se révèle particulièrement vrai pour les élèves ayant des besoins spécifiques. Encadrer leur apprentissage est un art subtil et individuel : des enseignants et assistants pédagogiques compétents auront passé de nombreuses heures et dépensé des efforts considérables à se mettre en phase avec les compétences, les besoins, et les modes de communication particuliers de chaque enfant.

L'environnement de travail ECHOES en est une bonne illustration. La conception originale de ECHOES était beaucoup plus complexe, car il devait pouvoir percevoir les états émotionnels des enfants par le biais de la reconnaissance des émotions faciales, et devait suivre le mouvement des yeux et y répondre en conséquence. Dans les faits, ces deux fonctions se sont révélées problématiques. Les enfants bougeaient partout, avec beaucoup d'énergie dans certains cas, si bien que le système de suivi ne pouvait pas fonctionner correctement. Dans un système configuré pour privilégier l'exploration ludique, demander à un enfant de se tenir tranquille aurait semblé absurde. En outre, les recherches suggèrent que, tout comme les autistes peuvent avoir du mal à comprendre les expressions faciales des autres, les individus neurotypiques ont souvent du mal à comprendre les expressions faciales des autistes (Brewer et al., 2016[63]). Il semblait donc peu judicieux de se fier à un système automatisé, qui aurait été forcément construit dans une perspective neurotypique, pour détecter l'état émotionnel de l'enfant. Cet aspect était également important, plus généralement, dans la situation d'un enfant qui deviendrait particulièrement angoissé, au point de possiblement s'éloigner de l'écran, et de devenir indétectable, alors même qu'une intervention adéquate serait immédiatement nécessaire. Il était, par conséquent, essentiel de s'assurer que tout ce qui faisait partie de l'environnement n'avait pas le potentiel d'entraîner une détresse résultant d'une rupture dans l'interaction.

L'équipe de recherche a donc décidé d'utiliser l'intelligence du système ECHOES pour mettre en place des séquences interactives ludiques et motivantes avec un agent intelligent, ce que les enfants semblaient apprécier, et de faire en sorte que le système repose sur l'humain pour interpréter la signification des comportements des enfants et veiller à leur bien-être général pendant la séance.

Cette nouvelle vision des systèmes éducatifs intelligents combine le meilleur des intelligences humaine et artificielle afin qu'elles apportent un soutien des plus efficaces aux apprenants.

L'intelligence artificielle, dans sa forme actuelle, excelle à trouver des modèles à partir de données, ce que les humains font moins bien. L'accès à ces données a le potentiel d'améliorer l'enseignement et l'apprentissage. C'est la vision de Baker (2016[61]), où les systèmes éducatifs intelligents servent à fournir des données aux humains, qui peuvent les utiliser pour éclairer leurs décisions pédagogiques. Dynamico illustre bien l'utilisation de l'IA en ce sens, puisqu'il permet aux professionnels d'accéder à des données auparavant indisponibles, ce qui a permis, dans ce cas, d'améliorer la façon dont la dysgraphie peut être diagnostiquée ainsi que les moyens permettant de mieux accompagner les apprenants atteints de dysgraphie.

D'un autre côté, l'intelligence humaine convient beaucoup mieux dans des situations où les données ne sont pas toujours aussi tranchées. Par exemple, les enseignants œuvrant avec des enfants autistes ont une connaissance très spécialisée de l'autisme, et auront consacré des heures à développer une compréhension nuancée et approfondie de chaque enfant au fil du temps. Ils peuvent interpréter les signaux d'après le comportement de l'enfant, alors que des personnes ne connaissant pas l'enfant en seraient incapables. Ils sont à même de comprendre les déclencheurs spécifiques qui peuvent conduire à la détresse d'un enfant. Les enseignants seront probablement également sensibles à des gestes, comportements ou propos particuliers précurseurs d'un état de détresse chez l'enfant. Ils sont aussi susceptibles de savoir comment intervenir de manière à dédramatiser la situation et aider et rassurer l'enfant. Cependant, même si les enseignants sont les mieux placés pour offrir ce type d'aide, cela ne signifie pas que l'intelligence artificielle ne pourrait donner un aperçu de la manière singulière dont l'enfant interagit, permettant ainsi au praticien d'intervenir le plus efficacement possible.

Dans cette optique, une vision positive des technologies intelligentes dans le domaine de l'apprentissage serait de permettre l'utilisation de ces technologies dans le but d'optimiser l'orchestration complexe qu'implique le travail avec un enfant ayant des besoins spécifiques d'éducation. Même si les enseignants restent responsables de cette orchestration, les technologies intelligentes pourraient les renforcer de trois manières différentes :

1. en leur offrant l'aide nécessaire pour reconnaître les besoins en premier lieu (comme dans l'exemple de la dysgraphie exposé plus haut) ;
2. en fournissant aux enseignants et aux assistants pédagogiques des connaissances et observations sur l'enfant, qui pourraient les aider à guider l'enfant du mieux possible (comme discuté plus haut) ;
3. en leur fournissant un soutien adaptable à de multiples niveaux (décrit en détail ci-après).

Adaptabilité et personnalisation plus poussées

L'une des promesses de l'exploitation de l'intelligence artificielle dans le domaine de l'éducation est celle de l'adaptabilité, c'est-à-dire la capacité de s'adapter au niveau actuel de connaissances et/ou compétences de l'élève, mais aussi, dans certains cas, à son niveau actuel de motivation et/ou de disposition affective. Dans la plupart des cas, cette adaptabilité fonctionne au niveau de l'individu.

Outre l'adaptabilité au niveau de l'individu, le soutien apporté aux apprenants ayant des besoins spécifiques ouvre un espace unique dans lequel il est possible d'envisager des types supplémentaires de personnalisation et d'adaptation, qui pourraient s'accomplir grâce à une combinaison d'intelligences humaine et artificielle, comme détaillé ci-dessous.

Dans la description du système ECHOES présenté plus tôt, on expliquait que le système planificateur fonctionnait au niveau des activités pédagogiques individuelles au sein du système, tandis que le professionnel travaillait à un niveau plus élevé pour structurer l'ensemble de la séance, déterminant le choix des activités particulières, y compris leur durée et leur séquencement. Même si cela marche bien, il faut parfois personnaliser l'environnement avant de pouvoir l'utiliser dans un établissement donné. Andy, l'agent d'IA, communique avec les enfants grâce à la parole et aux gestes. Cependant, dans d'autres établissements, on utilise des phrases et des gestes clés différents, par exemple, pour indiquer aux enfants la fin d'une activité et les préparer, émotionnellement et cognitivement, à passer à l'étape suivante. Le discours et les gestes de l'agent doivent par conséquent être modifiés avant la mise en place d'ECHOES dans l'établissement. Bien que l'équipe de recherche soit en mesure de le faire puisqu'ils sont les développeurs du système, ce serait mieux si les établissements pouvaient bénéficier de cette option.

La personnalisation et l'adaptation dans un contexte de soutien aux apprenants ayant un handicap pourraient probablement se faire non seulement au niveau individuel, ce qui est normalement le cas pour les systèmes intelligents, mais aussi au niveau du handicap et de l'environnement scolaire particulier. Nous décrivons ces trois niveaux ci-dessous (en prenant des exemples issus du système ECHOES pour les illustrer) :

1. *Personnalisation au niveau du handicap* : ce niveau implique la personnalisation et l'adaptation de l'interaction en fonction de ce que nous connaissons du travail avec des types particuliers de handicaps. Dans le cas d'ECHOES, conçu pour des enfants autistes, cela signifie qu'il faut penser au rythme de l'interaction (la ralentir pour laisser à l'enfant le temps de réfléchir), au langage utilisé pour les instructions (c.-à-d., utiliser un langage simple et direct, ne pas reformuler les instructions), et décider du temps qu'il faut laisser à l'enfant pour traiter une instruction avant de la redonner. Cependant, ces décisions ont donné lieu à des paramètres fixes, intégrés à l'environnement, et il serait préférable que le praticien puisse les personnaliser.
2. *La personnalisation au niveau de l'établissement* : comme expliqué ci-dessus, il s'agit de la personnalisation au niveau du langage, des symboles et signes spécifiques à l'établissement.
3. *La personnalisation au niveau de l'enfant* : par exemple, ne pas utiliser certains sons, désactiver les expressions faciales de l'agent, supprimer des mots ou phrases clés qui peuvent être des déclencheurs.

Pouvoir fournir une personnalisation et une adaptation affinées pouvant être activées grâce à une combinaison d'intelligences humaine et artificielle, et qui englobent les connaissances existantes sur un handicap particulier, l'environnement scolaire élargi et l'enfant en particulier, augmente les chances que l'environnement se révèle réellement utile, et ce dans toute une série de situations.

En conclusion, les technologies intelligentes sont porteuses d'espoir, car elles offrent un soutien ciblé et plus sophistiqué aux apprenants ayant des besoins spécifiques. L'intégration des dernières avancées en matière d'intelligence artificielle, ainsi que de la compréhension actualisée des besoins spécifiques et du handicap, dans des technologies déjà disponibles et peu coûteuses pourrait changer la vie des apprenants du monde entier.

Remerciements

Le système ECHOES, présenté dans ce chapitre, est le résultat d'un vaste projet interinstitutionnel et interdisciplinaire. Outre l'auteur, l'équipe comprenait Kaska Porayska-Pomsta (chef de projet), Alyssa Alcorn, Katerina Avramides, Sandra Beale, Sara Bernardini, Mary Ellen Foster, Christopher Frauenberger, Karen Guldberg, Wendy Keay-Bright, Lila Kossyvaki, Oliver Lemon, Marilena Mademtzi,

Rachel Menzies, Helen Pain, Gnanathusharan Rajendran, Tim Smith, et Annalu Waller. Le projet ECHOES a été financé par ESRC/EPSRC, numéro de subvention du programme TRLP TEL : RES-139-25-0395.

Références

Alcorn, A. (2016), *Embedding novel and surprising elements in touch-screen games for children with autism: creating experiences « worth communicating about »*, PhD thesis, The University of Edinburgh. [39]

Alcorn, A., E. Ainger, V. Carisi, S. Martinioti, S. Petrovic, B.R. Schadenberg, T. Tavassoli et E. Pellicano (2019), « Educators' Views on Using Humanoid Robots With Autistic Learners in Special Education Settings in England », *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 6, http://dx.doi.org/10.3389/frobt.2019.00107. [58]

Alcorn, A., H. Pain et J. Good (2014), « Motivating children's initiations with novelty and surprise », *Proceedings of the 2014 conference on Interaction design and children*, http://dx.doi.org/10.1145/2593968.2610458. [40]

Alkhatlan, A. et J. Kalita (2018), *Intelligent Tutoring Systems: A Comprehensive Historical Survey with Recent Developments.*, rXiv preprint arXiv:1812.09628., https://arxiv.org/abs/1812.09628 (consulté le 26 février 2021). [6]

Asselborn, T., M. Chapatte et P. Dillenbourg (2020), « Extending the Spectrum of Dysgraphia: A Data Driven Strategy to Estimate Handwriting Quality », *Scientific Reports*, Vol. 10/1, http://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-60011-8. [44]

Asselborn, T., T. Gargot, Ł. Kidziński, W. Johal, D. Cohen, C. Jolly et P. Dillenbourg (2018), « Automated human-level diagnosis of dysgraphia using a consumer tablet », *npj Digital Medicine*, Vol. 1/1, http://dx.doi.org/10.1038/s41746-018-0049-x. [43]

Baker, R. (2016), "Stupid Tutoring Systems, *Intelligent Humans", International Journal of Artificial Intelligence in Education*, Vol. 26/2, pp. 600-614, http://dx.doi.org/10.1007/s40593-016-0105-0. [61]

Bauminger, N., C. Shulman et G. Agam (2004), « The Link Between Perceptions of Self and of Social Relationships in High-Functioning Children with Autism », *Journal of Developmental and Physical Disabilities*, Vol. 16/2, pp. 193-214, http://dx.doi.org/10.1023/b:jodd.0000026616.24896.c8. [34]

Benton, L. et H. Johnson (2015), « Widening participation in technology design: A review of the involvement of children with special educational needs and disabilities », *International Journal of Child-Computer Interaction*, Vol. 3-4, pp. 23-40, http://dx.doi.org/10.1016/j.ijcci.2015.07.001. [57]

Berton, R., A. Kolasinska, O. Gaggi, C. Palazzi et G. Quadrio (2020), « A Chrome extension to help people with dyslexia », *Proceedings of the International Conference on Advanced Visual Interfaces*, http://dx.doi.org/10.1145/3399715.3399843. [47]

Biotteau, M., J. Danna, E. Baudou, F. Puyjarinet, J. Velay, J. Albaret et Y. Chaix (2019), « Developmental coordination disorder and dysgraphia: signs and symptoms, diagnosis, and rehabilitation », *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, Vol. Volume 15, pp. 1873-1885, http://dx.doi.org/10.2147/ndt.s120514. [46]

Brewer, R., F. Biotti, C. Catmur, C. Press, F. Happé, R. Cook et G. Bird (2016), « Can Neurotypical Individuals Read Autistic Facial Expressions? Atypical Production of Emotional Facial Expressions in Autism Spectrum Disorders », *Autism Research*, Vol. 9/2, pp. 262-271, http://dx.doi.org/10.1002/aur.1508. [63]

Cappadocia, M., J. Weiss et D. Pepler (2012), « Bullying Experiences Among Children and Youth with Autism Spectrum Disorders », *Journal of Autism and Developmental Disorders*, Vol. 42/2, pp. 266-277, http://dx.doi.org/10.1007/s10803-011-1241-x. [32]

Chamberlain, B., C. Kasari et E. Rotheram-Fuller (2007), « Involvement or Isolation? The Social Networks of Children with Autism in Regular Classrooms », *Journal of Autism and Developmental Disorders*, Vol. 37/2, pp. 230-242, http://dx.doi.org/10.1007/s10803-006-0164-4. [31]

Chelkowski, L., Z. Yan et K. Asaro-Saddler (2019), « The use of mobile devices with students with disabilities: a literature review », *Preventing School Failure: Alternative Education for Children and Youth*, Vol. 63/3, pp. 277-295, http://dx.doi.org/10.1080/1045988x.2019.1591336. [1]

Cheng, S. et C. Lai (2020), « Facilitating learning for students with special needs: a review of technology-supported special education studies », *Journal of Computers in Education*, Vol. 7/2, pp. 131-153, http://dx.doi.org/10.1007/s40692-019-00150-8. [4]

Chen, L., P. Chen et Z. Lin (2020), « Artificial Intelligence in Education: A Review », *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 75264-75278, http://dx.doi.org/10.1109/access.2020.2988510. [7]

Cibrian, F., K. Lakes, A. Tavakoulnia, K. Guzman, S. Schuck et G. Hayes (2020), « Supporting Self-Regulation of Children with ADHD Using Wearables », *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, http://dx.doi.org/10.1145/3313831.3376837. [26]

Doan, M., F. Cibrian, A. Jang, N. Khare, S. Chang, A. Li, S. Schuck, K. Lakes et G. Hayes (2020), « CoolCraig: A Smart Watch/Phone Application Supporting Co-Regulation of Children with ADHD », *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, http://dx.doi.org/10.1145/3334480.3382991. [25]

Erdem, R. (2017), « Students with special educational needs and assistive technologies: A literature review », *Turkish Online Journal of Educational Technology-TOJET*, Vol. 16/1, pp. 128–146. [5]

Erfurt, G., E. Hornecker, J. Ehlers et S. Plasckies (2019), « Hands-On Math », *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, http://dx.doi.org/10.1145/3290607.3313012. [50]

Fan, M., A. Antle, M. Hoskyn, C. Neustaedter et E. Cramer (2017), « Why Tangibility Matters », *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, http://dx.doi.org/10.1145/3025453.3026048. [49]

Frauenberger, C., J. Good, A. Alcorn et H. Pain (2013), « Conversing through and about technologies: Design critique as an opportunity to engage children with autism and broaden research(er) perspectives », *International Journal of Child-Computer Interaction*, Vol. 1/2, pp. 38-49, http://dx.doi.org/10.1016/j.ijcci.2013.02.001. [38]

Frauenberger, C., J. Good et W. Keay-Bright (2011), « Designing technology for children with special needs: bridging perspectives through participatory design », *CoDesign*, Vol. 7/1, pp. 1-28, http://dx.doi.org/10.1080/15710882.2011.587013. [37]

Gelsomini, M., G. Cosentino, M. Spitale, M. Gianotti, D. Fisicaro, G. Leonardi, F. Riccardi, A. Piselli, E. Beccaluva, B. Bonadies, L. Di Terlizzi, M. Zinzone, S. Alberti, C. Rebourg, M. Carulli, F. Garzotto, V. Arquilla, M. Bisson, B. Del Curto et M. Bordegoni (2019), « Magika, a Multisensory Environment for Play, Education and Inclusion », *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, http://dx.doi.org/10.1145/3290607.3312753. [42]

Gorlewicz, J., J. Tennison, H. Palani et N. Giudice (2018), « The Graphical Access Challenge for People with Visual Impairments: Positions and Pathways Forward », dans *Interactive Multimedia - Multimedia Production and Digital Storytelling, IntechOpen*, http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.82289. [54]

Gorlewicz, J., J. Tennison, P. Merlin Uesbeck, M. Richard, H.P. Palani, A. Stefik, D. Smith et N. Guidice (2020), « Design Guidelines and Recommendations for Multimodal, Touchscreen-based Graphics », *ACM Transactions on Accessible Computing*, Vol. 13/3, pp. 1-30, http://dx.doi.org/10.1145/3403933. [56]

Hahn, M., C. Mueller et J. Gorlewicz (2019), « The Comprehension of STEM Graphics via a Multisensory Tablet Electronic Device by Students with Visual Impairments », *Journal of Visual Impairment & Blindness*, Vol. 113/5, pp. 404-418, http://dx.doi.org/10.1177/0145482x19876463. [60]

Holloway, L., M. Butler, S. Reinders et K. Marriott (2020), « Non-visual access to graphical information on COVID-19 », *The 22nd International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, http://dx.doi.org/10.1145/3373625.3418015. [53]

Houtrow, A., K. Larson, L. Olson, P. Newacheck et N. Halfon (2014), « Changing Trends of Childhood Disability, 2001-2011 », *PEDIATRICS*, Vol. 134/3, pp. 530-538, http://dx.doi.org/10.1542/peds.2014-0594. [12]

Kazimzade, G., Y. Patzer et N. Pinkwart (2019), « Artificial Intelligence in Education Meets Inclusive Educational Technology—The Technical State-of-the-Art and Possible Directions », in A*rtificial Intelligence and Inclusive Education, Perspectives on Rethinking and Reforming Education*, Springer Singapore, Singapore, http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-8161-4_4. [9]

Kulik, J. et J. Fletcher (2016), « Effectiveness of Intelligent Tutoring Systems », *Review of Educational Research*, Vol. 86/1, pp. 42-78, http://dx.doi.org/10.3102/0034654315581420. [8]

Kuo, M., G. Orsmond, E. Cohn et W. Coster (2013), « Friendship characteristics and activity patterns of adolescents with an autism spectrum disorder », *Autism*, Vol. 17/4, pp. 481–500, https://doi.org/10.1177/1362361311416380. [29]

Locke, J., E. Ishijima, C. Kasari et N. London (2010), « Loneliness, friendship quality and the social networks of adolescents with high-functioning autism in an inclusive school setting », *Journal of Research in Special Educational Needs*, Vol. 10/2, pp. 74-81, http://dx.doi.org/10.1111/j.1471-3802.2010.01148.x. [30]

Marks, D. (1997), « Models of disability », *Disability and Rehabilitation*, Vol. 19/3, pp. 85-91, http://dx.doi.org/10.3109/09638289709166831. [18]

McLeskey, J., M. Barringer, B. Billingsley, M. Brownell, D. Jackson, M. Kennedy, T. Lewis, L. Maheady, J. Rodriguez, M. Scheeler, J. Winn et D. Ziegler (2017), *High-leverage practices in special education.*, Arlington, VA: Council for Exceptional Children & CEEDAR Center. [3]

Metatla, O. (2017), « Uncovering Challenges and Opportunities of Including Children with Visual Impairments in Mainstream Schools », http://dx.doi.org/10.14236/ewic/hci2017.102. [51]

Metatla, O., M. Serrano, C. Jouffrais, A. Thieme, S. Kane, S. Branham, E. Brulé et C. Bennett (2018), « Inclusive Education Technologies », *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, http://dx.doi.org/10.1145/3170427.3170633. [55]

Mora-Guiard, J., C. Crowell, N. Pares et P. Heaton (2016), « Lands of Fog », *Proceedings of the The 15th International Conference on Interaction Design and Children*, http://dx.doi.org/10.1145/2930674.2930695. [41]

Müller, E., A. Schuler et G. Yates (2008), « Social challenges and supports from the perspective of individuals with Asperger syndrome and other autism spectrum disabilities », *Autism*, Vol. 12/2, pp. 173-190, http://dx.doi.org/10.1177/1362361307086664. [35]

National Autistic Society (2016), *The autism employment gap: Too Much Information in the workplace.*, https://www.basw.co.uk/resources/autism-employment-gap-too-much-information-workplace. [17]

National Autistic Society (2016), *What is autism?*, https://www.autism.org.uk/advice-and-guidance/what-is-autism (consulté le 29 juillet 2020). [28]

OECD (2000), *Inclusive Education at Work: Students with Disabilities in Mainstream Schools*, OECD Publishing, Paris, https://dx.doi.org/10.1787/9789264180383-en. [11]

Ok, M. et W. Kim (2017), « Use of iPads and iPods for Academic Performance and Engagement of PreK–12 Students with Disabilities: A Research Synthesis », *Exceptionality*, Vol. 25/1, pp. 54-75, http://dx.doi.org/10.1080/09362835.2016.1196446. [2]

Porayska-Pomsta, K., A. Alcorn, K. Avramides, S. Beale, S. Bernardini, M.E. Foster, C. Fraunberger, J. Good, K. Guldberg, W. Keay-Bright, L. Kossyvaki, O. Lemon, M. Mademtzi, R. Menzies, H. Pain, G. Rajendran, A. Waller, S. Wass et T.J. Smith (2018), « Blending Human and Artificial Intelligence to Support Autistic Children's Social Communication Skills », *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, Vol. 25/6, pp. 1-35, http://dx.doi.org/10.1145/3271484. [27]

Porayska-Pomsta, K., K. Anderson, S. Bernardini, K. Guldberg, T. Smith, L. Kossivaki, S. Hodgins et I. Lowe (2013), « Building an Intelligent, Authorable Serious Game for Autistic Children and Their Carers », dans *Lecture Notes in Computer Science, Advances in Computer Entertainment*, Springer International Publishing, Cham, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-03161-3_34. [59]

Prizant, B., A. Wetherby, E. Rubin, A. Laurent et P. Rydell (2006), *The SCERTS model: A comprehensive educational approach for children with autism spectrum disorders. Vol. 1.*, Paul H Brookes Publishing. [36]

Rello, L., M. Ballesteros, A. Ali, M. Serra, D. Alarcon Sanchez et J. Bigham (2016), « Dytective: Diagnosing Risk of Dyslexia with a Game », *Proceedings of the 10th EAI International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare*, http://dx.doi.org/10.4108/eai.16-5-2016.2263338. [48]

Rumney, H. et K. MacMahon (2017), « Do social skills interventions positively influence mood in children and young people with autism? A systematic review », *Mental Health & Prevention*, Vol. 5, pp. 12-20, http://dx.doi.org/10.1016/j.mhp.2016.12.001. [22]

Sayce, L. (1998), « Stigma, discrimination and social exclusion: What's in a word? », *Journal of Mental Health*, Vol. 7/4, pp. 331-343, http://dx.doi.org/10.1080/09638239817932. [19]

Serholt, S. (2019), « Interactions with an Empathic Robot Tutor in Education: Students' Perceptions Three Years Later », in *Artificial Intelligence and Inclusive Education, Perspectives on Rethinking and Reforming Education*, Springer Singapore, Singapore, http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-8161-4_5. [62]

Shilkrot, R., J. Huber, W.M. Ee, P. Maes et S. Chandima Nanayakkara (2015), « FingerReader », *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, http://dx.doi.org/10.1145/2702123.2702421. [52]

Singer, J. (1999), « Why can't you be normal for once in your life? From a problem with no name to the emergence of a new category of difference », *Disability Discourse*, pp. 59-70. [20]

Sonne, T. et M. Jensen (2016), « ChillFish: A Respiration Game for Children with ADHD », *Proceedings of the TEI '16: Tenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, http://dx.doi.org/10.1145/2839462.2839480. [23]

Sonne, T. et M. Jensen (2016), « Evaluating the ChillFish Biofeedback Game with Children with ADHD », *Proceedings of the The 15th International Conference on Interaction Design and Children*, http://dx.doi.org/10.1145/2930674.2935981. [24]

Spiel, K., C. Frauenberger, O. Keyes et G. Fitzpatrick (2019), « Agency of Autistic Children in Technology Research — A Critical Literature Review », *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, Vol. 26/6, pp. 1-40, http://dx.doi.org/10.1145/3344919. [21]

UNESCO Institute for Statistics (2018), *Education and disability: Analysis of data from 49 countries. Information Paper No. 49*, http://uis.unesco.org/sites/default/files/documents/ip49-education-disability-2018-en.pdf. [16]

Volkmar, F. et J. McPartland (2014), « From Kanner to DSM-5: Autism as an Evolving Diagnostic Concept », *Annual Review of Clinical Psychology*, Vol. 10/1, pp. 193-212, http://dx.doi.org/10.1146/annurev-clinpsy-032813-153710. [15]

Whitehouse, A., K. Durkin et E. Jaquet (2009), « Friendship, loneliness and depression in adolescents with Asperger's Syndrome », *Journal of Adolescence*, Vol. 32/2, pp. 309-322, http://dx.doi.org/10.1016/j.adolescence.2008.03.004. [33]

World Health Organization (2011), *World report on disability 2011*, https://www.who.int/disabilities/world_report/2011/report.pdf. [10]

Zablotsky, B. et L. Black (2020), *Prevalence of children aged 3–17 years with developmental disabilities, by urbanicity: United States, 2015–2018.*, Natl Health Stat Report. 2020 Feb;(139):1-7. PMID: 32510313., https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32510313/. [14]

Zablotsky, B., L. Black, M. Maenner, L. Scieve, M. Danielson, R. Bitsko, S. Blumberg, M. Kogan et C. Boyle (2019), « Prevalence and Trends of Developmental Disabilities among Children in the United States: 2009–2017 », *Pediatrics*, Vol. 144/4, pp. e20190811, http://dx.doi.org/10.1542/peds.2019-0811. [13]

Zolna, K., T. Asselborn, C. Jolly, L. Casteran, M.A. Nguyen-Morel, W. Johal et P. Dillenbourg (2019), « The dynamics of handwriting improves the automated diagnosis of dysgraphia », http://arXiv preprint arXiv:1906.07576. [45]

7 Les rôles des robots sociaux dans le domaine de l'éducation

Tony Belpaeme
Université de Gand, Belgique et Université de Plymouth, Royaume-Uni

Fumihide Tanaka
Université de Tsukuba, Japon

Les robots dans les systèmes éducatifs se divisent en deux catégories : les robots qui servent à enseigner et à insuffler de l'enthousiasme aux enfants dans les matières STIM, et, plus récemment, les robots enseignants. Si le potentiel pédagogique des robots dans les STIM a été largement étudié depuis les années 1970, les robots enseignants constituent une nouvelle technologie, issue des récents développements dans l'intelligence artificielle et la robotique. Ces robots font actuellement l'objet de recherches et d'essais de faisabilité. Ils assistent les enseignants dans leur tâche pédagogique en proposant aux élèves des expériences de tutorat spécifiques. Leur potentiel tient principalement à leur capacité d'offrir du tutorat individuel et une présence physique, celle ci ne faisant pas partie de l'apprentissage classique assisté par ordinateur. Bien qu'il n'existe pas encore sur le marché de robots destinés à l'éducation formelle, la recherche semble indiquer que les robots sociaux offrent des avantages que les solutions informatiques n'offrent pas. Leur nature physique se prête aux interactions avec les apprenants du monde réel, et leur présence sociale est plus grande, ce qui améliore les résultats d'apprentissage. Leur entrée dans les salles de classe se heurte, toutefois, à des difficultés techniques, économiques et logistiques.

Introduction

Les robots dans le monde de l'éducation sont généralement utilisés pour enseigner les matières STIM. Considérés à l'origine comme un moyen d'initier les élèves à la programmation et à la logique informatiques, ils sont maintenant également utilisés comme outils dans l'enseignement de l'électronique, de la conception mécanique, de la logique informatique, et même des arts, ainsi que pour mettre en pratique des compétences générales telles que le travail collaboratif et la négociation (Alnajjar et al., 2021[1]). Durant plus d'une cinquantaine d'années, l'utilisation de robots pour l'enseignement des STIM a fait l'objet de nombreuses études et leur efficacité est reconnue particulièrement en tant que catalyseurs dans l'enseignement d'une série de matières (Benitti, 2012[2]). Les robots comme outils d'apprentissage sont donc adoptés avec plus ou moins de succès dans l'enseignement primaire, secondaire et tertiaire.

Ces dernières années ont vu arriver une nouvelle application pour les robots éducatifs. Grâce aux progrès de la robotique et de l'intelligence artificielle, on explore désormais la possibilité d'utiliser les robots sociaux comme des assistants pédagogiques (Belpaeme et al., 2018[3]). On entend par robots sociaux, des robots qui interagissent avec les individus en utilisant les mêmes canaux d'interactions que pour la communication entre humains, à savoir la parole, les expressions faciales et le langage corporel. Ils ont souvent un aspect attrayant et leur logiciel est configuré pour maintenir le flux des interactions sociales. Bien que ces robots soient encore plutôt limités en termes de capacités d'interactions, ils sont efficaces dans les interactions restreintes et circonscrites (Bartneck et al., 2020[4] ; Breazeal, 2004[5] ; VanLehn, 2011[6]). Ces dernières années, de nombreuses recherches ont été effectuées dans le domaine de l'éducation démontrant que les robots ont un potentiel énorme dans le cadre de l'éducation formelle ou à domicile.

Dans ce chapitre, nous explorons ce que les robots peuvent apporter en tant que vecteurs d'éducation, mais aussi quelles sont leurs limites dans le domaine. Nous nous concentrons surtout sur deux types de robots : les robots sociaux qui sont destinés à fonctionner de manière autonome et à aider les enseignants à effectuer certaines tâches ; et les robots de téléprésence, issus d'un modèle hybride, dirigés à distance par les enseignants et qui incarnent l'enseignant dans la classe. Nous présentons tout d'abord certains des domaines d'application actuels, donnant quelques explications sur leur technologie, puis nous mettons en évidence les difficultés qui freinent leur adoption à grande échelle et soulignons que, s'ils peuvent s'avérer utiles aux enseignants, il est peu probable qu'ils les remplacent dans un avenir proche. Leur coût élevé peut aussi être un obstacle à leur implantation à grande échelle dans les systèmes éducatifs.

Pourquoi des robots comme professionnels de l'éducation ?

Les robots sociaux sont très intéressants sur bien des plans. Leur comportement réaliste et leur réactivité sociale nous fascinent, et cela n'est pas passé inaperçu auprès des professionnels de l'éducation. Au sens le plus élémentaire, les robots attirent un large public et peuvent être utilisés pour rendre l'enseignement plus intéressant. Mais outre cette attirance à court terme, le plus grand attrait des robots est peut-être qu'ils offrent la possibilité de prendre en charge certaines des tâches des enseignants. Si les ressources financières limitent le temps que les enseignants peuvent consacrer aux élèves, les robots sont assez bon marché et pourraient servir à enseigner et donner des cours à de petits groupes, idéalement, un robot tuteur pour chaque élève. Le tutorat, c'est-à-dire l'enseignement à un seul élève ou à un petit groupe d'entre eux, est l'une des formes les plus efficaces de l'enseignement. VanLehn (2011[6]) a constaté que le tutorat humain a une taille d'effet moyenne de $d = 0{,}79$ par rapport à l'enseignement en classe. L'enseignement assisté par ordinateur, et plus particulièrement les systèmes de tutorat intelligents (STI) au fonctionnement par étape, qui fournissent à l'apprenant un système d'enseignement personnalisé et des retours d'information affinés, peuvent atteindre un résultat similaire de $d = 0{,}76$ pour certaines matières (VanLehn, 2011[6]). On s'attend à ce que le robot opérant comme un professionnel de l'éducation atteigne un résultat analogue. Une récente étude montre que les premiers prototypes de robots ont obtenu des gains d'apprentissage de $d = 0{,}70$ lors de l'enseignement de matières allant du tutorat linguistique à l'enseignement de la gestion de la consommation énergétique dans une ville (Belpaeme et al., 2018[3]).

La capacité d'interaction sociale de ces robots est un élément clé de leur un rôle éducatif. Par leur apparence et leur logiciel, les robots sociaux sont optimisés pour dialoguer avec les humains d'une manière qui leur est naturelle. La plupart du temps, l'apparence des robots est agréable, avec ce qui ressemble à une tête, des yeux et une bouche évoquant la capacité du robot à voir, entendre et parler. Grâce à leur intelligence artificielle, ils sont à même d'interagir avec les individus : la détection et la reconnaissance faciale leur permettant de détecter et d'identifier des individus, la reconnaissance vocale leur servant à extraire les mots d'une interaction orale, et des modèles de dialogue et de synthèse vocale leur servant à converser (Bartneck et al., 2020[4]). De par leur interface naturelle, ils conviennent à un large éventail d'activités de tutorat, depuis le tutorat d'enfants pré-alphabètes jusqu'au tutorat linguistique reposant sur une interaction naturelle.

Si les logiciels d'apprentissage, comme les systèmes de tutorat intelligents, peuvent offrir un enseignement individuel et personnalisé, le robot apporte la présence sociale et physique qui manque à un système de tutorat intelligent classique. La recherche a démontré que cette présence sociale et physique entraîne des comportements davantage propices à l'apprentissage (Bainbridge et al., 2011[7] ; Li, 2015[8]). En présence de robots sociaux, les élèves sont plus attentifs, plus complaisants, et leur motivation est plus élevée. La raison probable en est que le cerveau humain réagit fortement aux stimulus sociaux, et même si les avatars à l'écran constituent, dans une

certaine mesure, une présence sociale, la nature plus concrète du robot amplifie ce phénomène et tous les effets qui en découlent. Cela peut paraître paradoxal, car l'une des critiques adressées à l'apprentissage assisté par ordinateur considère que les humains sont incapables de s'impliquer émotionnellement avec les machines : si les interactions avec les robots sont bien évidemment différentes de celles avec d'autres humains, elles déclenchent néanmoins des réponses sociales et créent des formes de connexion (Belpaeme et al., 2012[9]).

Les différents rôles des robots dans l'enseignement

Les robots peuvent avoir diverses attributions dans l'enseignement auprès des élèves ou dans leur accompagnement durant leur apprentissage. Dans le domaine de l'éducation, ils sont en général conçus et programmés pour jouer l'un (ou plusieurs) des rôles suivants : tuteur, enseignant (ou assistant pédagogique) et condisciple.

Le rôle le plus prometteur et pragmatique des robots sociaux en éducation est celui de *tuteur* (Kennedy, Baxter et Belpaeme, 2015[10] ; Leyzberg et al., 2012[11] ; Saerbeck et al., 2010[12]). À ce titre, le robot accompagne un seul apprenant ou un petit groupe d'élèves. Il peut accorder une attention individuelle et ce faisant décupler les capacités d'un enseignant dans une classe ordinaire. Il peut encadrer des enfants qui ont du retard ou en stimuler d'autres qui sont en avance, sans perturber les activités régulières de la classe. Il a une patience sans borne et peut répéter des sujets aussi longtemps que l'enseignant le permet. En outre, l'apprenant considère souvent que le robot ne porte pas de jugement (Bhakta, Savin-Baden et Tombs, 2014[13] ; Catlin, 2014[14]), ce qui élimine l'anxiété que déclenche fréquemment la nécessité de répondre à des questions en présence d'un tuteur ou d'un enseignant humain. L'Encadré 7.1 présente un exemple dans l'apprentissage des langues.

Le robot peut aussi remplir le rôle *d'enseignant* ou *d'assistant pédagogique* : dans ce cas, il se substitue à l'enseignant, en donnant le cours ou en fournissant une assistance durant le cours, par exemple. Le robot s'adresse alors à la classe plutôt qu'à un seul élève. Il peut contribuer aux tâches administratives, comme l'inscription des élèves, et peut se charger de tâches d'enseignement restreintes, comme d'annoncer le sujet du jour, vérifier les connaissances préalables, définir une tâche d'apprentissage, poser des questions à choix multiple, faire la synthèse des réponses et fournir des commentaires. Ce faisant, le robot libère du temps pour l'enseignant. C'est tout l'intérêt du robot qui, non seulement, libère l'enseignant de l'interaction en classe, lui permettant d'accorder une attention individuelle aux apprenants, mais offre des expériences que l'enseignant pourrait trouver difficiles à réaliser, comme la prononciation de langues étrangères. Toutefois, les robots ne sont utilisés, le plus souvent, que pour égayer un cours ou une activité en classe ; par exemple, à titre de partenaires de l'enseignant (Encadré 7.2).

Le robot a un rôle nouveau et particulièrement prometteur à jouer à titre de *condisciple apprenant* (Tanaka et Kimura, 2009[18] ; Tanaka et Matsuzoe, 2012[19] ; Hood, Lemaignan et Dillenbourg, 2015[20]). Dans cette situation, le robot est présenté comme un apprenant et les enfants sont invités à apprendre avec le robot ou bien on leur demande d'enseigner au robot. Cette méthode repose sur l'effet du « protégé » ou de l'apprentissage par l'enseignement, c'est-à-dire sur l'idée qu'en expliquant le matériel d'étude aux autres, l'élève renforce sa propre compréhension : le robot joue le rôle d'un « agent enseignable ». Dans ce modèle, il a été prouvé que les enfants consacrent plus de temps et d'efforts aux activités d'apprentissage et qu'ils apprennent davantage (Chase et al., 2009[21]). Cette méthode s'est avérée efficace dans l'apprentissage de matières aussi diverses que l'écriture (Lemaignan et al., 2016[22]) et la deuxième langue (Tanaka et Matsuzoe, 2012[19]). Son effet se ressent davantage chez les élèves plus faibles, et il est fort probable que le robot suscite une plus grande confiance en soi chez l'élève. Le robot étant un de leur condisciple dans la classe, les élèves les plus faibles ne le restent pas, car c'est plutôt le robot qui est plus faible et son besoin d'instruction rehausse le statut des enfants.

Outre l'enseignement, le robot peut aussi fournir un soutien *socioémotionnel*. Les robots sont généralement perçus comme ne portant pas de jugement et comme étant neutres, si bien que les individus échangeront souvent de l'information plus volontiers avec un robot qu'ils ne le feraient avec d'autres personnes. Ces échanges peuvent servir à discuter d'aspects personnels et à prodiguer des conseils sur la façon de gérer les problèmes. Le robot peut, si l'apprenant l'y autorise, partager des informations choisies avec les enseignants ou le personnel de soutien. Ainsi, cette possibilité s'est avérée très utile en pour lutter contre le harcèlement, une étude ayant démontré que les enfants révélaient davantage de cas de harcèlement à l'école en présence d'un robot que par le biais d'un formulaire anonyme (Bethel, Stevenson et Scassellati, 2011[23] ; Bethel et al., 2016[24]).

Encadré 7.1 Apprentissage d'une langue à l'aide d'un robot tuteur aux Pays-Bas

Le tutorat par robot dans l'apprentissage d'une langue, et plus précisément d'une deuxième langue, s'avère particulièrement prometteur. La langue maternelle s'acquiert à force d'interagir avec les parents, frères et sœurs et les pairs, au contraire de la deuxième langue, qui doit bien souvent s'apprendre dans le cadre d'une éducation formelle et dont le processus d'apprentissage est complètement différent de celui de l'acquisition de la langue maternelle. L'apprentissage d'une autre langue ne se fait pas grâce aux interactions, mais plutôt en apprenant par cœur des listes de vocabulaire et de règles grammaticales. Le manque de ressources est en grande partie la raison de ce contraste frappant dans le mode d'apprentissage. L'enseignant n'est pas en mesure d'échanger dans la langue cible avec chaque enfant de la classe, il est plutôt contraint de recourir à l'enseignement magistral. En outre, il peut même ne pas se sentir assez à l'aise dans la langue cible ou ne pas bien maîtriser tous les aspects de cette langue. Par exemple, les enseignants dont la langue maternelle est l'anglais auront souvent du mal avec la prononciation du français – et vice versa.

C'est en ce sens qu'un robot peut apporter une précieuse contribution (van den Berghe et al., 2019[15]). Il peut aider l'enfant à acquérir une deuxième langue pas seulement grâce au tutorat, mais aussi grâce à une véritable interaction dans la langue cible. Non seulement il peut donner des cours de langue, mais le robot est susceptible d'avoir un meilleur accent dans la langue cible que l'enseignant, car, de nos jours, les voix des ordinateurs modernes sont presque identiques à celles des humains. Par ailleurs, lorsqu'elles pratiquent à l'oral une nouvelle langue, de nombreuses personnes souffrent d'anxiété langagière, ce que le robot permet d'atténuer puisque les apprenants ne se sentent pas jugés.

Une récente étude a suivi des enfants néerlandais âgés de 5 ans au cours de leur apprentissage d'une deuxième langue à l'aide d'un robot social. Les jeunes élèves et le robot se retrouvaient autour d'une tablette sur laquelle s'affichaient de courtes histoires. Le robot racontait les histoires en néerlandais et en anglais, et apprenait aux enfants toute une série de mots, tels que des noms jusqu'à des concepts mathématiques, mais il leur enseignait également la grammaire par le jeu plutôt qu'en suivant un enseignement formel (Vogt et al., 2019[16]). Le but de l'étude était de vérifier l'efficacité des robots dans l'apprentissage précoce d'une deuxième langue et également de tester si les gestes effectués par le robot, par exemple l'imitation d'un coureur pour enseigner le verbe « courir », pouvaient accélérer l'apprentissage. Les enfants ont pu acquérir et retenir l'anglais enseigné par le robot tuteur tout aussi bien que si l'enseignement s'était fait à l'aide d'une application sur tablette. Cependant, ils ont progressé lentement dans l'ensemble. Lors de l'apprentissage avec le robot, qu'ils ont rencontré pendant 7 séances de 20 minutes, les enfants ont eu un test de compréhension de l'anglais et leur score n'était passé que de 3,47 à 7,69 sur un maximum de 34.

Graphique 7.1 Enseignement de l'anglais comme deuxième langue à l'aide d'un robot social

Source: Vogt et al. (2019[17]).

Encadré 7.2 Le robot partenaire dans un cours de langue en Iran

Un petit robot humanoïde, appelé Nima, aide les élèves d'un établissement de l'enseignement secondaire iranien pendant leurs cours d'anglais. Le robot agit comme un partenaire de l'enseignant, les deux se positionnant devant la classe. Le robot aide la classe composée uniquement de filles de 12 à 13 ans à s'exercer en anglais (Alemi, Meghdari et Ghazisaedy, 2014[25]), par exemple, en faisant des commentaires sur les exercices ou en montrant la bonne prononciation des mots et phrases en anglais. Pendant cinq semaines, un groupe de 30 étudiantes a suivi le programme officiel avec l'aide du robot assistant et de leur enseignante. Quand on a comparé un groupe équivalent de 16 élèves suivi uniquement par un enseignant, le groupe qui bénéficiait d'un robot assistant a fait preuve d'un gain et d'une rétention de vocabulaire plus élevés (la moyenne des élèves au prétest était de 13,45, et après 5 semaines, le groupe avec le robot avait une moyenne de 39,76 comparé à 30,50 pour le groupe de contrôle). Dans le même temps, le groupe qui avait un robot assistant a davantage aimé la matière, ce qui pourrait expliquer leur performance.

Graphique 7.2 Une classe avec un robot assistant

Source: Alemi, Meghdari et Ghazisaedy (2014[25]).

Les robots en tant que dispositifs de téléprésence dans l'enseignement et l'apprentissage

Les robots éducatifs sont configurés pour accomplir certaines tâches d'apprentissage par eux-mêmes. Si la plupart du temps ils sont toujours destinés à un environnement d'apprentissage contrôlé par les enseignants, ils sont souvent autonomes pour effectuer des tâches bien précises d'enseignement (ou d'apprentissage). L'utilisation des robots peut revêtir différentes formes, comme en témoignent les dispositifs de *téléprésence*, et ils peuvent posséder des fonctionnalités diverses. Le robot de téléprésence devient l'avatar de l'enseignant dans la classe.

Dans cette situation, un enseignant à distance contrôle le robot et fait participer les élèves. L'intelligence artificielle permettant de dispenser un enseignement à part entière n'étant pas encore disponible, les robots de téléprésence peuvent combler ce vide technologique. Le robot étant contrôlé par un enseignant humain, il peut faire face aux réponses et besoins parfois très variés des enfants, ce qu'un robot contrôlé par l'IA est dans l'impossibilité de faire pour l'instant. Il offre également aux apprenants une expertise et des compétences que leur enseignant local ne peut offrir, ou encore fait appel à l'expérience de personnes qui ne sont pas localement présentes ou qui désirent contribuer à l'enseignement de manière ponctuelle.

Les robots de téléprésence sont des robots qui sont commandés à distance par un opérateur humain et qui sont à même d'incarner la présence de l'opérateur sous la forme d'un avatar robotique. Ces robots peuvent avoir plusieurs avantages en optimisant les propriétés incarnées de l'avatar dans le domaine de l'éducation. Ce sujet a fait l'objet d'un regain d'attention en raison du risque de maladies infectieuses comme la COVID-19.

Les enseignants peuvent également avoir recours aux robots de téléprésence pour diriger des cours à distance ; le robot permet à l'enseignant d'avoir une bien meilleure perception de la classe qu'au cours d'une vidéoconférence traditionnelle. En effet, l'enseignant peut arbitrairement contrôler l'emplacement du robot et des capteurs (caméras, microphones, etc.) qui sont installés sur le robot avatar, alors que l'emplacement des capteurs est généralement fixe dans la vidéoconférence traditionnelle.

En outre, la présence de l'enseignant à distance se fait mieux sentir dans la classe lorsqu'un robot avatar est présent dans la classe. En général, le visage de l'enseignant est projeté sur la tête du robot. Un essai sur le terrain mené dans un établissement d'enseignement primaire public au Japon a révélé que les élèves ressentaient une forme de pression (c.-à-d. que l'atmosphère de la classe était maîtrisée) en présence d'un robot avatar dans la classe (Okamura et Tanaka, 2020[26]). Les élèves se sont montrés majoritairement favorables à cette pression, car elle empêchait toute distraction dans la classe en l'absence de l'enseignant humain.

Un autre avantage des robots de téléprésence est qu'un élève peut piloter un robot avatar. Un élève peut notamment participer aux activités de la classe d'un établissement éloigné (même dans un autre pays), ce qui constitue une bonne occasion d'apprendre à la fois diverses langues et d'expérimenter des cultures différentes. Dans un essai sur le terrain (Tanaka et al., 2013[27]), on a connecté deux classes d'établissements de l'enseignement primaire, une en Australie et l'autre au Japon, via un robot de téléprésence, et les élèves d'un établissement ont participé aux activités de l'autre (Graphique 7.3). Les enseignants des deux classes et les gestionnaires des établissements qui ont observé l'essai se sont montrés très sensibles à l'utilisation de cette technologie pour l'apprentissage des langues et des cultures. Cette fonctionnalité est aussi fréquemment mise en œuvre dans le cas d'élèves ayant une maladie de longue durée afin de maintenir le contact avec l'établissement (Encadré 7.4).

Encadré 7.3 Attending class via a telepresence robot in Norway and France

De nombreux robots de téléprésence ont été mis au point dans l'optique de permettre aux élèves atteints d'une longue maladie de maintenir leur lien avec leur établissement.

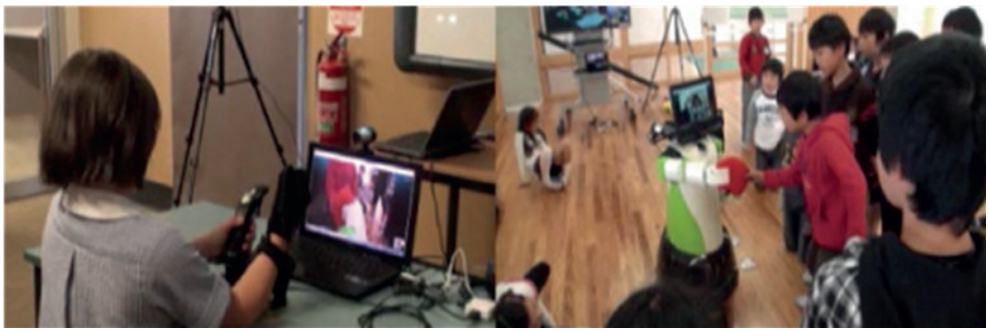
Ainsi, le robot AV1 mis au point par une start-up norvégienne, No Isolation, est un robot de téléprésence piloté par un élève. Lorsqu'un élève ne peut assister au cours en raison d'une maladie, AV1 peut prendre sa relève dans la classe. Le robot est équipé d'une caméra, d'un haut-parleur, d'un microphone, et d'une connexion internet permettant aux élèves à distance d'écouter, de voir et de parler dans la classe (en utilisant une application sur un Smartphone ou une tablette). Il leur est possible de regarder autour d'eux dans la classe, de lever la main pour demander la parole, de modifier l'expression des yeux du robot pour exprimer leurs émotions (p. ex., la confusion), et même de chuchoter à leur voisin de classe. L'utilisation du robot peut, bien sûr, être un moyen de rester en contact avec leurs amis en assistant à leurs anniversaires et autres rassemblements à distance.

En France, « Mon cartable connecté » est un robot de téléprésence destiné à prendre la place d'un élève dans la classe lorsque celui-ci est malade. Il est muni des mêmes dispositifs que le robot AV1 norvégien (caméra tournante, haut-parleur, microphone, connexion internet, et une appli sur tablette). Conçu dans le cadre d'une initiative sans but lucratif, ce robot de téléprésence a la forme d'un cartable classique, il a pour objectif de permettre aux élèves d'assister au cours et d'être en compagnie de leurs camarades, tout en évitant les mécanismes de substitution que les robots anthropomorphes pourraient générer.

De nombreux robots analogues ont été mis au point pour des usages semblables dans d'autres pays, comme PadBot Inbot de Technology Ltd. en Chine ; Ubbo de Axyn Robotique en France ; FURo-i de FuutureRobot en Corée ; Webot de Wicron Robotics et Swan Synergy de R.bot en Fédération de Russie ; Giraff de Giraff Technologies en Suède ; Kubi de Xandex, Beam de Blue Ocean Robotics, Carl et Teleporter de Orbis Robotics, Double 3 de Double Robotics aux États-Unis.

Source: AV1: Belton (2018[28]); et Anthony (2017[29]); Mon cartable connecté (s.d.[30]); Telepresencerobots (s.d.[31]).

Graphique 7.3 Des classes en Australie et au Japon connectées via un robot de téléprésence en temps réel



Source: Tanaka et al. (2013[27]).

Par ailleurs, une étude a constaté qu'un robot de téléprésence pouvait faciliter l'apprentissage d'une deuxième langue en face à face (Tanaka et al., 2014[32]). Dans ce cas, les élèves ont participé à un cours particulier piloté à distance par un locuteur dont c'est la langue maternelle par le biais d'une vidéoconférence classique. Cette situation s'est révélée un véritable défi pour certains apprenants qui se sont souvent figés, trop mal à l'aise pour s'exprimer dans cette deuxième langue. Par contre, en participant au cours grâce à un robot de téléprésence, ils ont réussi à communiquer avec l'enseignant à distance, non seulement oralement, mais aussi physiquement (c.-à-d. en utilisant le corps du robot avatar), ce qui leur a facilité l'apprentissage de la deuxième langue (Graphique 7.4). Grâce à la gestuelle et aux interactions rapprochées, les apprenants et les enseignants peuvent se détendre, ce qui débouche sur un apprentissage réactif entre eux (Tanaka et al., 2014[32]). En Corée, le robot Engkey, mis au point par l'Institut coréen des sciences et de la technologie, a été conçu pour faciliter l'apprentissage de l'anglais dans les établissements d'enseignement primaire : un enseignant à distance, dont le visage apparaît sur l'écran du robot, dirige le robot via un ordinateur. Les résultats de cette étude dans la ville de Daegu auprès de 29 classes montrent que le robot de téléprésence piloté par un locuteur de langue anglaise a amélioré les résultats des élèves, particulièrement à l'oral (Yun et al., 2011[33]).

Graphique 7.4 Un robot de téléprésence a facilité l'apprentissage d'une deuxième langue

Source: Tanaka et al. (2014[32]).

En complément des laboratoires à distance et virtuels dans le domaine des sciences, des robots de téléprésence sont testés pour réaliser des expériences scientifiques dans un laboratoire réel. Des chercheurs canadiens ont étudié l'utilisation d'un robot de téléprésence spécialement conçu dans une simulation de laboratoire intelligent afin de permettre aux étudiants de réaliser des travaux de laboratoire ou de terrain à distance. Ils ont mis au

point un prototype abordable (environ 350 USD) doté d'un bras avec 2 degrés de liberté ; les utilisateurs en ligne pouvaient facilement le diriger et les résultats de ce petit pilote ont montré une augmentation de la motivation des étudiants en ligne (Tan et al., 2019[34]).

Compte tenu des avantages énumérés jusqu'à maintenant, on peut imaginer que, dans des situations dangereuses impliquant la propagation de maladies infectieuses, par exemple, les élèves pourront, depuis leur domicile, participer à une classe grâce à un robot de téléprésence, et de ce fait pourront assister à des cours en toute sécurité. À l'heure actuelle, en raison des coûts élevés que cela représenterait, cette idée n'est pas réalisable dans le domaine de l'éducation. Cependant, de multiples opérateurs peuvent piloter un simple robot avatar (contrôle partagé), ce qui nécessite moins de robots avatars par rapport au nombre d'élèves. Il sera intéressant de tester si quelques robots avatars (p. ex., 2 ou 3) et un enseignant peuvent donner un cours à un plus grand nombre d'élèves (p. ex., 4-6 ou plus).

Grâce aux technologies permettant l'enseignement à distance, nous pourrions peut-être trouver de nouveaux enseignants. Ainsi, les personnes à la retraite qui ont les compétences et les savoirs nécessaires pourraient enseigner à des élèves depuis leur domicile (Graphique 7.5) (Okamura et Tanaka, 2016[35]). En introduisant les caractéristiques de l'IA telles que la détection des mots clés et la génération de dialogues pour faciliter la conversation intergénérationnelle entre les apprenants et ces enseignants chevronnés, un robot de téléprésence pourrait agir comme une interface intelligente en aidant ces enseignants à bien comprendre le statut des élèves éloignés et à faire cours de manière efficace.

Graphique 7.5 Des retraités peuvent faire cours depuis leur domicile grâce à un robot de téléprésence

Source: Okamura et Tanaka (2016[35]).

Efficacité des robots : âge et domaines d'apprentissage

Les robots semblent être efficaces auprès de nombreuses tranches d'âges. Si la grande majorité des recherches portent sur les enfants âgés de 6 à 12 ans, les robots se sont avérés efficaces pour d'autres tranches d'âges également. Ils se sont montrés utiles dans les cours de langues des classes préscolaires (Gordon et al., 2016[36] ; Vogt et al., 2019[16]), mais se sont avérés également efficaces dans l'enseignement supérieur (Weber et Zeaiter, 2018[37]). On a longtemps cru que les robots auraient une plus grande efficacité à l'âge où les enfants montrent encore une « suspension de l'incrédulité », mais il est de plus en plus évident que l'usage des robots sociaux est convaincant à tous les âges. Une configuration adéquate du robot et une expérience d'interaction adaptée à l'âge de l'apprenant suffisent. Cependant, créer des robots pour des apprenants plus âgés s'est révélé plus complexe sur le plan technique, car leurs exigences sont plus élevées quant aux habiletés du robot (Beran et al., 2011[38]). Les enfants plus jeunes acceptent que les robots mènent l'interaction et la maintiennent dans la bonne direction, et continueront à croire que le robot est social. Les apprenants plus âgés sont davantage susceptibles de vouloir une interaction plus diversifiée et plus spontanée, ce qui représente un défi technique difficile à relever.

Les robots dans leur rôle de professionnels de l'éducation fonctionnent mieux dans des matières qui sont relativement restreintes et lorsque leur contribution est bien définie. L'une des raisons à cela est que le traitement

des signaux sociaux, sous-branche de l'intelligence artificielle qui tente d'interpréter l'environnement social (Vinciarelli, Pantic et Bourlard, 2009[39]), ne peut pour l'instant que gérer des signaux sociaux plutôt explicites, comme des expressions faciales ou gestes marqués. Les technologies sont impressionnantes dans leur capacité à transcrire et comprendre le langage parlé et les signaux sociaux non verbaux, à comprendre les intentions des individus, et à donner les réponses adéquates, mais elles ont souvent du mal à interpréter les interactions sociales dans le contexte. Cependant, un traitement de signaux sociaux bien rodé est nécessaire pour offrir une expérience interactive similaire à celle offerte par l'enseignant humain. Cela signifie, par exemple, que les robots pour l'instant sont dans l'incapacité de s'engager dans des dialogues improvisés : si elle peut transcrire du langage parlé en langage écrit, l'intelligence artificielle peine à accéder à la signification de ce qui est dit et, sans cela, elle ne peut formuler la réponse qui convient. C'est la raison pour laquelle la technologie vocale nous demande d'utiliser des commandes courtes et structurées, et qu'elle a du mal pour l'instant avec le langage parlé long et sans limites. Toutefois, lorsque les contraintes appropriées sur l'environnement d'apprentissage sont en place, les robots peuvent apporter un soutien dans un grand nombre de matières. Souvent, le robot est assorti d'un écran, qui ne sert pas seulement à afficher du contenu pédagogique, mais sert également de dispositif de saisie par lequel l'apprenant peut entrer des réponses ou sélectionner des exercices, ce qui évite au robot de devoir comprendre les entrées verbales.

Les matières qui reposent sur les connaissances, où l'apprentissage par cœur est important, comme la géographie, les langues avec leur vocabulaire, ou la science dans des petites classes, se prêtent bien au tutorat par robot. La nature répétitive de ce type d'apprentissage et la relative facilité avec laquelle les sujets peuvent être enseignés et testés en font des matières adaptées à l'enseignement assisté par ordinateur et par robot. Ces matières étant bien structurées, il est facile de tester le niveau de l'apprenant par le biais d'une évaluation formative ou des questions pour que le robot adapte son tutorat d'après les résultats.

Les matières qui font appel aux compétences comme la lecture et les mathématiques se prêtent également relativement bien au tutorat d'un robot. En raison d'une forte composante visuelle, les exercices dans ces matières sont souvent affichés sur un écran d'ordinateur, et le robot offre encouragement et soutien pendant l'apprentissage. Le robot s'adapte au profil et aux progrès de l'apprenant et lui prodigue des conseils, des encouragements et de l'aide au moment opportun. Comme pour les systèmes de tutorat intelligents, l'accompagnement se doit d'être équilibré. Un soutien omniprésent mène souvent à une trop grande dépendance de l'élève à la fonction d'aide du système (Aleven et al., 2003[40]), mais les robots peuvent activement modeler les comportements de recherche d'aide de l'apprenant (Ramachandran, Litoiu et Scassellati, 2016[41]).

De même, les robots se sont révélés prometteurs en matière de tutorat dans le domaine affectif. Cette caractéristique peut s'appliquer directement à l'éducation, comme dans le cas où le robot encourage les apprenants à faire plus d'exercices ou à s'entraîner à la maison (Kennedy et al., 2016[42]). Ils peuvent, par ailleurs, servir à enseigner et renforcer les compétences comportementales et les compétences sociales. Ainsi, les robots sont connus pour leur efficacité dans la pratique des compétences sociales chez les enfants atteints de troubles du spectre autistique (Robins et al., 2004[43] ; Scassellati, 2007[44]). Dans ce cas, le robot met en œuvre l'analyse comportementale appliquée, une approche thérapeutique dans laquelle les compétences sociales sont internalisées par une pratique répétée.

Le tutorat par robot prend tout son sens dans le domaine des compétences physiques, telles que les compétences motrices ou la rééducation physique. Dans ce cas, le robot fait la démonstration et accompagne le processus d'apprentissage. On a utilisé un robot social pour enseigner l'écriture à des enfants entre 6 et 8 ans. Pour ce faire, on a recouru à l'apprentissage par les pairs : on a dit aux enfants que le robot écrivait très mal et on leur a demandé de montrer au robot comment écrire correctement. Lorsque le robot s'est amélioré, les élèves qui écrivaient le plus mal ont vu, eux aussi, leur écriture s'améliorer (Hood, Lemaignan et Dillenbourg, 2015[20] ; Zhexenova et al., 2020[45]) (Encadré 7.4).

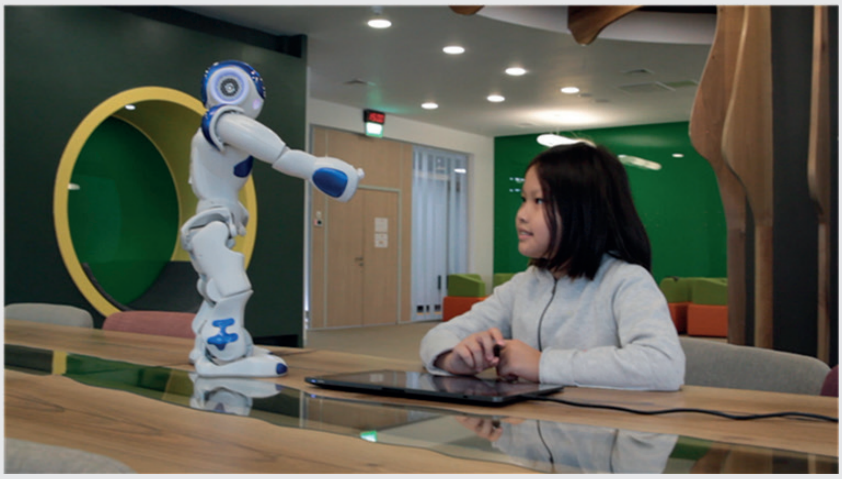
Le domaine d'apprentissage qui présente le plus de difficultés, mais aussi celui où le tutorat par robot est susceptible d'être des plus profitables, est celui où le robot s'appuie sur une interaction sociale sans contrainte pour enseigner. L'apprentissage des langues en est un excellent exemple, puisqu'il s'agit d'interagir oralement dans la langue cible, ce qui peut se faire à l'aide d'un robot. Ces robots seraient également capables d'offrir un soutien au-delà de l'enseignement formel, et pourraient ainsi proposer un accompagnement psychosocial.

Toutefois, les défis techniques liés à l'interaction être humain-machine sans contrainte laissent présager qu'il faudra attendre des décennies avant que cette application ne soit prête. Comme déjà mentionné, en attendant, les robots de téléprésence pilotés par des humains peuvent combler le vide.

Encadré 7.4 Des robots pour développer des compétences en écriture au Kazakhstan

Le gouvernement du Kazakhstan a décidé, en 2017, de passer de l'écriture cyrillique à l'écriture latine pour toutes les communications gouvernementales et en éducation. La transition se déroulera sur une période de sept ans, et le rôle de l'éducation formelle est essentiel dans ce processus. Une équipe de chercheurs s'est penchée sur l'aide que les robots pouvaient apporter dans l'apprentissage de ce tout nouveau système d'écriture. Ils ont opté pour une approche « d'apprentissage par l'enseignement », par laquelle les enfants enseignent au robot. Même si l'approche robotique atteint des résultats similaires à ceux de l'apprentissage à l'aide d'une tablette ou d'un enseignant, le robot présente des avantages considérables lorsqu'il s'agit de renforcer la motivation des enfants, et il s'est avéré la méthode d'apprentissage préférée (Zhexenova et al., 2020[45]).

Graphique 7.6 Configuration expérimentale



Source: Zhexenova et al. (2020[45]).

Les aspects techniques des robots en éducation

La forme et la taille des robots tuteurs sont très diverses, du simple robot de 10 cm de haut jusqu'au grand robot à l'aspect humain. C'est souvent leur application et leur public cible qui déterminent lesquels conviennent le mieux : un robot de petite taille pour les jeunes enfants, mais un robot qui s'adresse à un amphithéâtre composé d'étudiants adultes peut avoir besoin de plus d'autorité et devra donc être plus grand et avoir une apparence humaine. L'apparence du robot ne semble pas avoir d'influence sur les résultats d'apprentissage : la recherche montre que l'aspect humain des robots n'a pas forcément une meilleure incidence sur les résultats d'apprentissage, au contraire de la présentation et de la présence sociale du robot qui, elles, sont essentielles dans les résultats. Une méta-analyse (Belpaeme et al., 2018[3]), par exemple, a montré que des robots de la taille d'un jouet, tels que le robot Keep On qui fait 15 cm de haut, peuvent obtenir des résultats d'apprentissage comparables à ceux de robots humanoïdes plus coûteux (comme le robot dans l'Encadré 7.4).

Dans sa forme la plus simple, le robot social a des capacités interactives très limitées. Il exécute des scripts simples en réponse à des entrées minimales, telles que des pressions sur des touches ou des saisies sur une

tablette. À partir de là, le robot peut moduler l'interaction en fonction de la performance de l'apprenant. Il peut créer un modèle de parcours d'apprentissage de l'apprenant grâce aux résultats de tests. C'est ce modèle qui sert ensuite à configurer l'interaction, comme c'est déjà le cas avec les systèmes de tutorat intelligents. Au cours des dernières années, on a surtout utilisé les techniques d'apprentissage automatique pour créer des modèles détaillés des performances de l'élève et prévoir les réponses du robot qui seront davantage susceptibles d'améliorer l'apprentissage (Schodde, Bergmann et Kopp, 2017[46] ; Spaulding, Gordon et Breazeal, 2016[47]). Ainsi, les robots peuvent proposer à l'apprenant des exercices et du matériel suffisamment difficiles sans qu'ils soient rébarbatifs. Les robots sociaux sont également capables de fournir des encouragements ou de l'empathie en cas de mauvaise réponse. Pour ce faire, ils ne nécessitent qu'un minimum d'informations telles que les réponses données et le moment où elles ont été données. Ces fonctions sont disponibles depuis un certain temps dans les logiciels éducatifs, mais c'est seulement maintenant qu'elles font leur apparition dans les robots sociaux du commerce.

Toutefois, par-delà l'adaptation de l'enseignement à l'apprenant, on estime que les robots sociaux déploient toute une gamme de réponses sociales à l'appui de leur fonctionnalité éducative. L'un des éléments de cette plus grande réceptivité sociale est le recours aux informations personnelles (Molenaar, 2021[48]). Non seulement le robot adapte son enseignement ou ses questionnaires à l'apprenant individuel, mais il stocke et rappelle également des informations personnelles. Il peut s'agir de l'utilisation du nom de l'apprenant ou de la mémorisation d'éléments familiaux et de ses loisirs, en passant par l'adaptation de son comportement à la personnalité de l'apprenant. Des études ont démontré que les élèves s'attachent aux robots qui font un usage adéquat des informations personnelles (Belpaeme et al., 2012[9]), et que l'impact en était positif sur les résultats d'apprentissage et la motivation. Baxter et al. (2017[49]) ont testé des robots sociaux dans les classes de deux établissements de l'enseignement primaire au Royaume-Uni, durant deux mois. Les robots ont endossé le rôle de camarades d'apprentissage dans des matières aussi bien familières que nouvelles. Un robot a personnalisé ses réponses en utilisant le prénom des enfants lorsqu'il s'adressait à eux et en adaptant sa personnalité pour qu'elle corresponde à celle de chaque enfant, ce qui n'a pas été le cas de l'autre robot. Les résultats ont montré que les élèves apprenaient davantage dans les nouvelles matières lorsqu'il y avait des interactions avec le robot au comportement personnalisé, et que cet avantage semblait s'étendre à d'autres réalisations en classe auxquelles le robot ne participait pas. L'étude a également constaté une meilleure acceptation du robot personnalisé par rapport à une version non personnalisée.

Finalement, pour qu'il y ait une interaction sociale complète, il faut que le robot puisse interpréter les signaux sociaux verbaux et non verbaux et y répondre en conséquence. Certains éléments n'impliquent pas de difficultés techniques : un robot peut utiliser sa caméra pour détecter les individus et réagir à leur présence, il peut établir un contact visuel et lire des émotions simples. La reconnaissance vocale, c'est-à-dire la transcription de la parole en langage écrit, est bien avancée et, bien qu'elle ne fonctionne pas encore très bien auprès de jeunes utilisateurs, la technologie a suffisamment progressé pour que le robot reconnaisse des réponses orales. Elle fonctionne dans une interaction orale simple alternée, par exemple, le robot pose une question à choix multiple et écoute la réponse orale.

Toutefois, le dialogue sans contrainte reste techniquement impossible. Pour cela, le robot aurait besoin non seulement de transcrire les paroles, mais aussi de comprendre ce qui est dit en plus de formuler la réponse appropriée. Cela ne peut se faire que dans des contextes d'interaction limités, mais l'état d'avancement des technologies ne permet pas encore de gérer un dialogue plus spontané entre un utilisateur et un robot. Néanmoins, cette capacité et autres compétences sociales pourraient produire un robot social très persuasif et efficace en général, ce qui aurait de grandes implications pour la mise en œuvre de ces robots sociaux, notamment dans le paysage éducatif.

Attitudes des enseignants

L'attitude des enseignants est un indicateur fort de l'utilisation des technologies dans la classe, une attitude positive envers les robots constituant un élément déterminant pour l'adoption des robots sociaux dans les systèmes éducatifs. Les études ont constaté que les professionnels de l'enseignement ont des attitudes variées envers l'utilisation de robots sociaux en éducation, mais que beaucoup d'entre eux émettent des réserves quant à leur introduction dans la classe (Kennedy, Lemaignan et Belpaeme, 2016[50] ; Kim et Lee, 2015[51] ; Reich-Stiebert et Eyssel, 2016[52] ; Serholt et al., 2014[53]).

Les enseignants dont l'attitude à l'égard des technologies en général est plus positive, portent également, sans surprise, un regard plus positif sur les robots en éducation. Ils estiment, par ailleurs, que les robots sont efficaces dans les activités d'enseignement des sciences, de la technologie, de l'ingénierie et des mathématiques (STIM),

mais ils ne pensent pas que d'autres domaines, tels que les compétences sociales ou les langues, se prêtent à l'utilisation des robots. Une étude menée auprès d'enseignants d'établissements primaires au Royaume-Uni (Kennedy, Lemaignan et Belpaeme, 2016[50]) a observé que 57 % des enseignants estimaient que les robots pouvaient les assister dans les STIM, mais seulement 13 % pensaient que les robots convenaient pour enseigner les sciences humaines et les arts. La raison en est peut-être que les enseignants considèrent les robots comme des dispositifs et des outils d'apprentissage plutôt que comme des robots ayant un rôle éducatif à jouer.

Des études sur les préoccupations des enseignants à l'égard de l'utilisation des robots ont fait ressortir les principales craintes suivantes :

- Perturbation potentielle des activités de la classe : c'est-à-dire que le robot détourne les élèves du cours plutôt que d'apporter son assistance au cours.
- Équité d'accès : en particulier si les robots se font rares, ce sont les élèves qui en ont le plus besoin qui doivent en bénéficier et non les apprenants privilégiés. Le coût est une vraie question : si les robots coûtent chers, ils ne bénéficieront qu'aux apprenants et établissements ayant des moyens financiers suffisants.
- Le robot pourrait peser davantage sur la charge de travail des enseignants. Un robot qui sert d'assistant pédagogique dans la classe devrait être facile d'utilisation et demander un minimum d'effort en termes d'installation, de pilotage et de rangement.
- Finalement, la crainte souvent exprimée était le risque que les robots sociaux aient une influence négative sur les relations interpersonnelles et exacerbent l'isolement social. Par leurs interactions simplistes, leur manque d'empathie et de souplesse, les robots pourraient également imposer un style « robotique » dans les interactions au sein de la classe, ce qui aurait des conséquences négatives sur les jeunes élèves.

Il est important de noter, toutefois, que ces résultats sont tirés d'enquêtes complétées par des enseignants qui n'ont jamais eu accès à des robots sociaux ou à des robots servant d'assistants pédagogiques. Ainsi, les réponses sont empreintes d'idées préconçues insufflées par les médias populaires et la science-fiction, et peuvent ne pas refléter les attitudes futures. Quelques rares cas suggèrent que les enseignants qui ont travaillé avec des robots sociaux en classe sont généralement très ouverts quant à la mise en œuvre potentielle de robots enseignants.

Curieusement, dans toutes les enquêtes, la perte d'emploi ne semble pas très préoccupante, voire pas du tout : les enseignants ne pensent pas que les robots remplaceront le travail humain, mais ils les considèrent plutôt comme une aide technologique dans leur profession.

Certaines préoccupations sont légitimes, d'autres le sont moins. Par exemple, si la crainte concernant les interactions de type robot, à savoir leur manque de profondeur et de chaleur, est actuellement légitime, l'idée que les enfants (et les adultes) ne peuvent s'impliquer dans des interactions émotionnelles avec les robots est en réalité fausse. Les études ont démontré que les enfants et les adultes nouent facilement des liens émotionnels avec les robots et que ceux-ci peuvent s'avérer une aide constructive (Belpaeme et al., 2012[9]). Comme mentionné ci-dessus, les robots peuvent aider à résoudre des problèmes socioémotionnels, et la recherche a constaté que, si les enfants comprennent leurs limites et qu'ils ne sont que des machines, cela ne les empêche pas d'« aimer » un robot bien conçu (van Straten, Peter et Kühne, 2020[54]).

Les questions relatives à la charge de travail, aux perturbations, à la maintenance technique et à la distraction sont des préoccupations légitimes que les chercheurs et les développeurs de la robotique éducative doivent prendre en compte dans la conception de leurs robots. Les recherches et les expérimentations doivent continuer afin d'améliorer et de rendre le plus efficace possible l'utilisation des robots sociaux et de téléprésence dans le domaine de l'éducation.

Les offres du marché

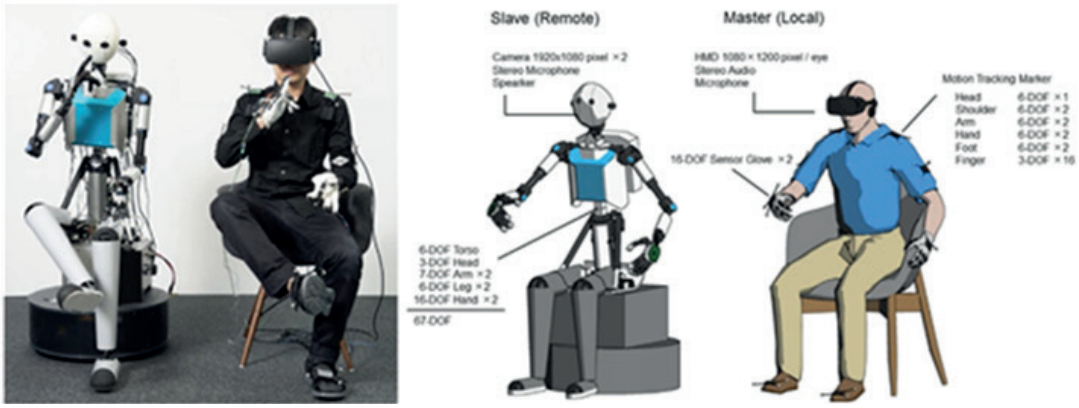
Les préoccupations du milieu éducatif quant au coût et à l'accessibilité sont légitimes.

À l'heure actuelle, les robots sociaux destinés à l'éducation sont peu nombreux sur le marché. Certains produits sont destinés au marché ludo-éducatif. Vanté comme étant un compagnon d'apprentissage câlin s'adressant aux enfants de 6 à 36 mois, le nounours interactif Cody The Smart Cub, de Vtech Playtime, se contente de jouer des énoncés et des chansons enregistrées qui peuvent être adaptés à l'enfant. Le robot éducatif WEDRAW est un stylo traceur parlant, destiné aux enfants entre 3 et 8 ans, qui peut dessiner sur du papier et dans lequel des contenus

sont déjà installés comme des formes, des figures et des chiffres. Des technologies encore plus pointues existent également comme les robots Nao et Pepper, de Softbank Robotics, que le fabricant présente comme des « robots éducatifs ». Par exemple, une application éducative pour l'apprentissage de l'anglais a été commercialisée avec le robot Pepper (Tanaka et al., 2015[55]).

Quant aux robots de téléprésence, ils sont disponibles à des prix inférieurs à 1 000 USD. Cependant, ces robots de téléprésence abordables ont des capacités limitées en termes de capteurs, d'actionneurs et d'interfaces de contrôle. Les derniers systèmes d'avatars à distance sont équipés de capteurs, d'actionneurs et d'interfaces de réalité virtuelle plus performants (pour les opérateurs de robots), ce qui les rend plus coûteux. Les futurs robots de téléprésence à vocation éducative coûteront donc probablement plus cher que ceux sur le marché actuel. La série TELESAR figure parmi les systèmes de « télexistence » les plus pointus, et a une longue histoire de recherche et développement menés par Susumu Tachi et ses collègues, qui remonte aux années 1980 (Tachi, 2015[56]). Le système TELESAR VI (Graphique 7.7) comprend un avatar à distance ayant 67 degrés de liberté pour accomplir des mouvements de type humain. En principe, le système peut également être équipé de dispositifs sensoriels étoffés, dont la vision, l'audio, et le toucher. Bien que ces systèmes résultent de la recherche de pointe et sont très coûteux aujourd'hui, la recherche nous permet d'envisager les orientations futures en éducation à distance, notamment avec des robots de téléprésence aux comportements de plus en plus complexes en classe.

Graphique 7.7 Le TELESAR VI. (2019)



Source: Courtoisie du Professeur Tachi,

La principale limite au succès commercial de ces robots est double. D'une part, il faut que l'offre et la demande soient importantes. C'est l'éternel problème de l'œuf et de la poule. Sans demande pour des robots tuteurs, il n'y a aucun intérêt commercial à développer ces systèmes, et vice versa. Il faut écrire des logiciels et des contenus (offre) pour que ces robots plaisent aux acheteurs, qu'il s'agisse de familles ou d'établissements d'enseignement (demande). À l'heure actuelle, l'investissement public et privé fait défaut, car la plupart des fournisseurs de contenus sont réfractaires à l'idée de créer des contenus pour des robots à usage éducatif. D'autre part, les robots sociaux en éducation ont besoin de processus et d'écosystème appropriés avant que leur mise en œuvre réussisse et qu'il y ait une demande viable. Aujourd'hui, il existe un vide dans la pratique pédagogique et dans les programmes de formation des enseignants, ce qui empêche l'utilisation de robots en éducation – même pour ceux qui sont déjà disponibles.

C'est le problème de l'œuf et de la poule : les développeurs de contenus et les fabricants de robots retiennent leurs investissements dans ces nouvelles technologies tant que le marché ne se développe pas, et la commercialisation de ces technologies se fait très lentement en raison du peu de disponibilité de contenus et matériels abordables. Pourtant, certains « convaincus » se sont déjà lancés. Certains établissements scolaires ont investi dans l'achat d'un ou de plusieurs robots sociaux qui sont utilisés dans des aspects limités du programme d'enseignement, tels que l'enseignement de l'anglais à des élèves d'un établissement japonais.

Perspectives d'avenir

La disponibilité des robots jouant le rôle d'enseignants ou de tuteurs est limitée sur le marché, et ce n'est probablement pas près de changer. Cette technologie est en compétition avec d'autres outils technologiques éducatifs utilisés dans les classes et, alors que la recherche a montré que les robots présentent un réel avantage dans le rendement éducatif par rapport aux technologies sur écran, rien ne laisse présager que cela suffira à convaincre les entreprises de technologies et les établissements scolaires d'investir dans des robots pour assister les enseignants. En conséquence, nous devons adopter une perspective à long terme et nous ignorons encore comment la technologie va évoluer et comment elle s'intégrera dans l'enseignement ordinaire.

Si la recherche se concentre sur les robots qui ont une apparence robotique évidente, avec une tête, des yeux et une bouche, il est tout aussi probable que certains aspects de la technologie seront d'abord intégrés sur d'autres appareils, tels que les assistants vocaux numériques, qui manquent nettement de caractéristiques sociales visuelles. Les composants techniques, tels que la perception des émotions ou la modélisation adaptée à l'apprenant, sont susceptibles de se retrouver dans d'autres technologies éducatives et ne sont pas propres aux robots.

D'aucuns ont évoqué leur préoccupation quant à la possibilité que les robots en éducation aggravent la fracture numérique. Il y a encore des réserves à propos de l'inégalité d'accès aux technologies pédagogiques, qu'il s'agisse de l'accès à internet haut débit ou à des ordinateurs et des logiciels EdTech, ou encore de différences dans l'adoption des technologies numériques en fonction de l'origine ethnique, du sexe, du milieu socio-économique et des régions géographiques. Puisque les robots destinés à l'éducation seront, dans un avenir prévisible, une technologie exclusive, les premiers à les adopter seront probablement les établissements d'enseignement et les familles qui en ont les moyens. Bien que cette évolution soit typique du cycle de vie de l'innovation et qu'elle soit généralement suivie d'une adoption plus large, il est probable que la fracture numérique dans l'éducation ne disparaîtra pas, ce qui aura un impact sur l'utilisation des robots dans l'éducation.

Impossible de dire si et quand les robots renforceront l'éducation, mais il est fort probable que les résultats de la recherche sur les robots sociaux destinés à l'éducation inspireront les futures technologies éducatives. Les aspects sociaux de ces robots sont essentiels pour la motivation et l'apprentissage, et les technologies qui permettent l'interaction sociale , telles que la reconnaissance des émotions, la capacité des robots à faire preuve d'empathie, ou la mise en place d'interactions plus personnelles , sont susceptibles de trouver leur place dans les futures technologies éducatives. Il est également évident que les robots ne se substitueront pas aux enseignants humains ; dans le meilleur des cas, ils viendront plutôt en complément de la profession enseignante alors que le manque de temps et de ressources humaines se fait sentir. Il est peu probable que l'on voie ces robots arriver dans l'enseignement formel au cours de la prochaine décennie. On s'attend plutôt à ce que les robots tuteurs soient utilisés en tout premier lieu à la maison comme jouets éducatifs. Pourtant, le potentiel des robots éducatifs est considérable, et ce n'est plus qu'une question de temps avant que nous ayons des robots assistants dans les classes.

 © OCDE 2022

Références

Alemi, M., A. Meghdari et M. Ghazisaedy (2014), « Employing Humanoid Robots for Teaching English Language in Iranian Junior High-Schools », *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 11/03, pp. 1450022, http://dx.doi.org/10.1142/s0219843614500224. [25]

Aleven, V., E. Stahl, S. Schworm, F. Fischer et R. Wallace (2003), « Help Seeking and Help Design in Interactive Learning Environments », *Review of Educational Research*, Vol. 73/3, pp. 277-320, http://dx.doi.org/10.3102/00346543073003277. [40]

Alnajjar, F., C. Bartneck, P. Baxter et T. Belpaeme (2021), Robots in education, Routledge. [1]

Anthony, A. (2017), *The robot that staves off loneliness for chronically ill children*, The Guardian, https://www.theguardian.com/technology/2017/aug/13/robot-to-help-sick-children-norwegian-start-up (consulté le 18 Mai 2021). [29]

Bainbridge, W., J. Hart, E. Kim et B. Scassellati (2011), « The Benefits of Interactions with Physically Present Robots over Video-Displayed Agents », *International Journal of Social Robotics*, Vol. 3/1, pp. 41-52, http://dx.doi.org/10.1007/s12369-010-0082-7. [7]

Bartneck, C., T. Belpaeme, F. Eyssel, T. Kanda, M. Keijsers et S. Šabanović (2020), *Human-Robot Interaction*, Cambridge University Press, http://dx.doi.org/10.1017/9781108676649. [4]

Belpaeme, T., P. Baxter, R. Read, R. Wood, H. Cuayahuitl, B. Kiefer, S. Racioppa, I. Kruijff-Korbayova, G. Athasopoulos, V. Enescu, R. Looije, M. Neerincx, Y. Demiris, R. Ros-Espinoza, A. Beck, L. Cañamero, A. Hiolle, M. Lewis, I. Baroni, M. Nalin, P. Cosi, G. Paci, F. Tesser, G. Sommavilla et R. Humbert (2012), « Multimodal Child-Robot Interaction: Building Social Bonds », *Journal of Human-Robot Interaction*, Vol. 1/2, http://dx.doi.org/10.5898/jhri.1.2.belpaeme. [9]

Belpaeme, T., J. Kennedy, A. Ramachandran, B. Scassellati et F. Tanaka (2018), « Social robots for education: A review », *Science Robotics*, Vol. 3/21, pp. eaat5954, http://dx.doi.org/10.1126/scirobotics.aat5954. [3]

Belton, P. (2018), *My robot makes me feel like I haven't been forgotten*, BBC, https://www.bbc.com/news/business-45332710 (consulté le 18 mai 2021). [28]

Benitti, F. (2012), « Exploring the educational potential of robotics in schools: A systematic review », *Computers & Education*, Vol. 58/3, pp. 978-988, http://dx.doi.org/10.1016/j.compedu.2011.10.006. [2]

Beran, T., A. Ramirez-Serrano, R. Kuzyk, M. Fior et S. Nugent (2011), « Understanding how children understand robots: Perceived animism in child–robot interaction », *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 69/7-8, pp. 539-550, http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhcs.2011.04.003. [38]

Bethel, C., Z. Henkel, K. Stives, D. May, D. Eakin, M. Pilkinton, A. Jones et M. Stubbs-Richardson (2016), « Using robots to interview children about bullying: Lessons learned from an exploratory study », *2016 25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, http://dx.doi.org/10.1109/roman.2016.7745197. [24]

Bethel, C., M. Stevenson et B. Scassellati (2011), « Secret-sharing: Interactions between a child, robot, and adult », dans *2011 IEEE International Conference on systems, man, and cybernetics (pp. 2489-2494)*, IEEE. [23]

Bhakta, R., M. Savin-Baden et G. Tombs (2014), « Sharing Secrets with Robots? », dans Viteli, J. and M. Leikomaa (dir. pub.), *Proceedings of EdMedia 2014--World Conference on Educational Media and Technology (pp. 2295-2301).* [13]

Breazeal, C. (2004), *Designing sociable robots*, MIT press. [5]

Catlin, D. (2014), « Using peer assessment with educational robots », dans *International Conference on Web-Based Learning (pp. 57-65), Springer*, Cham. [14]

Chase, C., D. Chin, M. Oppezzo et D. Schwartz (2009), « Teachable Agents and the Protégé Effect: Increasing the Effort Towards Learning », *Journal of Science Education and Technology*, Vol. 18/4, pp. 334-352, http://dx.doi.org/10.1007/s10956-009-9180-4. [21]

Gordon, G., S. Spaulding, J. Kory Westlund, J. Joo Lee, L. Plummer, M. Martinez, M. Das et C. Breazeal (2016), « Affective personalization of a social robot tutor for children's second language skills », dans *Proceedings of the Thirtieth AAAI Conference on Artificial Intelligence (pp. 3951-3957).* [36]

Hood, D., S. Lemaignan et P. Dillenbourg (2015), « When Children Teach a Robot to Write », *Proceedings of the Tenth Annual ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, http://dx.doi.org/10.1145/2696454.2696479. [20]

Kennedy, J., P. Baxter et T. Belpaeme (2015), « The Robot Who Tried Too Hard », *Proceedings of the Tenth Annual ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, http://dx.doi.org/10.1145/2696454.2696457. [10]

Kennedy, J., P. Baxter, E. Senft et T. Belpaeme (2016), « Social robot tutoring for child second language learning », *2016 11th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, http://dx.doi.org/10.1109/hri.2016.7451757. [42]

Kennedy, J., S. Lemaignan et T. Belpaeme (2016), « The cautious attitude of teachers towards social robots in schools », dans *Robots 4 Learning Workshop at IEEE RO-MAN 2016.* [50]

Kim, S. et Y. Lee (2015), « A Survey on Elementary School Teachers' Attitude toward Robot », dans E-Learn: World Conference on *E-Learning in Corporate, Government, Healthcare, and Higher Education (pp. 1802-1807)*, iation for the Advancement of Computing in Education (AACE). [51]

Lemaignan, S., A. Jacq, D. Hood, F. Garcia, A. Paiva et P. Dillenbourg (2016), « Learning by Teaching a Robot: The Case of Handwriting », *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 23/2, pp. 56-66, http://dx.doi.org/10.1109/mra.2016.2546700. [22]

Leyzberg, D., B. Scassellati, S. Spaulding et M. Toneva (2012), « The physical presence of a robot tutor increases cognitive learning gains », dans *Proceedings of the annual meeting of the cognitive science society.* [11]

Li, J. (2015), « The benefit of being physically present: A survey of experimental works comparing copresent robots, telepresent robots and virtual agents », *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 77, pp. 23-37, http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhcs.2015.01.001. [8]

Molenaar, I. (2021), *Personalisation of learning: Towards hybrid human-AI learning technologies*, OECD Publishing. [48]

Mon cartable connecté (s.d.), http://www.moncartableconnecte.fr/index.php ((consulté le 18 mai 2021). [30]

Okamura, E. et F. Tanaka (2020), « Deployment of a Social Robot into a Classroom of Remote Teaching by Elderly People to School Children: a Case Report », *2020 29th IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, http://dx.doi.org/10.1109/ro-man47096.2020.9223499. [26]

Okamura, E. et F. Tanaka (2016), « A pilot study about remote teaching by elderly people to children over a two-way telepresence robot system », *2016 11th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, http://dx.doi.org/10.1109/hri.2016.7451820. [35]

Ramachandran, A., A. Litoiu et B. Scassellati (2016), « Shaping productive help-seeking behavior during robot-child tutoring interactions », *2016 11th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, http://dx.doi.org/10.1109/hri.2016.7451759. [41]

Reich-Stiebert, N. (dir. pub.) (2017), « Robot education peers in a situated primary school study: Personalisation promotes child learning », *PLOS ONE*, Vol. 12/5, pp. e0178126, http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0178126. [49]

Reich-Stiebert, N. et F. Eyssel (2016), « Robots in the Classroom: What Teachers Think About Teaching and Learning with Education Robots », dans *Social Robotics, Lecture Notes in Computer Science*, Springer International Publishing, Cham, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-47437-3_66. [52]

Robins, B., K. Dautenhahn, R. Boekhorst et A. Billard (2004), « Effects of Repeated Exposure to a Humanoid Robot on Children with Autism », dans D*esigning a More Inclusive World, Springer London*, London, http://dx.doi.org/10.1007/978-0-85729-372-5_23. [43]

Saerbeck, M., T. Schut, C. Bartneck et M. Janse (2010), « Expressive robots in education: varying the degree of social supportive behavior of a robotic tutor », dans *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems (pp.1613-1622).* [12]

Scassellati, B. (2007), « How Social Robots Will Help Us to Diagnose, Treat, and Understand Autism », dans *Springer Tracts in Advanced Robotics, Robotics Research, Springer Berlin Heidelberg*, Berlin, Heidelberg, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-48113-3_47. [44]

Schodde, T., K. Bergmann et S. Kopp (2017), « Adaptive Robot Language Tutoring Based on Bayesian Knowledge Tracing and Predictive Decision-Making », dans *Proceedings of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (pp. 128-136).* [46]

Serholt, S., W. Barendregt, I. Leite, H. Hastle, A. Jones, A Paiva, A. Vasalou et G. Castellano (2014), « Teachers' views on the use of empathic robotic tutors in the classroom », *The 23rd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, http://dx.doi.org/10.1109/roman.2014.6926376. [53]

Spaulding, S., G. Gordon et C. Breazeal (2016), « Affect-aware student models for robot tutors », dans *Proceedings of the 2016 International Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems (pp. 864-872).* [47]

Tachi, S. (2015), *Telexistence* (2nd Edition), World Scientific. [56]

Tanaka, F., K. Isshiki, F. Takahashi, M. Uekusa, R. Sei et K. Hayashi (2015), « Pepper learns together with children: Development of an educational application », *2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids),* http://dx.doi.org/10.1109/humanoids.2015.7363546. [55]

Tanaka, F. et T. Kimura (2009), « The Use of Robots in Early Education: a Scenario based on Ethical Consideration », dans *18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (pp. 558-560),* IEEE. [18]

Tanaka, F. et S. Matsuzoe (2012), « Children Teach a Care-Receiving Robot to Promote Their Learning: Field Experiments in a Classroom for Vocabulary Learning », *Journal of Human-Robot Interaction*, pp. 78-95, http://dx.doi.org/10.5898/jhri.1.1.tanaka. [19]

Tanaka, F., T. Takahashi, S. Matsuzoe, N. Tazawa et M. Morita (2014), « Telepresence Robot Helps Children in Communicating with Teachers who Speak a Different Language », dans *Proceedings of the 2014 ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction (pp. 399-406).* [32]

Tanaka, F., T. Takahashi, S. Matsuzoe, N. Tazawa et M. Morita (2013), « Child-operated telepresence robot: A field trial connecting classrooms between Australia and Japan », *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems,* http://dx.doi.org/10.1109/iros.2013.6697211. [27]

Tan, Q., M. Denojean-Mairet, H. Wang, X. Zhang, F. Pivot et R. Treu (2019), « Toward a telepresence robot empowered smart lab », *Smart Learning Environments*, Vol. 6/1, http://dx.doi.org/10.1186/s40561-019-0084-3. [34]

Telepresencerobots (s.d.), https://telepresencerobots.com/education-telepresence-robot (consulté le 15 mai 2021). [31]

an den Berghe, R., J. Verhagen, O. Oudgenoeg-Paz, S. van der Ven et P. Laseman (2019), « Social Robots for Language Learning: A Review », *Review of Educational Research*, Vol. 89/2, pp. 259-295, http://dx.doi.org/10.3102/0034654318821286. [15]

van Straten, C., J. Peter et R. Kühne (2020), « Child–Robot Relationship Formation: A Narrative Review of Empirical Research », *International Journal of Social Robotics*, Vol. 12/2, pp. 325-344, http://dx.doi.org/10.1007/s12369-019-00569-0. [54]

VanLehn, K. (2011), « The Relative Effectiveness of Human Tutoring, Intelligent Tutoring Systems, and Other Tutoring Systems », *Educational Psychologist*, Vol. 46/4, pp. 197-221, http://dx.doi.org/10.1080/00461520.2011.611369. [6]

Vinciarelli, A., M. Pantic et H. Bourlard (2009), « Social signal processing: Survey of an emerging domain », *Image and Vision Computing*, Vol. 27/12, pp. 1743-1759, http://dx.doi.org/10.1016/j.imavis.2008.11.007. [39]

Vogt, P., R. van den Berghe, M. de Haas, L Hoffman, J. Kanero, E. Mamus, J-M. Montanier, C. Oranç, O. Oudgeneg-Paz, D. Hernández Garcia, F. Papadoupolos, T. Schodde, J. Verhagen, C. Wallbridgell, B. Willemsen, J. de Wit, T. Belpaeme, T. Göksun, S. Kopp, E. Krahmer, A. Küntay, P. Leseman et A. Kumar Pandey (2019), « Second Language Tutoring Using Social Robots: A Large-Scale Study », *2019 14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI),* http://dx.doi.org/10.1109/hri.2019.8673077. [16]

Vogt, P., R. van den Berghe, M. de Haas, L Hoffman, J. Kanero, E. Mamus, J-M. Montanier, C. Oranç, O. Oudgeneg-Paz, D. Hernández Garcia, F. Papadoupolos, T. Schodde, J. Verhagen, C. Wallbridgell, B. Willemsen, J. de Wit, T. Belpaeme, T. Göksun, S. Kopp, E. Krahmer, A. Küntay, P. Leseman et A. Kumar Pandey (2019), « Second Language Tutoring Using Social Robots: L2TOR - The Movie », *2019 14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI),* http://dx.doi.org/10.1109/hri.2019.8673016. [17]

Weber, K. et S. Zeaiter (2018), « Project H.E.A.R.T. (Humanoid Emotional Assistant Robots in Teaching) », dans Buchner, J. et al. (dir. pub.), *Inverted Classroom, Fachhochschule St. Pölten*, Fachhochschule St. Pölten GmbH. [37]

Yun, S., J. Shin, D. Kim, C. Gu Kim, M. Kim et M.T. Choi (2011), « Engkey: Tele-education Robot », in *Social Robotics, Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-25504-5_15. [33]

Zhexenova, Z., A. Amirova, M. Abdikarimova, K. Kudaibergenov, N. Baimakhan, B. Tleubayev, W. Johal, P. Dillenbourg, A. Cohen Miller et A. Sandygulova (2020), « A Comparison of Social Robot to Tablet and Teacher in a New Script Learning Context », *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 7, http://dx.doi.org/10.3389/frobt.2020.00099. [45]

Partie 2

8 Analyse des données de l'apprentissage pour les établissements et la gestion des systèmes éducatifs

Dirk Ifenthaler
Université de Mannheim, Allemagne et Université Curtin, Australie

Au cours de cette dernière décennie, l'utilisation de l'analyse de l'apprentissage dans les structures éducatives a fait l'objet de discussions. Pourtant, il existe peu d'exemples d'adoption systématique et holistique de cette pratique à l'échelle d'une organisation. Ce chapitre explore les cadres d'action et les modèles à adopter qui pourraient permettre d'intégrer l'analyse de l'apprentissage dans les organisations éducatives dans la perspective d'un changement organisationnel. Les établissements d'enseignement supérieur sont certes conscients des avantages de l'analyse d'apprentissage et ils ont commencé à expérimenter des tableaux de bord pour les étudiants et les enseignants, mais ils sont encore loin d'une transformation organisationnelle. Les travaux de recherche sur la mise en œuvre et la pratique de l'analyse des données de l'apprentissage dans les écoles primaires et secondaires sont également rares. Un examen des modèles à adopter et des recommandations politiques dans un contexte international plus large permettrait de diffuser les expériences isolées dans le grand public.

Introduction

La grande quantité de données éducatives désormais disponible, l'amélioration du stockage et du traitement des données, et les progrès de l'informatique ainsi que des outils et algorithmes analytiques connexes expliquent l'intérêt des organisations éducatives envers l'analyse des données de l'apprentissage. Ces analyses permettent d'évaluer, d'obtenir et d'analyser des informations, statiques et dynamiques, sur les apprenants et les environnements d'apprentissage afin de modéliser, de prédire et d'optimiser en temps réel les processus et les environnements d'apprentissage, ainsi que les prises de décision au sein d'une structure éducative (Ifenthaler, 2015[1]). L'intégration des systèmes d'analyse de l'apprentissage dans ces organisations nécessite des cadres et des modèles d'adoption exploitables (Buckingham Shum et McKay, 2018[2] ; Dyckhoff et al., 2012[3]). Cependant, ces modèles peuvent varier en fonction des pays et des organisations, voire même au sein d'une organisation donnée (Klasen et Ifenthaler, 2019[4]).

Au cours de cette dernière décennie, les avantages potentiels de l'analyse de l'apprentissage dans les structures éducatives ont fait l'objet de discussions (Pistilli et Arnold, 2010[5]). L'adoption systématique et holistique de l'analyse de l'apprentissage n'est pas encore patente au sein des organisations (Gašević et al., 2019[6]). Le degré d'adoption de l'analyse d'apprentissage au sein d'une organisation se mesure par le nombre de parties concernées

qui l'utilisent ou qui ont modifié leur pratique grâce à elle (Colvin et al., 2015[7]). L'analyse de l'apprentissage peut s'étendre à davantage d'organisations si les acteurs potentiels communiquent entre eux et suivent un processus de prise de décision pour déterminer s'il faut adopter cet outil ou non (Kotter, 2007[8] ; Rogers, 1962[9]). Les influenceurs qui souhaitent promouvoir l'adoption de l'analyse de l'apprentissage doivent prévoir des canaux de communication ouverts et les sécuriser. Ils doivent ensuite encourager les participants à se jeter à l'eau et passer de la prise de conscience à l'action (Colvin et al., 2015[7] ; Drachsler et Greller, 2016[10] ; Ifenthaler et Gibson, 2020[11]).

Les institutions d'enseignement supérieur ont montré leur intérêt en vue de l'adoption de l'analyse des données de l'apprentissage, mais ce n'est pas encore une priorité majeure pour celles-ci (Ifenthaler et Yau, 2019[12] ; Tsai et Gašević, 2017[13] ; Lester et al., 2017[14]). Certaines d'entre elles ont commencé à utiliser des tableaux de bord à l'usage des étudiants et des enseignants, mais on est encore loin d'une transformation organisationnelle en tant que telle (Siemens, Dawson et Lynch, 2014[15] ; Viberg et al., 2018[16]).

S'il existe effectivement des études sur l'adoption de l'analyse de l'apprentissage dans l'enseignement supérieur, sa mise en œuvre dans les établissements de la maternelle à la terminale reste rare (Andresen, 2017[17] ; Gander, 2020[18]). Deux écoles de pensée coexistent quant à l'utilité de l'analyse de l'apprentissage dans ces établissements. Agasisti et Bowers (2017[19]) soulignent l'importance des données éducatives et de leur analyse dans l'élaboration des politiques, la gestion des établissements et l'apprentissage et l'enseignement en classe. En revanche, Sergis et Sampson (2016[20]) soutiennent que ces établissements ne tirent peut-être pas autant profit de l'analyse de l'apprentissage que les établissements d'enseignement supérieur. Les premiers ont besoin d'un cadre d'analyse holistique et multiniveaux, qui comprend plusieurs couches de données pour fournir des informations suffisamment détaillées à la direction des établissements et aux autres parties prenantes, tandis que l'analyse des données scolaires recueille, analyse et exploite des données éducatives à l'échelle des établissements, permettant à leurs dirigeants de suivre et (partiellement) d'influencer les développements de leur organisation afin de mieux répondre aux besoins des élèves, des enseignants, des parents et de respecter les directives politiques externes. À partir de ce constat, Sergis et Sampson (2016[20]) proposent un cadre d'analyse scolaire qui comprend des éléments à un niveau micro (suivi et évaluation du processus d'apprentissage, suivi et évaluation des performances de l'apprenant), à un niveau méso (planification du curriculum, gestion du personnel enseignant, développement professionnel du personnel enseignant) et à un niveau macro (responsabilité des parties prenantes du district scolaire, gestion des infrastructures, gestion des ressources financières, gestion des données de l'apprenant). Cela étant dit, peu d'études se sont penchées sur la façon dont les politiques régionales et locales peuvent tirer parti de l'analyse des données en vue d'améliorer le fonctionnement des établissements scolaires (Jimerson et Childs, 2017[21]).

Ce chapitre se consacre aux avantages organisationnels de l'analyse de l'apprentissage et expose les défis que représente son adoption dans les organisations éducatives. Trois exemples concrets donnent un aperçu de la façon dont les organisations ont réussi à adopter l'analyse de l'apprentissage et à produire des avantages organisationnels, ou à surmonter les obstacles organisationnels. La partie finale présente des recommandations à destination des décideurs politiques, des chercheurs et des organisations éducatives qui adoptent l'analyse de l'apprentissage et se termine par une série de questions ouvertes à aborder dans les recherches futures.

Les avantages organisationnels liés à l'analyse de l'apprentissage

Les recherches et les pratiques actuelles en matière d'analyse de l'apprentissage en Australie, au Royaume-Uni et aux États-Unis prouvent l'utilité de celle-ci dans la résolution des problèmes liés à la réussite des études et dans l'identification des élèves à risque (Sclater et Mullan, 2017[22]), ainsi que dans le contrôle des capacités organisationnelles et leur amélioration (Ifenthaler, Yau et Mah, 2019[23]).

La gouvernance (méganiveau) favorise l'analyse interorganisationnelle en intégrant les données de tous les niveaux des analyses de l'apprentissage. Basés sur des normes de données communes et des schémas de données ouverts, les ensembles de données permettent d'identifier et de valider des modèles au sein des organisations et entre elles ; ils fournissent donc des informations précieuses pour éclairer l'élaboration des politiques éducatives. À l'échelle des pouvoirs publics, ces données peuvent être liées à l'analyse de la performance entre établissements, ce qui comprend des analyses comparatives. Ces données permettent d'élaborer des politiques éducatives et d'allouer des ressources dans les districts scolaires, les régions ou les pays. En cas de crise, comme la pandémie de COVID-19, l'analyse de l'apprentissage au niveau de la gouvernance peut s'avérer utile pour apporter une réponse rapide et coordonner le soutien des experts aux établissements qui en ont besoin.

Au niveau macro, les analyses à l'échelle de l'organisation permettent de mieux connaître les cohortes d'apprenants afin d'optimiser les processus. Il s'agit notamment d'allouer des ressources cruciales dans le but de réduire les taux de décrochage scolaire et d'augmenter les taux de rétention et de réussite. L'analyse de l'apprentissage peut servir à soutenir les processus d'admission dans les établissements scolaires et prédire les performances des établissements (en fonction des performances individuelles des élèves). D'autres applications encadrent la transition entre les systèmes éducatifs, comme l'entrée dans l'enseignement supérieur ou les démarches pour trouver un emploi. Les niveaux méso et micro fournissent des données analytiques à l'échelle des organisations elles-mêmes et ne seront pas abordés plus avant dans ce chapitre (Ifenthaler et Widanapathirana, 2014[24]).

Afin de déterminer les avantages de l'analyse de l'apprentissage, il est essentiel de savoir quelle est la nature de ces données et à quoi leur analyse va servir. On peut les subdiviser en plusieurs catégories : (1) sommative et descriptive - aperçus détaillés à l'issue d'une phase d'apprentissage (p. ex., période d'études, semestre, diplôme final) souvent comparés à des points de référence ou de repère définis au préalable ; (2) formative et (presque) en temps réel, qui utilise les informations en continu pour améliorer les processus via des interventions directes sur le moment même ; (3) prédictive et prescriptive, qui prévoit la probabilité des résultats afin de planifier les interventions, stratégies et actions futures. Le Tableau 8.1 présente des exemples au niveau de la gouvernance et de l'organisation en fonction des catégories de données et d'analyse (Ifenthaler, 2015[1]). Ces avantages peuvent être mis en correspondance avec différents profils de données (p. ex., profil de l'étudiant, profil d'apprentissage, profil du programme de cours) comprenant divers indicateurs analytiques (p. ex., données de traçage, contexte démographique, caractéristiques du cours). Yau et Ifenthaler (2020[25]) présentent une analyse approfondie des indicateurs analytiques relatifs à des avantages spécifiques de l'analyse de l'apprentissage.

Tableau 8.1 Exemple d'avantages de l'analyse de l'apprentissage au niveau de la gouvernance et de l'organisation

	Catégories des données et de l'analyse		
	Sommative/descriptive	**Formative/en temps réel**	**Prédictive/prescriptive**
Gouvernance	• Faire des comparaisons entre établissements • Développer des points de référence • Éclairer l'élaboration de politiques • Éclairer les processus d'assurance qualité	• Augmenter la productivité • Apporter une réponse rapide aux incidents sérieux • Analyser la performance • Fournir l'aide d'experts	• Modéliser l'impact de la prise de décision organisationnelle • Planifier la gestion du changement
Organisation	• Analyser les processus éducatifs • Optimiser l'allocation des ressources • Respecter les normes institutionnelles • Comparer les unités entre les programmes et les entités	• Contrôler les processus éducatifs • Évaluer les ressources éducatives • Suivre les inscriptions • Analyser la non-présentation à un examen • Impliquer les anciens élèves	• Prévoir les processus éducatifs • Prévoir l'attrition • Modéliser les taux de rétention • Identifier les lacunes

Source: Ifenthaler (2015[1]).

Trois exemples :

Même s'il existe de nombreuses recherches sur les avantages organisationnels de l'analyse de l'apprentissage, la mise en œuvre de systèmes analytiques à l'échelle de l'organisation n'est pas fréquente (Buckingham Shum et McKay, 2018[2]). Les trois exemples qui suivent montrent comment l'analyse de l'apprentissage peut avoir un impact sur la gestion des établissements scolaires et des systèmes éducatifs.

Exemple 1 : Analyse de l'apprentissage à l'Université de Wollongong, Australie

L'Université de Wollongong, en Australie, a relevé le défi de l'analyse de l'apprentissage en l'adoptant au niveau organisationnel (celui du vice-chancelier adjoint, responsable des affaires académiques) tout en cherchant des moyens d'intégrer différentes cultures d'apprentissage et d'enseignement propres aux différentes disciplines et en démontrant sa valeur aux étudiants et au personnel enseignant (Heath et Leinonen, 2016[26]). L'Université a commencé par examiner les outils et ressources existants qui pouvaient venir en appui de l'analyse de l'apprentissage. Malgré une infrastructure de stockage de données bien au point, il a fallu investir dans du personnel de soutien supplémentaire pour qu'il se consacre à l'analyse, aux mégadonnées et aux statistiques. L'Université de Wollongong a opté pour l'adoption extensive de l'analyse de l'apprentissage - par opposition à une adoption progressive par mise à l'échelle, qui commence généralement par un prototype, puis est suivie d'une mise à l'échelle avant d'atteindre le stade de l'analyse d'apprentissage pleinement mise en œuvre (Ferguson et al., 2014[27]). Les professeurs s'estimaient capables de suivre une forme d'adoption « florissante » dans des proportions très variables. Cette situation a représenté une complexité supplémentaire dans le processus de changement organisationnel. Une enquête a recueilli les points de vue des étudiants sur l'analyse de l'apprentissage, notamment leurs préférences en matière de fonctionnalités, de stratégies d'intervention et de perception de la confidentialité (outre les capacités techniques). Deux comités de gouvernance ont ensuite été mis sur pied : (a) le comité de gouvernance de l'analyse de l'apprentissage, axé sur l'adoption de l'analyse de l'apprentissage et (b) le groupe consultatif sur l'utilisation éthique des données, axé sur la vie privée des étudiants et les questions éthiques concernant les données éducatives (Heath et Leinonen, 2016[26]).

Pour conclure, quatre points majeurs doivent être pris en considération en vue d'une adoption réussie à l'échelle de l'organisation (Heath et Leinonen, 2016[26]) : (1) utiliser une infrastructure technologique commune telle qu'un entrepôt de données ; (2) impliquer les étudiants à toutes les étapes du processus d'adoption ; (3) faire participer les premiers utilisateurs et établir des communautés de pratique ; (4) instituer des cadres de gouvernance axés sur la stratégie d'analyse de l'apprentissage, la confidentialité des données et l'éthique.

Exemple 2 : Système de soutien aux diagnostics des enseignants (Stuttgart, Allemagne)

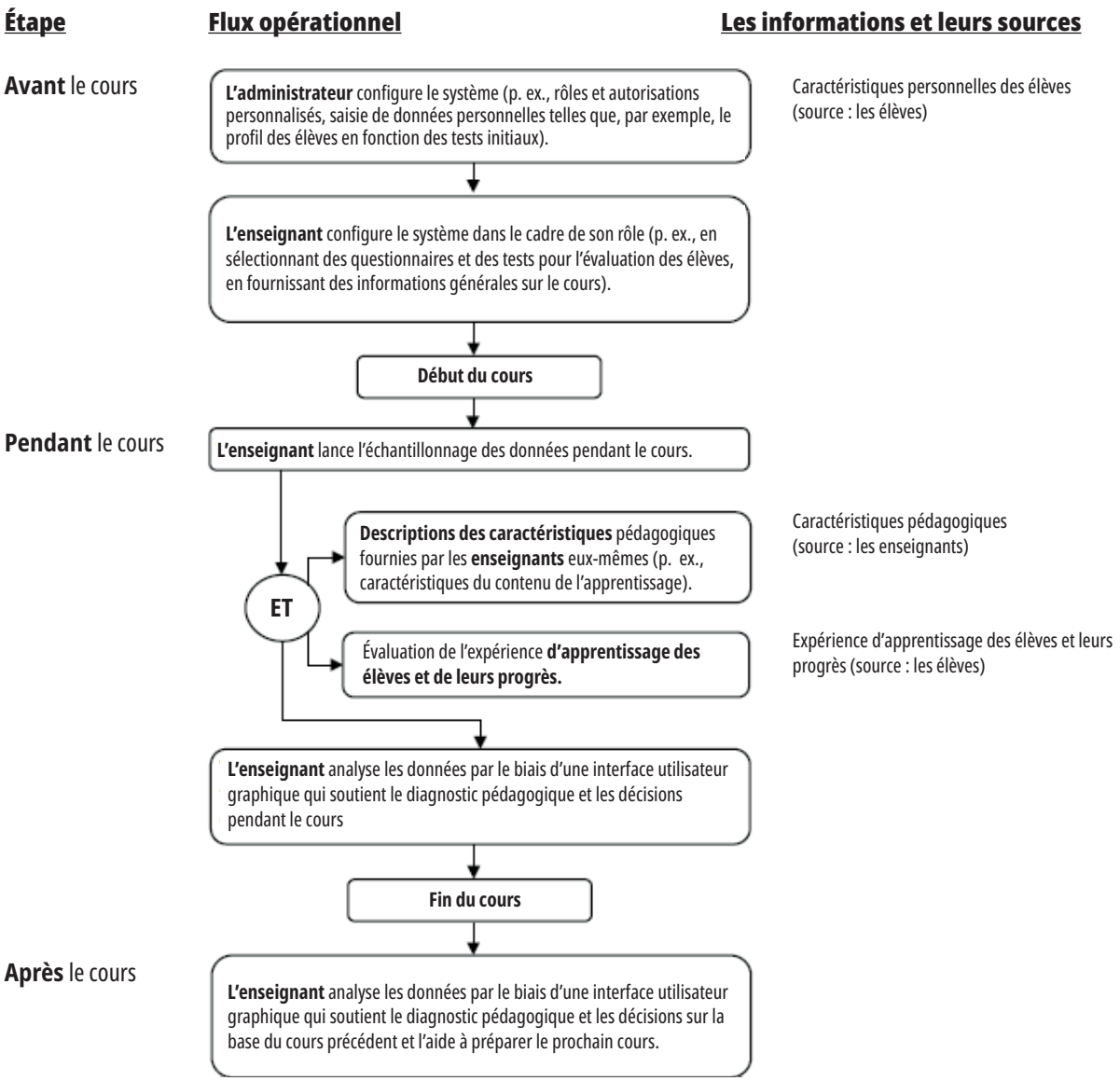
Développé par des chercheurs de l'Université Hohenheim de Stuttgart (Allemagne), le système de soutien aux diagnostics des enseignants (*Teachers' Diagnostic Support System* - TDSS) aide les enseignants à adapter leurs pratiques pédagogiques à la diversité des besoins des élèves en classe. Les individus concernés sont les enseignants et les apprenants. La collecte et l'analyse des données du TDSS présentent un intérêt particulier. En effet, le TDSS permet de recueillir des données sur (1) les caractéristiques personnelles des élèves (p. ex., connaissances et compétences spécifiques à la discipline, caractéristiques émotionnelles et motivationnelles), (2) les descriptions des caractéristiques de l'enseignement (p. ex., caractéristiques du contenu de l'apprentissage) et (3) les expériences d'apprentissage et les progrès des élèves (p. ex., intérêt situationnel/contextuel pour la matière, connaissances réelles sur le sujet) (Kärner, Warwas et Schumann, 2020[28]). Le Graphique 8.1 donne un aperçu du TDSS, qui consiste en un logiciel client-serveur optimisé pour les appareils mobiles.

Le TDSS permet à l'enseignant de récolter et d'analyser des données pendant et après les cours afin de faire évoluer sa pratique pédagogique sur le champ ainsi que de préparer le matériel d'apprentissage et les leçons à venir. La microgestion via l'analyse des données de l'apprentissage peut être étendue aux activités d'enseignement pluridisciplinaires et aux diagnostics à l'échelle des établissements scolaires.

Exemple 3 : Le projet LAPS utilise des techniques d'apprentissage automatique pour le soutien précoce aux étudiants de l'Université des médias de Stuttgart, en Allemagne

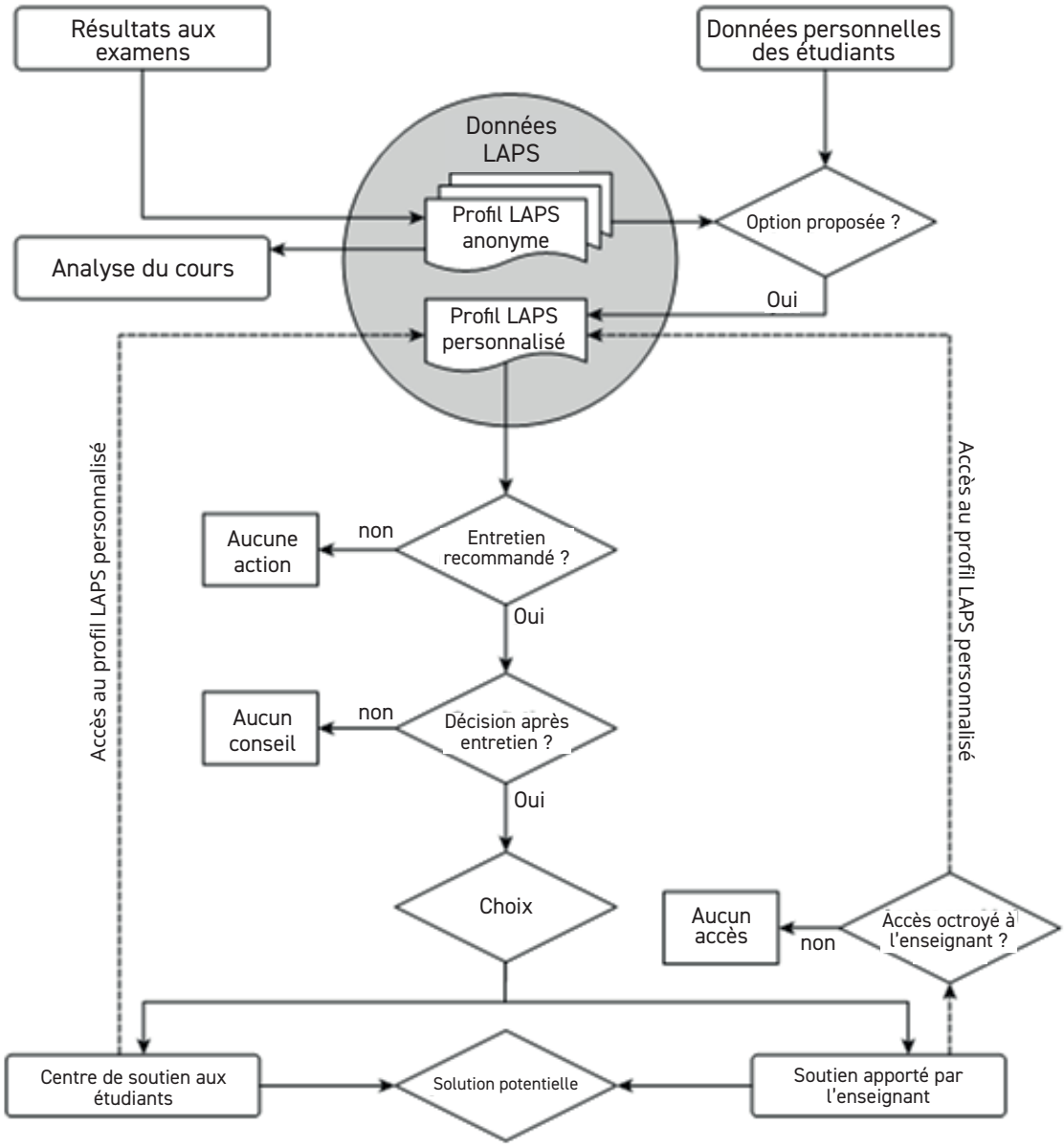
Le projet LAPS (Learning analytics for exams and study success) a été développé pour identifier les étudiants risquant d'échouer dans leurs études. Il a été mis en œuvre à l'université des médias de Stuttgart en 2014. L'objectif de LAPS était de favoriser les échanges fondés sur des éléments probants entre le personnel académique et les étudiants au début de leurs études. Les questions éthiques concernant la vie privée, le volontarisme, l'autodétermination, l'autoresponsabilité, le respect de l'individualité, la confidentialité et l'anonymat font partie intégrante du projet. On utilise les données LAPS, qui sont mises à jour chaque semestre, pour constituer une liste des progrès académiques des étudiants participants durant leurs études. On peut identifier 200 caractéristiques de risque différentes (voir le Graphique 8.2) ainsi que les parcours académiques prometteurs (Hinkelmann et Jordine, 2019[29]). En outre, LAPS est utilisé pour l'assurance qualité, en fournissant des informations sur des programmes spécifiques, des cours et des cohortes d'étudiants. LAPS donne des informations sur le nombre d'étudiants inscrits, les abandons, les parcours académiques réussis, la probabilité de risque moyen, l'âge minimum/moyen/maximum des étudiants, la répartition par sexe, la note moyenne à l'examen d'entrée à l'université et la non-présentation aux examens par programme de cours.

Graphique 8.1 Flux de travail et information du TDSS



Source: Kärner, Warwas et Schumann (2020[28]).

Graphique 8.2 Le processus LAPS



Source: Hinkelmann et Jordine (2019[29]).

Les informations sur les cours LAPS permettent de réaliser une analyse détaillée par semestre et donnent accès à la répartition des notes, au nombre d'examens réussis, à la note moyenne, au nombre d'absences à un examen ou encore au nombre d'inscriptions. La vue d'ensemble sur les cohortes LAPS permet de comparer la répartition des crédits ECTS (European Credit Transfer System) obtenus par les étudiants par semestre. Elle permet également d'identifier les éventuels problèmes structurels lorsque les étudiants n'obtiennent pas les crédits ECTS requis (Hinkelmann et Jordine, 2019[29]).

Les défis de l'analyse de l'apprentissage pour les organisations

Les trois exemples ci-dessus montrent que l'analyse de l'apprentissage peut présenter des avantages pour la mise en œuvre de changements organisationnels et le soutien aux enseignants et aux étudiants pendant leurs études. Il existe de nombreux autres avantages potentiels. Mais les défis par rapport à son déploiement ne sont pas une vue de l'esprit. Comment les structures éducatives peuvent-elles investir des ressources limitées et obtenir un

maximum d'avantages ? Tsai et Gašević (2017[13]) mettent en évidence plusieurs problèmes pour les organisations qui mettent en œuvre des initiatives d'analyse de l'apprentissage :

- un leadership insuffisant dans la planification et le suivi de la mise en œuvre des analyses d'apprentissage et du processus de changement organisationnel ;
- une compréhension et une implication variables des parties prenantes à l'égard de l'initiative, à savoir le personnel administratif, technique et enseignant ;
- des lacunes dans les concepts pédagogiques et dans les connaissances générales de la culture d'apprentissage de l'organisation, laquelle doit conduire aux avantages attendus en matière d'apprentissage et d'enseignement ;
- une formation professionnelle insuffisante du personnel enseignant, du personnel d'encadrement, du personnel technique sur les avantages et les limites de l'analyse de l'apprentissage ou de son infrastructure technique ;
- un manque de preuves empiriques rigoureuses sur l'efficacité de l'analyse de l'apprentissage pour soutenir la prise de décision à l'échelle de l'organisation ;
- des lacunes en matière de politiques, de règlements et de codes de pratique sur la vie privée et l'éthique dans l'analyse de l'apprentissage.

Leitner, Ebner et Ebner (2019[30]) recommandent un cadre se décomposant en sept catégories afin de piloter les initiatives d'analyse de l'apprentissage à l'échelle de l'organisation. Celles-ci comprennent : (1) la définition de la façon dont les apprenants, les professionnels de l'éducation, les chercheurs et les administrateurs scolaires tireront profit de l'analyse de l'apprentissage ; (2) l'accès des parties prenantes à des informations exploitables sur des tableaux de bord ; (3) une communication transparente avec toutes les parties prenantes et la garantie de politiques - en particulier, quant à la confidentialité - qui soient conformes aux principes fondamentaux de l'organisation, comme le règlement général sur la protection des données de l'UE ; (4) la mise en place et la gestion d'une infrastructure informatique qui réponde aux exigences de la mise en œuvre de l'analyse de l'apprentissage. Ces infrastructures informatiques modernes peuvent être mises à disposition par des services appartenant à l'organisation ou par des prestataires de services externes ; (5) un développement et un déploiement évolutifs des fonctions d'analyse de l'apprentissage que l'organisation peut contrôler et évaluer ; (6) la mise en œuvre d'un code de conduite et (7) des procédures portant sur une éthique de l'analyse de l'apprentissage qui s'adapte aux différents contextes culturels.

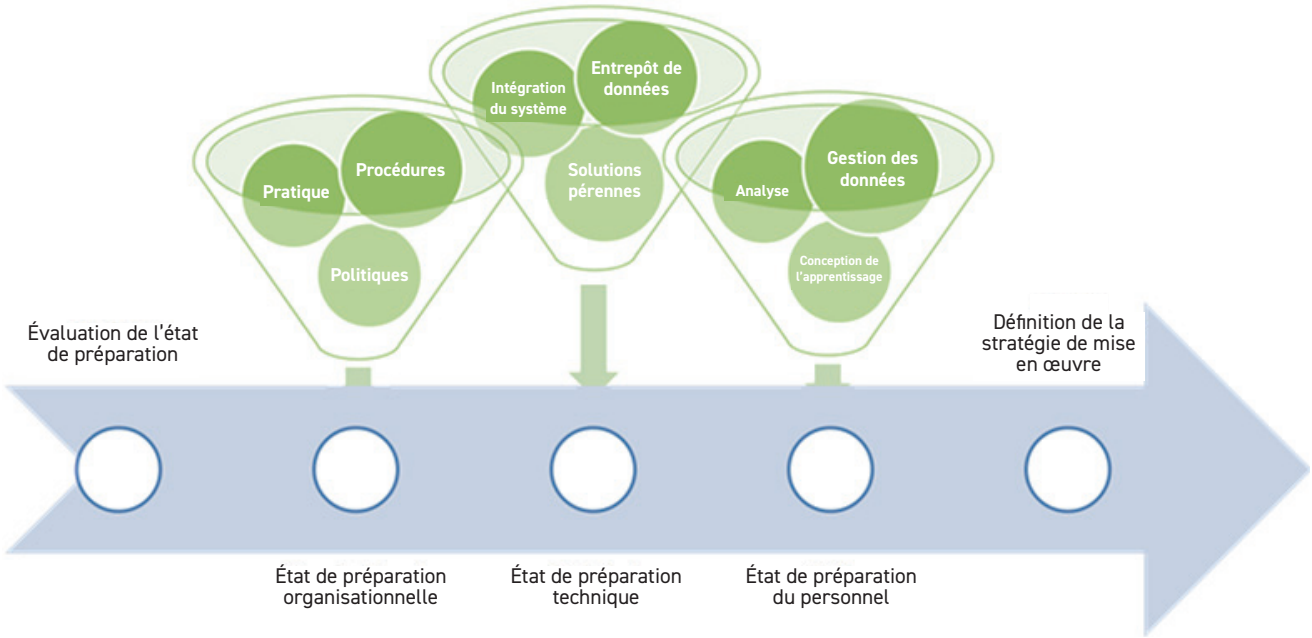
Drachsler et Greller (2016[10]) ont établi une liste de contrôle DELICATE en huit points pour faciliter la mise en œuvre en toute confiance de l'analyse de l'apprentissage, qui reprend de nombreux points du cadre de Leitner, Ebner et Ebner (2019[30]). À cela, ils ajoutent la nécessité de légitimer ou de motiver le droit d'obtenir des données, d'obtenir le consentement par le biais d'un contrat avec les personnes concernées, d'anonymiser les données et les sujets, et de veiller à ce que les parties prenantes externes respectent les directives nationales.

Une stratégie de gestion du changement commence par une évaluation de l'état de préparation. L'étape initiale consiste à identifier les avantages à tirer de l'analyse de l'apprentissage. La structure éducative procède ensuite à un examen approfondi des pratiques, procédures et capacités existantes (voir l'exemple 1). La stratégie qui en découle définit alors les avantages et les caractéristiques spécifiques de l'analyse de l'apprentissage, ainsi que l'infrastructure nécessaire pour mettre en œuvre avec succès l'analyse de l'apprentissage.

L'état de préparation est ensuite évalué à l'aide d'outils standardisés. Les données sur l'état de préparation de l'organisation, telles que la réglementation en matière de protection des données, sont collectées en mettant l'accent sur l'état de préparation technique de l'organisation (p. ex., entrepôt de données, intégration du système) et sur le niveau de connaissances du personnel en matière de données éducatives (Schumacher, Klasen et Ifenthaler, 2019[32]).

Toute stratégie de mise en œuvre qui découle de l'évaluation de l'état de préparation doit englober le suivi et l'évaluation de l'analyse de l'apprentissage au regard d'indicateurs clés de performance prédéfinis et mesurables. Plus important encore, il faut suivre de près le retour sur investissement, défini comme les gains attendus (retours) par unité de coût (investissement) (Psacharopoulos, 2014[33]). Il peut s'agir de résultats financiers, mais aussi d'autres gains, comme la rétention des étudiants, la valorisation du personnel (voir l'exemple 2) ou encore la satisfaction des étudiants (Gibson et al., 2018[34]).

Graphique 8.3 Stratégie de gestion du changement pour la mise en œuvre d'analyses d'apprentissage exploitables



Source: Ifenthaler (2020[31]).

En résumé, une stratégie de gestion du changement pourrait être axée sur les principes suivants (Ifenthaler, 2020[31] ; Leitner, Ebner et Ebner, 2019[30] ; Tsai et Gašević, 2017[13]) :

- définition de la vision et des objectifs de l'analyse de l'apprentissage (p. ex., en utilisant la matrice des avantages susmentionnée) et harmonisation avec la mission et la culture d'apprentissage de l'organisation ;
- identification des facteurs organisationnels, politiques ou technologiques qui influenceront la mise en œuvre ;
- implication et communication régulière à destination de toutes les parties prenantes, y compris les étudiants, les enseignants, les administrateurs scolaires, etc. ;
- élaboration (et mise à jour permanente) d'un plan stratégique axé sur les gains à court et à long terme, comprenant une analyse des besoins et des risques ainsi qu'un calendrier précis définissant les responsabilités des parties prenantes concernées ;
- allocation des ressources et identification de l'expertise (dans l'organisation et en dehors de celle ci) pour atteindre les objectifs de l'analyse de l'apprentissage ;
- évaluation formative et sommative solide de l'initiative d'analyse de l'apprentissage afin d'affiner la mise en œuvre globale et le processus de changement organisationnel.

Faire évoluer l'analyse de l'apprentissage

De nombreuses initiatives d'analyse de l'apprentissage suivent soit une approche de recherche-action (Argyris et Schon, 1974[35]), soit une approche de recherche orientée par la conception (Huang, Spector et Yang, 2019[36]). Par exemple, au niveau macro, l'analyse de l'apprentissage permet au personnel de cibler les programmes de rétention (voir l'exemple 3). Au niveau méso, les rapports de données permettent d'améliorer les pratiques pédagogiques (voir l'exemple 2). Au niveau micro, des listes d'élèves « à risque » sont remises au personnel d'encadrement, ce qui leur permet de trier et d'inciter certains élèves à prendre des mesures correctives (voir l'exemple 3) ou de faire face à l'hétérogénéité des élèves dans les classes (voir l'exemple 2).

Malgré ces avantages, la mise en œuvre de l'analyse de l'apprentissage dans les organisations éducatives est souvent un exercice pour le moins paradoxal. Un institut de recherche qui étudie l'analyse de l'apprentissage peut certes disposer d'experts de classe mondiale en science des données, en systèmes d'information, en gestion, en

leadership éducatif et en sciences de l'apprentissage. Ces experts peuvent même contribuer au développement de systèmes robustes d'analyse de l'apprentissage. Mais cela ne signifie pas pour autant qu'ils ont une vision claire des tenants et aboutissants de nature « politique » qui sont liés à la mise en œuvre de l'analyse de l'apprentissage au sein de leur organisation. Quand bien même ces experts disposeraient d'une expérience en développement organisationnel, il n'est pas dit que la direction administrative de leur organisation y fera appel. Qui plus est, à partir du moment où la lourdeur bureaucratique s'installe, il est vraisemblable que les experts seront moins portés à s'impliquer dans les processus de changement.

Afin de surmonter ces obstacles organisationnels, Buckingham Shum et McKay (2018[2]) suggèrent ce qui suit : (a) Le département informatique de l'établissement développe et met en œuvre le système d'analyse de l'apprentissage, car il supervise déjà le système de gestion de l'apprentissage, l'entrepôt de données, le système d'information des étudiants, etc. Dans cette approche, cependant, il est peu probable que le corps professoral soit en mesure de piloter un développement et une mise en œuvre du système d'analyse de l'apprentissage basés sur des éléments probants. (b) Les membres du corps professoral mènent des recherches et des développements basés sur des éléments probants, et ils utilisent leurs résultats pour piloter la mise en œuvre d'un système d'analyse de l'apprentissage. (c) Une entité autonome de l'établissement d'enseignement supérieur - bien connectée au corps professoral et à l'administration - dirige la mise en œuvre, ce qui nécessite un partenariat entre toutes les parties prenantes. Cette approche innovante combine les forces des deux autres mentionnées ci-dessus.

Dans un examen systématique de plus de 6 000 études de cas sur l'analyse de l'apprentissage au cours des six dernières années, Ifenthaler et Yau (2020[37]) indiquent qu'il est nécessaire d'adopter davantage les systèmes d'analyse de l'apprentissage à l'échelle de l'organisation (ou du moins de mener des recherches à ce sujet). La définition de normes peut en accélérer l'adoption. S'il existe des normes pour les modèles de données et la collecte de données telles que xAPI (Experience API) (Kevan et Ryan, 2016[38]), il en manque concernant les indicateurs, les visualisations et les critères de conception; ces éléments permettraient d'améliorer l'efficacité pédagogique de l'analyse de l'apprentissage (Seufert et al., 2019[39] ; Yau et Ifenthaler, 2020[25]). C'est une question que la R-D en matière d'analyse de l'apprentissage doit aborder. Les directives suivantes peuvent y contribuer (Ifenthaler, Mah et Yau, 2019[40]) :

- développer des systèmes flexibles qui peuvent s'adapter aux besoins des organisations à titre individuel, c'est-à-dire à leur culture d'apprentissage, aux exigences des programmes d'études spécifiques, aux préférences des apprenants et des enseignants, aux spécifications techniques et administratives ;
- définir les exigences en matière de données et d'algorithmes ;
- faire participer toutes les parties prenantes à l'élaboration d'une stratégie d'analyse de l'apprentissage et à sa mise en œuvre ;
- établir des structures et des processus organisationnels, technologiques et pédagogiques pour l'application des systèmes d'analyse de l'apprentissage, et fournir un soutien à toutes les parties prenantes en vue d'un fonctionnement dans la durée ;
- informer toutes les parties prenantes par rapport aux questions éthiques et aux réglementations sur la confidentialité des données, y compris les possibilités d'apprentissage professionnel (p. ex., la culture des données éducatives) ;
- mettre en place un processus solide pour garantir la validité et la crédibilité du système, des données, des algorithmes et des interventions ;
- financer la recherche sur l'analyse de l'apprentissage ;
- constituer des comités locaux, régionaux et nationaux d'analyse de l'apprentissage qui regroupent des parties prenantes issues des milieux scientifiques, économiques et politiques, en mettant l'accent sur le développement et la mise en œuvre (et l'accréditation) adéquats des systèmes d'analyse de l'apprentissage.

Conclusion

L'analyse de l'apprentissage s'appuie sur un ensemble éclectique de méthodologies et de données pour fournir des informations sommatives, des informations en temps réel et prédictives en vue d'améliorer l'apprentissage, l'enseignement, l'efficacité organisationnelle et la prise de décision (Lockyer, Heathcote et Dawson, 2013[41] ; Long et Siemens, 2011[42]). La capacité de l'analyse de l'apprentissage à prédire l'échec éventuel des apprenants a certes fait l'objet d'une grande attention, mais celle-ci a porté sur des cursus isolés plutôt que sur des structures

éducatives en général (Gašević, Dawson et Siemens, 2015[43]). En outre, tous les systèmes d'analyse de l'apprentissage ne semblent pas être efficaces pour l'apprentissage et l'enseignement, comme le démontrent Dawson et al. (2017[44]). L'adoption de l'analyse de l'apprentissage dans les organisations éducatives nécessite des capacités qui ne sont pas encore totalement développées (Ifenthaler, 2017[45]). Elle n'a pas fait l'objet d'une mise en œuvre organisationnelle à grande échelle. Il n'y a donc pas de preuves empiriques que cette méthode améliore la performance des organisations éducatives. Des démarches internationales en faveur des modèles d'adoption (Nouri et al., 2019[46]) ainsi que des recommandations politiques (Ifenthaler et Yau, 2019[12] ; Tsai et al., 2018[47]) pourraient contribuer à faire avancer les choses.

Des questions importantes se posent également : À qui appartiennent les données mises à la disposition des enseignants et des apprenants ? Quelles données doivent être accessibles et lesquelles doivent rester privées ? Qui les analyse et dans quel but ? Que peuvent en faire les enseignants ? Quel retour d'information et quel suivi de l'apprentissage les étudiants peuvent-ils attendre des analyses des données de l'apprentissage ? Comment utiliser équitablement les évaluations fondées sur les technologies et quels sont les risques liés à l'utilisation des données pour évaluer les résultats des apprenants ?

En gardant à l'esprit les avantages que comporte l'analyse de l'apprentissage pour la gestion des établissements scolaires et des systèmes, on peut appliquer les mises en œuvre suivantes :

- L'analyse de l'apprentissage peut être utilisée pour élaborer des programmes d'études spécialisés, en phase avec la demande du marché du travail, afin de mieux préparer les étudiants à leur future carrière. Il existe déjà des exemples de données sur le marché du travail qui soutiennent l'apprentissage sur le lieu de travail (Berg, Branka et Kismihók, 2018[48]). Il n'y a peut-être plus qu'un petit pas à faire dans cette direction.
- L'analyse de l'apprentissage peut faciliter la gestion des cours et la refonte des supports d'apprentissage afin d'offrir des possibilités d'apprentissage plus flexibles (Gosper et Ifenthaler, 2014[49]). Cette approche peut également inclure l'apprentissage professionnel adaptatif et à la demande pour les professionnels de l'éducation.
- Les applications d'analyse de l'apprentissage peuvent prendre en charge une multitude de tâches administratives (Bowers et al., 2019[50]). Parmi celles-ci figurent les activités de budgétisation, d'achat et d'approvisionnement, ainsi que de la gestion des installations. En outre, la gestion des ressources humaines peut mieux prendre en charge les demandes des différents professionnels de l'éducation. Ces systèmes peuvent contribuer à la souplesse de l'enseignement et de l'apprentissage, dans les établissements ou en dehors de ceux-ci, de manière très économique. Ils peuvent aider à gérer une variété de programmes de cours spécialisés, la taille des classes, le personnel enseignant, les technologies et les exigences générales liées à l'environnement d'apprentissage, comme les salles de cours ou même le mobilier.
- Dans cette optique, les procédures d'inscription correspondront mieux au besoin des apprenants et permettront aux établissements d'enseignement et au corps enseignant de micro-adapter l'environnement d'apprentissage. Des applications de traduction adaptative aideront les établissements à communiquer avec les parents et à gérer les élèves malades ou absents

Les décideurs politiques sont invités à élaborer et à coordonner des politiques qui encourageront l'adoption de l'analyse de l'apprentissage afin de faciliter la gestion des établissements scolaires et des systèmes. Cette démarche doit se baser sur des résultats de recherche rigoureux, qui font actuellement défaut. Il faut encourager la R-D afin de développer des systèmes d'analyse de l'apprentissage fiables et efficaces pour gérer les établissements scolaires et les systèmes éducatifs.

En résumé, les décideurs politiques, les chercheurs et les praticiens (Ifenthaler et al., In progress[51]) peuvent envisager les stratégies et actions suivantes :

- *Une pratique fondée sur des données probantes et axée sur l'analyse* : les chercheurs doivent recueillir davantage d'éléments probants concernant l'utilisation de l'analyse de l'apprentissage afin de développer des systèmes qui ont un impact positif sur l'apprentissage. Les décideurs sont en mesure alors d'élaborer de manière plus fiable des politiques d'analyse de l'apprentissage axées sur le leadership, l'apprentissage professionnel, les mécanismes habilitants et la gouvernance des données avec une confiance accrue.
- *Promouvoir l'adoption de l'analyse de l'apprentissage* : l'ouverture au changement culturel facilite l'acceptation sociale et l'adoption, et aide à encadrer le développement de normes, de principes et de procédures par les décideurs politiques. Ces actions ont un effet d'entraînement : elles facilitent l'évolution des principes et des

politiques en impliquant les communautés concernées dans le processus continu d'adaptation et d'amélioration de la réponse organisationnelle au changement.

- *Informer et accompagner les prestataires et les utilisateurs de services de données* : les pratiques d'analyse d'apprentissage respectueuses de l'éthique sont soutenues par des mécanismes politiques tels que des normes, des processus d'accréditation, des audits et des recommandations fondées sur des preuves et étayées par la pratique. Les chercheurs jouent ici un rôle essentiel dans la promotion de la durabilité et de l'extensibilité des politiques et des pratiques, par exemple en produisant les connaissances nécessaires pour intégrer efficacement l'analyse et fournir des services de données opportuns qui soutiennent une bonne prise de décision axée sur l'apprentissage. Cette stratégie, qui consiste à équilibrer judicieusement les investissements entre les services de données et les utilisateurs, favorise l'offre et la demande de flux d'informations, ce qui accélère l'adoption et conduit à des changements positifs.
- *Impact de l'apprentissage grâce aux outils d'analyse* : la priorité de l'analyse de l'apprentissage devrait être de renforcer l'apprentissage dans le but d'avoir un système éducatif plus équitable et plus efficace. C'est seulement, en second lieu, que la responsabilité, les tests, le changement organisationnel ou l'efficacité financière devraient entrer en ligne de compte. Toutes les parties prenantes, y compris les praticiens, les chercheurs et les décideurs, ont besoin de développer leur culture des données afin de pouvoir utiliser ce nouvel outil et exploiter les informations que l'analyse de l'apprentissage génère.
- *Le rôle des prestataires de services dans les solutions d'analyse, l'adoption et la mise en œuvre de systèmes d'analyse* : il y a de plus en plus de prestataires qui commercialisent des systèmes pour aider à la gestion des établissements. Un prestataire, tel que BrightBytes (https://www.brightbytes.net), développe des solutions et fournit des preuves via des études autofinancées sur les avantages à mettre en œuvre des systèmes d'analyse de l'apprentissage. Les chercheurs devraient considérer d'un œil critique ces solutions commerciales tout en cherchant des preuves indépendantes rigoureuses par rapport aux avantages annoncés. Les décideurs politiques peuvent recenser les solutions commerciales existantes et prendre acte de leur adoption croissante dans les structures éducatives.

Références

Agasisti, T. et A. Bowers (2017), « Data analytics and decision-making in education: towards the educational data scientist as a key actor in schools and higher education institutions », dans Johnes, G. et al. (dir.pub.), *Handbook of contemporary education economics,* Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK. [19]

Andresen, B. (2017), « Learning analytics for formative purposes », dans Tatnall, A. and M. Webb (dir.pub.), *Tomorrow's Learning: Involving Everyone. Learning with and about Technologies and Computing. WCCE 2017. IFIP Advances in Information and Communication Technology,* Springer, Cham. [17]

Argyris, C. et D. Schon (1974), *Theory in practice: Increasing professional effectiveness,* Jossey-Bass, San Francisco, CA. [35]

Berg, A., J. Branka et G. Kismihók (2018), « Combining learning analytics with job market intelligence to support learning at the workplace », dans Ifenthaler, D. (dir. pub.), *Digital workplace learning. Bridging formal and informal learning with digital technologies,* Springer, Cham. [48]

Bowers, A., A. Bang, Y. Pan et K. Edward (2019), *Education leadership data analytics (ELDA): A white paper report on the 2018 ELDA Summit,* Teachers College, Columbia University. [50]

Buckingham Shum, S. et T. McKay (2018), « Architecting for learning analytics. Innovating for sustainable impact », *EDUCAUSE Review,* Vol. 53/2, pp. 25-37. [2]

Colvin, C., T. Rogers, A. Wade, S. Dawson, D. Gašević, S. Buckingam Shum et K. Nelson (2015), *Student retention and learning analytics: A snapshot of Australian practices and a framework for advancement,* Australian Government Office for Learning and Teaching, Canberra, ACT. [7]

Dawson, S., J. Jovanovic, D. Gasevic et A. Pardo (2017), « From prediction to impact: Evaluation of a learning analytics retention program », dans Molenaar, I., X. Ochoa and S. Dawson (dir.pub.), *Proceedings of the seventh international learning analytics & knowledge conference,* ACM, New York, NY. [44]

Drachsler, H. et W. Greller (2016), *Privacy and analytics - it's a DELICATE issue. A checklist for trusted learning analytics.* [10]

Dyckhoff, A., D. Zielke, M. Bültmann, M. Chatti et U. Schroeder (2012), « Design and implementation of a learning analytics toolkit for teachers », *Educational Technology & Society*, Vol. 15/3, pp. 58-76. [3]

Ferguson, R., D. Clow, L. Macfadyen, A. Essa, S. Dawson et S. Alexander (2014), *Setting learning analytics in context: Overcoming the barriers to large-scale adoption,* http://dx.doi.org/10.1145/2567574.2567592. [27]

Gander, T. (2020), « Learning analytics in secondary schools », dans Peters, M. and R. Heraud (dir.pub.), *Encyclopedia of educational innovation,* Springer, Singapore. [18]

Gašević, D., S. Dawson et G. Siemens (2015), "Let's not forget: Learning analytics are about learning", *TechTrends*, Vol. 59/1, pp. 64-71, http://dx.doi.org/10.1007/s11528-014-0822-x. [43]

Gašević, D., Y.S. Tsai, S. Dawson et A. Pardo (2019), « How do we start? An approach to learning analytics adoption in higher education », *International Journal of Information and Educational Technology*, Vol. 36/4, pp. 342-353, http://dx.doi.org/10.1108/IJILT-02-2019-0024. [6]

Gibson, D., S. Huband, D. Ifenthaler et E. Parkin (2018), *Return on investment in higher education retention: Systematic focus on actionable information from data analytics.* [34]

Gosper, M. et D. Ifenthaler (2014), « Curriculum design for the twenty-first Century », dans Gosper, M. and D. Ifenthaler (dir.pub.), *Curriculum models for the 21st Century. Using learning technologies in higher education,* Springer, New York, NY. [49]

Heath, J. et E. Leinonen (2016), « An institution wide approach to learning analytics », dans Anderson, M. and C. Gavan (dir. pub.), Developing effective educational experiences through learning analytics, IGI Global, Hershey, PA. [26]

Hinkelmann, M. et T. Jordine (2019), « The LAPS project: using machine learning techniques for early student support », dans Ifenthaler, D., J. Yau and D. Mah (dir.pub.), *Utilizing learning analytics to support study success, Springer,* Cham. [29]

Huang, R., J. Spector et J. Yang (2019), « Design-based research », dans Huang, R., J. Spector and J. Yang (dir.pub.), *Educational technology. A primer for the 21st century,* Springer, Singapore. [36]

Ifenthaler, D. (2020), « Change management for learning analytics », dans Pinkwart, N. and S. Liu (dir.pub.), *Artificial intelligence supported educational technologies,* Springer, Cham. [31]

Ifenthaler, D. (2017), « Are Higher Education Institutions Prepared for Learning Analytics? », *TechTrends*, Vol. 61/4, pp. 366-371, http://dx.doi.org/10.1007/s11528-016-0154-0. [45]

Ifenthaler, D. (2015), « Learning analytics », dans Spector, J. (dir. pub.), *The SAGE encyclopedia of educational technology,* Sage, Thousand Oaks, CA. [1]

Ifenthaler, D. et D. Gibson (2020), *Adoption of data analytics in higher education learning and teaching*, Springer, Cham. [11]

Ifenthaler, D., D. Gibson, D. Prasse, A. Shimada et M. Yamada (en cours de publication), « Putting learning back into learning analytics: actions for policy makers, researchers, and practitioners », *Educational Technology Research and Development.* [51]

Ifenthaler, D., D. Mah et J. Yau (2019), « Utilising learning analytics for study success. Reflections on current empirical findings », dans Ifenthaler, D., J. Yau and D. Mah (dir.pub.), *Utilizing learning analytics to support study success,* Springer, Cham. [40]

Ifenthaler, D. et C. Widanapathirana (2014), « Development and Validation of a Learning Analytics Framework: Two Case Studies Using Support Vector Machines », *Technology, Knowledge and Learning*, Vol. 19/1-2, pp. 221-240, http://dx.doi.org/10.1007/s10758-014-9226-4. [24]

Ifenthaler, D. et J. Yau (2020), « Utilising learning analytics to support study success in higher education: a systematic review », *Educational Technology Research and Development*, Vol. 68/4, pp. 1961-1990, http://dx.doi.org/10.1007/s11423-020-09788-z. [37]

Ifenthaler, D. et J. Yau (2019), « Higher Education Stakeholders' Views on Learning Analytics Policy Recommendations for Supporting Study Success », *International Journal of Learning Analytics and Artificial Intelligence for Education (iJAI),* Vol. 1/1, pp. 28, http://dx.doi.org/10.3991/ijai.v1i1.10978. [12]

Ifenthaler, D., J. Yau et D. Mah (2019), *Utilizing learning analytics to support study success,* Springer, New York, NY. [23]

Jimerson, J. et J. Childs (2017), « Signal and symbol: how state and local policies address data-informed practice », *Educational Policy*, Vol. 31/5, pp. 584-614. [21]

Kärner, T., J. Warwas et S. Schumann (2020), « A Learning Analytics Approach to Address Heterogeneity in the Classroom: The Teachers' Diagnostic Support System », *Technology, Knowledge and Learning,* http://dx.doi.org/10.1007/s10758-020-09448-4. [28]

Kevan, J. et P. Ryan (2016), « Experience API: Flexible, Decentralized and Activity-Centric Data Collection », *Technology, Knowledge and Learning*, Vol. 21/1, pp. 143-149, http://dx.doi.org/10.1007/s10758-015-9260-x. [38]

Klasen, D. et D. Ifenthaler (2019), « Implementing learning analytics into existing higher education legacy systems », dans Ifenthaler, D., J. Yau and D. Mah (dir.pub.), *Utilizing learning analytics to support study success,* Springer, New York, NY. [4]

Kotter, J. (2007), « Leading change: Why transformation efforts fail », *Havard Business Review,* Vol. January, pp. 96-103. [8]

Leitner, P., M. Ebner et M. Ebner (2019), « Learning analytics challenges to overcome in higher education institutions », dans Ifenthaler, D., J. Yau and D. Mah (dir.pub.), *Utilizing learning analytics to support study success,* Springer, Cham. [30]

Lester, J., C. Klein, A. Johri et H. Rangwala (2017), *Learning analytics in higher education,* Wiley, Malden, MA. [14]

Lockyer, L., E. Heathcote et S. Dawson (2013), « Informing Pedagogical Action », *American Behavioral Scientist,* Vol. 57/10, pp. 1439-1459, http://dx.doi.org/10.1177/0002764213479367. [41]

Long, P. et G. Siemens (2011), « Penetrating the fog: Analytics in learning and education », *EDUCAUSE Review,* Vol. 46/5, pp. 31-40. [42]

Nouri, J., M. Ebner, D. Ifenthaler, M. Saqr, J. Malmberg, M. Khalil, J. Bruun, O. Viberg, M.A. Conde González, Z. Papamitsiou et U. Berthlsen (2019), « Efforts in Europe for Data-Driven Improvement of Education – A Review of Learning Analytics Research in Seven Countries », *International Journal of Learning Analytics and Artificial Intelligence for Education (iJAI),* Vol. 1/1, pp. 8, http://dx.doi.org/10.3991/ijai.v1i1.11053. [46]

Pistilli, M. et K. Arnold (2010), « Purdue Signals: Mining real-time academic data to enhance student success », *About campus: Enriching the student learning experience,* Vol. 15/3, pp. 22-24. [5]

Psacharopoulos, G. (2014), « The returns to investment in higher education », dans Menon, M., D. Terkla and P. Gibbs (dir.pub.), *Using data to improve higher education. Global perspectives on higher education*, Sense Publishers, Rotterdam. [33]

Rogers, E. (1962), *Diffusion of innovations*, Free Press of Glencoe, New York, NY. [9]

Schumacher, C., D. Klasen et D. Ifenthaler (2019), « Implementation of a learning analytics system in a productive higher education environment », dans Khine, M. (dir. pub.), *Emerging trends in learning analytics,* Brill, Leiden, NL. [32]

Sclater, N. et J. Mullan (2017), *Learning analytics and student success – assessing the evidence,* JISC, Bristol. [22]

Sergis, S. et D. Sampson (2016), « School analytics: a framework for supporting school complexity leadership », dans Spector, J. et al. (dir.pub.), *Competencies in teaching, learning and educational leadership in the digital age*, Springer, Cham. [20]

Seufert, S., C. Meier, M. Soellner et R. Rietsche (2019), « A pedagogical perspective on big data and learning analytics: a conceptual model for digital learning support », *Technology, Knowledge and Learning*, Vol. 24/4, pp. 599-619, http://dx.doi.org/10.1007/s10758-019-09399-5. [39]

Siemens, G., S. Dawson et G. Lynch (2014), *Improving the quality and productivity of the higher education sector - Policy and strategy for systems-level deployment of learning analytics. Canberra, Australia: Office of Learning and Teaching*, Australian Government, http://solaresearch.org/Policy_Strategy_Analytics.pdf. [15]

Tsai, Y. et D. Gašević (2017), *Learning analytics in higher education - challenges and policies: A review of eight learning analytics policies.* [13]

Tsai, Y., P. Moreno-Marcos, I. Jivet, M. Scheffel, K. Tammets, K. Kollom et D. Gašević (2018), « The SHEILA Framework: Informing Institutional Strategies and Policy Processes of Learning Analytics », *Journal of Learning Analytics*, Vol. 5/3, http://dx.doi.org/10.18608/jla.2018.53.2. [47]

Viberg, O., M. Hatakka, O. Bälter et A. Mavroudi (2018), « The current landscape of learning analytics in higher education », *Computers in Human Behavior*, Vol. 89, pp. 98-110, http://dx.doi.org/10.1016/j.chb.2018.07.027. [16]

Yau, J. et D. Ifenthaler (2020), « Reflections on Different Learning Analytics Indicators for Supporting Study Success », *International Journal of Learning Analytics and Artificial Intelligence for Education (iJAI)*, Vol. 2/2, pp. 4, http://dx.doi.org/10.3991/ijai.v2i2.15639. [25]

9 Systèmes d'alerte précoce et indicateurs de décrochage scolaire dans le deuxième cycle de l'enseignement secondaire : Le rôle émergent des technologies numériques

Alex J. Bowers
Teachers' College (Institut pédagogique) de l'Université de Columbia, États-Unis

Ce chapitre passe en revue la littérature scientifique et se penche sur la pratique concernant l'utilisation des technologies émergentes pour prédire et prévenir le décrochage scolaire dans le deuxième cycle du secondaire. Tout d'abord, il présente les recherches actuelles sur les systèmes et indicateurs d'alerte précoce et analyse la précision des variables prédictives du décrochage. Il montre l'intérêt des recherches en question et présente une typologie des profils de décrochage. Ensuite, il donne un aperçu des méthodologies numériques émergentes issues de l'analyse des modèles, de la science des données, de l'analyse des big data, de l'analyse de l'apprentissage et de l'apprentissage automatique, et comment elles sont appliquées pour identifier des variables prédictives fiables du décrochage scolaire. La conclusion se penche sur l'avenir des systèmes et indicateurs d'alerte précoce, tant du point de vue de la recherche que de la politique. Elle préconise le recours à des algorithmes et des codes en accès libre tout en soulignant la nécessité d'inclure les utilisateurs dans leur conception et mise en œuvre. Un cadre de référence, précis, accessible, exploitable et redevable, dit des 4A en anglais (accurate, accessible, actionable et accountable), est appelé à régir les indicateurs d'alerte précoce.

Introduction

Les élèves qui ne parviennent pas à obtenir un diplôme du deuxième cycle de l'enseignement secondaire constituent un problème à l'échelle mondiale. Alors que le taux moyen d'obtention d'un diplôme de fin du secondaire dans les pays de l'OCDE est de 81 %, on observe d'importantes variations d'un pays à l'autre, avec un taux de 60 % à l'âge de 25 ans au Mexique et des taux élevés d'environ 90 % en Grèce, en Corée (Corée du Sud) et en Slovénie (OECD, 2019[1]). Il est établi que le fait de ne pas obtenir un diplôme du deuxième cycle du secondaire (aussi appelé « décrochage ») a des effets négatifs sur la vie des élèves, tels qu'un niveau de diplôme inférieur, des revenus plus faibles au cours de la vie, des taux d'incarcération plus élevés, ainsi que des effets négatifs sur la santé (Belfield et Levin, 2007[2] ; Lyche, 2010[3] ; Rumberger, 2011[4] ; Rumberger et al., 2017[5]). Tous les systèmes éducatifs doivent veiller en priorité à ce que les élèves obtiennent leur diplôme du deuxième cycle de l'enseignement secondaire. Il faut donc détecter de manière précoce quels sont les élèves les plus susceptibles de rencontrer des difficultés

dans leur parcours scolaire et de quitter l'école finalement. Grâce à des systèmes de prédiction précise et d'alerte précoce, les élèves peuvent bénéficier de ressources supplémentaires à même de favoriser leur persévérance et leur réussite (Bowers et Zhou, 2019[6]). Le domaine des systèmes et indicateurs d'alerte précoce en matière d'éducation est assez récent (Allensworth, 2013[7] ; Balfanz et Byrnes, 2019[8] ; Carl et al., 2013[9] ; Davis, Herzog et Legters, 2013[10] ; Frazelle et Nagel, 2015[11] ; Kemple, Segeritz et Stephenson, 2013[12] ; Mac Iver, 2013[13] ; McMahon et Sembiante, 2020[14]); il vise à fournir des variables prédictives exploitables qui ciblent les élèves risquant de ne pas obtenir leur diplôme du deuxième cycle de l'enseignement secondaire (Allensworth, Nagaoka et Johnson, 2018[15]). Alors qu'à ce jour les secteurs non éducatifs exploitent de plus en plus les technologies disponibles par le biais des domaines émergents du big data, de la science des données, de l'analyse des données et de l'apprentissage automatique (Piety, Hickey et Bishop, 2014[16]), l'application de ces technologies aux systèmes d'alerte précoce du décrochage scolaire n'est apparue que récemment (Agasisti et Bowers, 2017[17] ; Baker et al., 2020[18] ; Bowers et al., 2019[19]). L'objectif de ce chapitre est de passer en revue les avancées en matière de prédiction du décrochage et d'examiner le fonctionnement des systèmes et indicateurs d'alerte précoce. Il se concentre sur l'application des innovations actuelles dans les domaines technologiques de l'apprentissage automatique, de l'analyse des données et de leurs modèles pour envisager les développements prometteurs dans ce domaine. Étant donné que la situation aux États-Unis a fait l'objet de nombreux travaux de recherche au niveau du deuxième cycle du secondaire, nous nous concentrons principalement sur les études américaines, et faisons appel à des études étrangères lorsque cela est possible. Dans nos conclusions, nous évoquons les développements à venir et tournons ensuite notre regard vers l'avenir.

Systèmes et indicateurs d'alerte précoce

Dans toute la littérature scientifique sur le décrochage scolaire, l'accent est mis sur la création de ce que l'on appelle les systèmes d'alerte précoce et les indicateurs d'alerte précoce. Ces systèmes ont pour objectif de fournir des variables prédictives exploitables concernant les difficultés des élèves et d'aider les établissements scolaires à mettre en œuvre des mesures spécifiques pour favoriser la résilience et la réussite des élèves (Allensworth, Nagaoka et Johnson, 2018[15] ; Balfanz et Byrnes, 2019[8] ; Mac Iver et Messel, 2013[20] ; Davis, Herzog et Legters, 2013[10] ; McMahon et Sembiante, 2020[14]). Dans la mesure où cette méthode de personnalisation collecte des données (Agasisti et Bowers, 2017[17]), le système d'alerte précoce regroupe des indicateurs dans un dispositif unique qui permet d'allouer plus efficacement les ressources limitées des établissements en direction des élèves qui sont susceptibles de décrochage (également dénommés « élèves à risque ») (Carl et al., 2013[9] ; Dynarksi et al., 2008[21] ; Dynarski et Gleason, 2002[22] ; Mac Iver, 2013[13] ; Rumberger et al., 2017[5] ; Stuit et al., 2016[23]). Dans le cadre de ces efforts qui visent à renforcer la résilience des élèves, de nombreux travaux de recherche, provenant du système scolaire de la ville de Chicago (qui constitue un vaste système éducatif en milieu urbain), ont élaboré des indicateurs de « bonne voie » (Allensworth, 2013[7] ; Allensworth et Easton, 2005[24] ; Allensworth et Easton, 2007[25] ; Hartman et al., 2011[26] ; Kemple, Segeritz et Stephenson, 2013[12]). Plutôt que de se concentrer sur le contexte, les antécédents et les facteurs démographiques des élèves, comme le statut socio-économique de la famille (qui influencent fortement la persévérance des élèves (Rumberger, 2011[4]), ces systèmes se concentrent sur les variables prédictives et les indicateurs qui permettent, grâce à leur caractère malléable, aux établissements de fournir un soutien efficace aux élèves (McMahon et Sembiante, 2020[14]).

Cependant, il reste encore beaucoup à faire pour déterminer exactement quels indicateurs sont effectivement précis et prédictifs selon les systèmes éducatifs, quel mode de transmission employer pour que ces informations soient utiles aux établissements scolaires, et ensuite comment les établissements peuvent exploiter ces informations. Par exemple, dans une étude récente qui a choisi au hasard 73 établissements scolaires aux États-Unis et leur a demandé d'utiliser un système d'intervention et de surveillance d'alerte précoce, les établissements de référence ont constaté un an après une diminution des absences chroniques et des échecs des élèves à risque, mais il n'y a pas eu d'effet sur les renvois, la faible moyenne des notes ou l'accumulation de crédits par les élèves (Faria et al., 2017[27]). L'accumulation de crédits est considérée comme un résultat concret de cette étude, c'est un indicateur probant de la persévérance des élèves et de leur réussite potentielle. De la même manière, dans le cadre d'une récente expérience contrôlée menée au hasard dans 41 établissements scolaires aux États-Unis, les établissements de référence ont demandé à un membre du personnel à mi-temps de surveiller les indicateurs d'alerte précoce en neuvième année et de fournir un soutien pédagogique : les établissements en question ont réduit l'absentéisme chronique, mais n'ont pas vu évoluer de manière significative les échecs aux cours ou le nombre de crédits obtenus par les élèves (Mac Iver et al., 2019[28]). Petit bémol cependant : il faut relever que les indicateurs d'alerte précoce peuvent s'avérer plus ou moins pertinents selon les cultures (Encadré 9.1 et Encadré 9.2). Même s'il reste encore

beaucoup de choses à apprendre, les systèmes et indicateurs d'alerte précoce sont un domaine de recherche et de pratique fascinant en pleine expansion. Leur objectif est d'identifier les élèves présentant un risque de décrochage et d'intervenir positivement pour soutenir la persévérance des apprenants, en utilisant les techniques d'exploration de données les plus récentes.

Encadré 9.1 Système d'alerte précoce en Inde

Afin de lutter contre le taux élevé de décrochage scolaire, le gouvernement de l'Andhra Pradesh, État du sud-est de l'Inde, a mis en œuvre une application développée par Microsoft qui s'appuie sur l'apprentissage automatique pour prédire le décrochage scolaire (Azure). À partir de données telles que les inscriptions, les résultats des élèves, le sexe, les données démographiques et socio-économiques, les infrastructures scolaires, ainsi que les compétences et l'expérience des enseignants, le logiciel a pour but d'extraire des modèles et de faire des prédictions. Les responsables de l'éducation utilisent les résultats pour orienter leurs interventions et hiérarchiser leurs investissements. Selon une source gouvernementale, Azure a identifié plus de 60 modèles de décrochage scolaire dans cet État indien. L'utilisation de manuels scolaires obsolètes, par exemple, freine certains élèves. Autre cas de figure : les élèves ayant de moins bons résultats en anglais ou en mathématiques courent davantage le risque d'abandonner l'école, car ils estiment avoir moins de chances de trouver un bon emploi ou d'entrer dans une bonne université. Autre exemple : les filles ont par exemple tendance à ne pas aller en classe si les toilettes de l'établissement scolaire ne fonctionnent pas. En 2019, on a constaté que plus de 10 000 établissements scolaires dans l'Andhra Pradesh utilisaient Azure comme système d'alerte précoce.

Sources: India AI, 2019[29]; The Wire, 2016[30]; MSV, 2016[31].

Encadré 9.2 Promouvoir l'obtention d'un diplôme dans l'enseignement et la formation professionnels (EFP) à Helsinki (Finlande)

En Finlande, environ la moitié des élèves ayant terminé leur éducation de base poursuivent leurs études dans l'enseignement professionnel (plutôt que dans l'enseignement général, mais ils peuvent poursuivre leur cursus à l'université après avoir obtenu leur diplôme en EFP s'ils le souhaitent). L'enseignement et la formation professionnels sont basés sur les compétences et laissent une grande liberté aux élèves : il n'y a pas de cours à proprement parler, pas de classes, pas de leçons traditionnelles, pas de matières scolaires et pas d'horaires hebdomadaires traditionnels. Certains élèves peuvent obtenir leur diplôme en quelques mois, d'autres, en trois ans. Tous les élèves ont un plan personnel de développement des compétences pour les aider à acquérir les qualifications requises dans leur domaine. À Helsinki, un système basé sur l'IA (AI-HOKS) a été développé pour aider les élèves qui suivent une formation de l'EFP à obtenir leur diplôme (et limiter les risques de décrochage). Son principal objectif est d'identifier le plus tôt possible la phase d'apprentissage où les étudiants auront le plus besoin de soutien, et de fournir un soutien semi-automatisé ou automatisé (p. ex., un accompagnement mobile). Le système soutient à la fois les élèves et les enseignants, en se concentrant au fil du temps sur quatre dimensions principales : la phase d'apprentissage, l'activité d'apprentissage, l'apprentissage en lui-même et l'engagement social, et la progression dans les études. Les indicateurs d'alerte et d'intervention précoces se fondent sur : 1) les plans de développement des compétences personnelles (y compris les délais de mise en œuvre, les compétences acquises et l'auto-évaluation) ; 2) la fréquence des connexions et l'utilisation de divers outils et environnements d'apprentissage ; 3) les questionnaires mobiles hebdomadaires envoyés sur les téléphones portables des élèves, et ; 4) les commentaires des élèves fournis par le biais du système. Dans le souci de fournir des analyses d'apprentissage éthiques, les méthodes statistiques traditionnelles qui classifient ou profilent les étudiants ne sont pas utilisées. En lieu et place, les données de terrain sont collectées pour servir de base à la construction de modèles d'apprentissage automatique qui pourront être employés lorsque le système aura été utilisé pendant quelques années et que des ensembles de données plus importants seront disponibles. En 2021, le système est encore à l'essai, de sorte que les informations sur son efficacité ne sont pas encore disponibles.

Source: Interview entre Pasi Silander et Stéphan Vincent-Lancrin, 2021[32].

Précision des variables prédictives du décrochage scolaire

Une préoccupation majeure liée aux systèmes et indicateurs d'alerte précoce concerne la précision des indicateurs servant à prédire la probabilité de décrochage d'un élève. Alors que de nombreuses études examinent une série de variables prédictives sous l'angle des corrélations, des régressions logistiques ou d'autres types de statistiques similaires, puis indiquent quelles variables sont les plus significatives pour prédire l'obtention d'un diplôme ou le décrochage d'un élève (Allensworth et Easton, 2007[25] ; Balfanz, Herzog et Mac Iver, 2007[33] ; Bowers, 2010[34]), des recherches récentes se sont concentrées sur la précision des variables prédictives à l'aide de la théorie de la détection du signal (Bowers, Sprott et Taff, 2013[35] ; Bowers et Zhou, 2019[6]). Dans cette théorie (Swets, 1988[36] ; Swets, Dawes et Monahan, 2000[37]), on compare toutes les variables prédictives potentielles à l'aide d'un diagramme FER (fonction d'efficacité du récepteur) qui compare la sensibilité d'une variable prédictive à sa spécificité, ou les vrais positifs aux faux positifs, car on souhaite que la variable prédictive d'un événement identifie tous les cas où l'événement se produit effectivement (dans le cas présent, le décrochage) sans identifier des cas erronés (Bowers et Zhou, 2019[6]). Par exemple, une variable prédictive du décrochage peut être très spécifique, en ce sens que tous les élèves présentant une combinaison de facteurs peuvent décrocher, mais cette variable prédictive peut s'avérer en revanche peu sensible dans la mesure où le pourcentage d'élèves présentant cette combinaison de facteurs et qui finissent par décrocher peut être très faible.

En utilisant la théorie de la détection du signal, Bowers, Sprott et Taff (2013) ont comparé 110 variables prédictives de décrochage qu'ils ont identifiées dans l'ensemble de la littérature scientifique. Ils ont démontré que la grande majorité de ces variables prédictives n'étaient pas meilleures qu'une supposition aléatoire. Cependant, les auteurs sont parvenus à identifier deux ensembles spécifiques d'indicateurs d'alerte précoce plus précis que les autres.

Le premier est l'indicateur d'alerte précoce de Chicago. Élaboré après plus d'une décennie de recherches menées dans le système scolaire urbain de Chicago (Allensworth, 2013[7] ; Allensworth et Easton, 2005[24] ; Allensworth et Easton, 2007[25] ; Allensworth et al., 2014[38] ; Allensworth, Nagaoka et Johnson, 2018[15]), l'indicateur de « bonne voie » de Chicago a été identifié comme la variable prédictive transversale du décrochage la plus précise (transversale signifiant ici que les données de la variable proviennent d'une seule année), et se concentre sur les élèves de neuvième année et sur les notes faibles ou insuffisantes dans des matières essentielles telles que les mathématiques ou l'anglais, ainsi que sur les crédits obtenus. Cet indicateur, qui est facilement disponible et utilisable pour les professionnels de l'éducation, constitue un indicateur d'alerte précoce plus précis que les indicateurs transversaux comparables qui combinent les informations existant actuellement dans le système de gestion des données éducatives des établissements scolaires. Néanmoins, si l'indicateur de Chicago est plus précis que d'autres indicateurs transversaux, la même étude de Bowers et al. (2013) a fait état de variables prédictives du décrochage beaucoup plus précises qui, elles, reposent sur des données longitudinales qui s'inscrivent dans le long terme.

Dans leur étude comparative sur les 110 variables prédictives du décrochage, le deuxième ensemble d'indicateurs d'alerte précoce le plus précis a été généré par une méthode qui fournit systématiquement les variables prédictives les plus précises du décrochage (Bowers, Sprott et Taff, 2013[35]); il s'agit du modèle de croissance à mélange de distribution (Growth Mixture Modelling en anglais ou GMM en abrégé). Cette technique a la capacité d'identifier des modèles de données d'élèves significativement différents au fil du temps (voir l'Encadré 9.3). Trois analyses basées sur le GMM ont été identifiées pour prédire le décrochage scolaire avec une précision extrêmement élevée par rapport à toutes les autres variables prédictives (Bowers, Sprott et Taff, 2013[35]). Premièrement, à partir d'un échantillon de plus de 10 000 élèves du Québec (Canada) âgés de 12 à 16 ans, les auteurs ont examiné l'implication des élèves dans l'établissement scolaire au fil du temps, en fonction de l'assiduité, la discipline et l'intérêt éprouvé pour les matières, et ont identifié des trajectoires spécifiques de faible implication prédisant le décrochage (Janosz et al., 2008[39]). Deuxièmement, une étude utilisant des milliers de résultats en mathématiques d'élèves du secondaire aux États-Unis a identifié des trajectoires spécifiques de progrès ou de régression qui se sont avérées prédictives du décrochage (Muthén, 2004[40]). Et troisièmement, au premier rang de ces études de prédiction très précise figure une étude des trajectoires des moyennes pondérées non agrégées (Bowers et Sprott, 2012[41]).

Dans leur étude, Browers et Sprott (2012[41]) ont analysé les moyennes pondérées non agrégées de plus de 5 000 élèves aux États-Unis au cours de trois semestres, soit le premier semestre de la neuvième année, le deuxième semestre de la neuvième année et le premier semestre de la dixième année. La moyenne pondérée

non agrégée est la moyenne des notes obtenues par un élève dans une année d'études donnée, toutes matières confondues. Selon les auteurs, il est pertinent d'examiner ces données sur les notes, car les établissements scolaires du monde entier attribuent et recueillent régulièrement les notes attribuées par les enseignants. Pourtant, cet ensemble de données a rarement été exploité dans le passé comme une donnée importante dans certains systèmes de politique éducative (Bowers, 2009[48] ; Bowers, 2011[49] ; Bowers, 2019[50] ; Bowers et Sprott, 2012[41] ; Brookhart, 2015[51]). L'attention accordée aux moyennes pondérées non agrégées est une innovation par rapport aux moyennes pondérées agrégées, car la variance des données sur les étudiants d'une année à l'autre peut alors être utilisée pour saisir différents types de trajectoires (Bowers, 2007[52]).

Encadré 9.3 Modèle de croissance à mélange de distribution (GMM)

Le GMM est un cadre d'analyse de modèles qui identifie les différentes trajectoires de progression ou de régression statistiquement significatives des répondants par rapport à une variable au fil du temps (Bowers et White, 2014[42] ; Martin et von Oertzen, 2015[43] ; Masyn, 2011[44] ; Muthén, 2004[40] ; Ram et Grimm, 2009[45] ; Vermunt, Tran et Magidson, 2008[46]). En effet, le GMM se situe entre l'exploration de données et les statistiques inférentielles en tant que méthode au sein de la classe des modèles mixtes de modèles statistiques qui est liée à d'autres techniques d'analyse de modèles, telles que l'analyse par classification, tout en fournissant un cadre pour tester par inférence la probabilité d'inclusion dans les clusters, y compris les tests d'hypothèse et l'inclusion de variables de contrôle sur la probabilité d'appartenance à un groupe (Martin et von Oertzen, 2015[43] ; Vermunt et Magidson, 2002[47] ; Vermunt, Tran et Magidson, 2008[46]).

Bowers et Sprott (2012[41]) ont identifié quatre trajectoires significativement différentes de la moyenne pondérée non agrégée : 1) les étudiants dont les notes régressent au cours de cette période ; 2) les étudiants dont les notes sont relativement basses au départ et augmentent lentement au fil du temps ; 3) les étudiants qui constituent la majorité et ont des notes stables au fil du temps, proches de la moyenne ; et 4) les étudiants qui ont des notes élevées tout au long de la période. La principale conclusion est que, même si les deux premiers groupes ne constituent que 25 % de l'échantillon, ils représentent plus de 90 % de tous les élèves qui ont abandonné leurs études (Bowers et Sprott, 2012[41]). La majorité des décrocheurs ont connu la trajectoire des notes basses et de la lente augmentation : leurs notes augmentaient, mais apparemment pas assez vite. Les élèves présentant la trajectoire de régression des notes représentaient un pourcentage beaucoup plus faible des décrocheurs. Ces résultats, ainsi que ceux d'études précédentes utilisant les notes attribuées par les enseignants (Allensworth et Luppescu, 2018[53] ; Allensworth, Nagaoka et Johnson, 2018[15] ; Battin-Pearson et al., 2000[54] ; Bowers, 2010[34] ; Bowers, 2010[55] ; Finn, 1989[56] ; Hargis, 1990[57]), confirment la forte validité prédictive des notes sur les résultats à long terme des élèves, tels que la persévérance à l'école et l'obtention d'un diplôme. Bien que les notes aient la réputation, dans une partie de la littérature psychométrique, d'être moins fiables que les tests standardisés (Brookhart, 2015[51]), les recherches menées au cours des 100 dernières années ont démontré que les notes mesurent à la fois la réussite scolaire et la capacité d'un élève à s'inscrire dans le fonctionnement social de l'établissement scolaire qu'il fréquente, ce qui a un impact évident sur l'implication scolaire, la persévérance et les résultats ultérieurs dans la vie (Bowers, 2009[48] ; 2011[49] ; 2019[50] ; Brookhart et al., 2016[58] ; Kelly, 2008[59] ; Willingham, Pollack et Lewis, 2002[60]).

Dans une étude de suivi, à l'aide de l'analyse de structure latente et à partir d'un vaste échantillon d'élèves en décrochage scolaire généralisable à l'échelle nationale aux États-Unis, Bowers et Sprott (2012[61]) ont identifié plus précisément ces deux types d'élèves en décrochage scolaire, ainsi que le petit groupe restant qui représente moins de 10 % des décrocheurs. L'analyse de structure latente, à l'image du GMM, est une forme de modélisation mixte qui permet d'identifier des types de répondants significativement différents par le biais d'un ensemble d'items d'enquête (Collins et Lanza, 2010[62] ; Masyn, 2011[44] ; Muthén, 2004[40] ; Vermunt et Magidson, 2002[47]) et offre également la possibilité d'établir une typologie des répondants. Ici, les auteurs ont identifié trois types de décrocheurs. Cette étude correspondait à la recherche précédente sur la typologie des décrocheurs et identifiait les pourcentages de chaque type à travers les États-Unis (Bowers et Sprott, 2012[61]).

Tout d'abord, 38 % des élèves qui ont décroché représentaient le type de décrocheur « blasé » : ces élèves correspondent à la conception traditionnelle du décrocheur qui est perçu comme quelqu'un d'« inadapté » dans l'étude précédente, en ce sens que ces élèves n'aiment pas l'école, ne pensent pas que les enseignants sont là pour eux, et ont une conception générale blasée du processus de scolarisation. Il s'agit des élèves dont les notes sont faibles et régressent. Ce sont les élèves qui retournent le moins à l'école et dont les résultats à long terme sont faibles.

Deuxièmement, environ 53 % des décrocheurs appartenaient au groupe des décrocheurs « tranquilles ». Ce sont les élèves dont les notes étaient faibles initialement et augmentaient lentement. Il s'agit là d'un élément significatif, car ces élèves correspondent à la majorité de ceux qui décrochent, mais ils sont rarement identifiés par les systèmes scolaires comme étant « à risque ». En effet, ils aiment généralement l'école, y sont bien intégrés et ont des notes qui augmentent lentement — bien que leurs notes n'augmentent pas assez rapidement pour qu'ils puissent finalement réussir tous leurs cours et obtenir leur diplôme.

Le troisième type est celui des décrocheurs « impliqués », qui représentent environ 9 % des décrocheurs. Ces élèves étaient très impliqués dans leur établissement scolaire, avaient généralement des notes élevées et ont ensuite retrouvé le chemin de l'école. Finalement, ils obtiennent leur diplôme et poursuivent des études postsecondaires. Précédemment considérés comme des étudiants « perdus à la dernière minute » (Menzer et Hampel, 2009[63]), ces décrocheurs, bien que représentant le plus petit pourcentage d'élèves qui abandonnent l'école, semblent être les premiers qui devraient être ciblés par des mesures spécifiques. En effet, ils restent longtemps persévérants avant de décrocher et abandonnent souvent en raison d'un événement important dans leur vie privée (comme une grossesse ou un déménagement familial) ou de la découverte d'une erreur dans leur bulletin de notes qui les oblige à rattraper un cours alors qu'ils ne s'y attendaient pas.

Comme le soulignent ces études (Bowers et Sprott, 2012[41] ; 2012[61] ; Bowers, Sprott et Taff, 2013[35]), cette typologie concernant les décrocheurs constitue une avancée significative, car auparavant le décrochage scolaire ou le fait d'être « à risque » était considéré comme une seule catégorie monolithique. La vision d'une catégorie unique d'élèves touchés par le décrochage conduit à une approche naïve dans la mise au point de mesures pour remédier au problème. C'est peut-être pour cette raison que l'effet des mesures dans les essais contrôlés randomisés (ECR) axés sur le décrochage scolaire n'est pas évident à déterminer (Agodini et Dynarksi, 2004[64] ; Freeman et Simonsen, 2015[65]). Par exemple, compte tenu des résultats ci-dessus, les ECR qui accompagnent les élèves persévérants grâce à des mesures qui les reconnectent avec leur établissement scolaire font peut-être fausse route. Car ces mesures, basées sur l'idée traditionnelle que si un élève décroche c'est qu'il est blasé, ne se concentrent que sur un tiers des élèves qui décrochent effectivement alors qu'elles oublient la grande majorité des décrocheurs qui, eux, sont des décrocheurs tranquilles et impliqués. Il n'est donc pas surprenant que de nombreuses expériences aient eu du mal à démontrer les effets des interventions, car jusqu'à présent, les ECR sur les interventions à mettre en place en cas de décrochage n'ont pas mis l'accent sur la définition de mesures individualisées pour les trois différents types de décrocheurs (McMahon et Sembiante, 2020[14] ; Sansone, 2019[66]). Concrètement, les élèves blasés peuvent avoir besoin de renouer avec leur établissement scolaire, tandis que les élèves tranquilles peuvent tirer profit d'un encadrement pédagogique plus poussé, et les élèves impliqués de conseils par rapport aux événements concernant leur vie privée (Bowers et Sprott, 2012[61]).

De nombreuses études sur les systèmes et indicateurs d'alerte précoce évaluent un ensemble de variables pour prédire le décrochage en considérant la probabilité de décrochage des élèves comme faisant partie d'une seule catégorie. Comme l'indique la littérature sur la précision des variables prédictives du décrochage (Bowers, Sprott et Taff, 2013[35]) ainsi que sur les systèmes d'alerte précoce (McMahon et Sembiante, 2020[14]), c'est l'attention portée à la théorie de la typologie du décrochage qui contribue de manière significative à une plus grande précision des variables prédictives du décrochage basées sur le GMM, permettant d'identifier plus de 90 % des élèves qui décrochent. En outre, et c'est peut-être tout aussi important, la nature longitudinale de ces variables prédictives précises permet de saisir des trajectoires d'élèves sensiblement différentes au fil du temps. Une théorie majeure dans la littérature sur le décrochage scolaire qui est souvent négligée dans les recherches sur les systèmes et indicateurs d'alerte précoce (McMahon et Sembiante, 2020[14]) concerne ce qui a été appelé la « perspective du parcours de vie » (Alexander, Entwisle et Kabbani, 2001[67] ; Dupéré et al., 2018[68] ; Dupéré et al., 2015[69] ; Finn, 1989[56] ; Pallas, 2003[70]). Bien plus qu'un événement indépendant arrivant à un moment donné, l'échec des élèves dans le deuxième cycle de l'enseignement secondaire est considéré comme un long processus dans lequel de multiples facteurs de stress s'accumulent au fil du temps et finissent par pousser un élève à ne plus fréquenter

l'école. Il est donc important de comprendre ce processus sur le long terme pour prédire avec précision les élèves susceptibles d'abandonner leurs études. La méthode GMM offre un moyen utile d'analyser exactement ce type de données, en s'appuyant sur des données sur le long terme plutôt que sur des variables prédictives ponctuelles, ce qui permet d'accroître la précision des variables prédictives basées sur le GMM (Bowers, Sprott et Taff, 2013[35]).

Dans le cadre d'une étude qui a porté sur une série chronologique de données relatives à tous les élèves de l'État du Wisconsin aux États-Unis et dont l'objectif était de prédire le décrochage scolaire à partir d'un large éventail de variables individuelles, Knowles (2015[71]) a utilisé plusieurs techniques d'exploration de données et d'apprentissage automatique. Cependant, aucune méthode ne s'est avérée plus précise que les variables prédictives du modèle GMM. En effet, l'analyse n'a pas pris en compte la nature longitudinale des données ni adopté une perspective de typologie, qui constitue l'innovation centrale et la valeur ajoutée des modèles de croissance à mélange de distributions. Dans le même ordre d'idées, en utilisant l'étude *High School Longitudinal Study* de 2009 (HSLS:2009) qui est généralisable à l'échelle nationale et porte sur plus de 21 000 élèves du secondaire, Sansone (2019[66]) s'est concentré pendant un an sur les données des élèves de 9e année et a appliqué un ensemble similaire de modèles d'apprentissage automatique et de régression logistique ; ces données concernaient les résultats scolaires, le comportement et les attitudes des élèves. L'étude a obtenu des résultats aussi précis que ceux de Knowles (2015[71]), aucun des modèles n'étant à nouveau aussi précis que les variables prédictives du modèle GMM (Sansone, 2019[66]). Il est intéressant de noter qu'une étude récente, qui a porté sur plus d'un million d'élèves aux États-Unis entre 1998 et 2013 dans les États du Massachusetts, de Caroline du Nord et de Washington, a cherché à déterminer si la simple utilisation des résultats à certains tests (les tests normalisés de mathématiques, de lecture et de rédaction en anglais de la troisième ou de la huitième année) était fiable pour prédire le décrochage scolaire (Goldhaber, Wolff et Daly, 2020[72]). On a constaté que la précision de la variable prédictive est à peu près la même que celle de l'indicateur de « bonne voie » de Chicago, qui ne tient pas compte de 25 % ou plus des élèves qui finissent par décrocher. Une autre étude réalisée au Guatemala et au Honduras, qui portait sur des centaines de milliers d'élèves et certaines de leurs caractéristiques (résultats scolaires, données démographiques des élèves, des établissements et de la communauté locale) (Adelman et al., 2018[73]), a obtenu une précision des variables prédictives dans des fourchettes similaires à celles de Knowles (2015[71]) et Sansone (2019[66]) en ayant recours à des modèles de régression logistique. Ces résultats mettent à nouveau en évidence la puissance du modèle de croissance à mélange de distributions, mais aussi le fait que la méthode d'analyse des données et le choix des indicateurs ont plus d'importance en matière de précision des variables prédictives du décrochage que la taille ou l'exhaustivité de l'ensemble de données.

Application des technologies numériques émergentes : analyse des modèles et science des données

Tous les éléments issus de la littérature sur les systèmes et indicateurs d'alerte précoce témoignent de l'utilité croissante des technologies émergentes pour identifier des variables prédictives précises du décrochage scolaire dans le deuxième cycle de l'enseignement secondaire, qui se concentrent sur des groupes de modèles de données individuelles au fil du temps. Certes, la recherche dans ce domaine est encore relativement récente et il reste encore beaucoup de travail à faire, mais l'analyse des modèles, l'analyse des données, la science des données, l'analyse de l'apprentissage, l'exploration des données éducatives et l'apprentissage automatique (Koedinger et al., 2015[74] ; Piety, 2019[75]) sont en pleine expansion et offrent déjà des opportunités intéressantes aux chercheurs, aux praticiens de l'éducation et aux décideurs politiques. Ils peuvent tirer parti de ces nouvelles technologies pour développer la capacité de leurs systèmes éducatifs à utiliser les données déjà disponibles dans les établissements scolaires de manière à éclairer la prise de décision et à améliorer les pratiques pédagogiques (Agasisti et Bowers, 2017[17] ; Baker et Inventado, 2014[76] ; Bienkowski, Feng et Means, 2012[77] ; Bowers, 2017[78]). Comme indiqué dans cette littérature, ces techniques « rendent visibles des données qui étaient jusqu'à présent invisibles, passaient inaperçues et n'étaient donc pas exploitables » (Bienkowski, Feng et Means, 2012[77], p. ix). Dans un effort pour nourrir la recherche et la pratique des systèmes et des indicateurs d'alerte précoce, nous plaidons ici pour qu'on accorde une plus grande attention aux opportunités que ces techniques peuvent offrir, non seulement pour augmenter la précision des indicateurs dans les systèmes d'alerte précoce, mais aussi pour accroître l'utilité des informations exploitables fournies aux professionnels de l'éducation afin de les aider à prendre des mesures en toute connaissance de cause.

Le décrochage scolaire par rapport au renvoi

Par exemple, un domaine de la recherche sur le décrochage scolaire qui pourrait être renforcé grâce aux technologies d'analyse des données est la question du décrochage à la suite d'un renvoi de l'établissement. Cette question a reçu peu d'attention dans la recherche sur les indicateurs et systèmes d'alerte précoce, mais il s'agit d'un problème bien connu dans la littérature plus générale sur le décrochage. En raison de la typologie des parcours de vie mentionnée ci-dessus, le décrochage scolaire a historiquement été théorisé comme un processus continu qui s'accompagne de multiples facteurs de stress ; ceux-ci pouvant affecter les élèves de différentes manières (Alexander, Entwisle et Kabbani, 2001[67] ; Dupéré et al., 2018[68] ; Dupéré et al., 2015[69]). La capacité des chercheurs à s'appuyer sur ce type de théorie pour faire le lien avec les réalités du processus de décrochage, grâce aux techniques d'analyse mentionnées ci-dessus, peut renforcer la précision des variables prédictives qui intègrent ces informations, telles que celles du modèle GMM. Cependant, des études de taille plus modeste ont démontré que certains élèves qui ne parviennent pas à obtenir leur diplôme d'études secondaires peuvent quitter l'école de leur propre chef tandis que d'autres peuvent être renvoyés contre leur gré (Riehl, 1999[79] ; Rumberger et Palardy, 2005[80]). Il est clair que, certains établissements, particulièrement sous pression, peuvent renvoyer les élèves peu performants en les encourageant à quitter le système, par divers moyens, dans le but d'augmenter la performance moyenne de l'établissement aux tests (Rumberger et Palardy, 2005[80]). Une pratique consiste à faire changer d'établissement les élèves peu performants afin d'éviter leur participation aux tests obligatoires sur lesquels est fondée la responsabilité des établissements. Après plusieurs changements d'établissement, les élèves finissent par quitter le système scolaire (Riehl, 1999[79]). Ce comportement des administrateurs scolaires est hautement problématique, contraire à l'éthique, et ne favorise aucunement la réussite des élèves. Ce genre d'agissements doit donc être détecté le plus tôt possible et faire l'objet d'un suivi approprié en termes de gestion et de développement professionnel afin de recentrer les établissements sur le soutien et l'encadrement à apporter aux élèves. Des types d'analyse de données similaires à ceux décrits ci-dessus pourraient être appliqués aux données des grands systèmes scolaires pour identifier si ces pratiques de renvoi ont effectivement cours. Les techniques d'analyse de modèles telles que l'analyse par classification longitudinale sont conçues pour détecter et déterminer exactement si les élèves quittent le système via un décrochage volontaire ou via un processus substantiellement différent. Cette méthode est d'autant plus efficace lorsqu'on dispose d'ensembles détaillés de données longitudinales relatives à des systèmes entiers. Plus précisément, les analyses par classification telles que l'analyse de structure latente et le modèle de croissance à mélange de distributions peuvent être très utiles pour repérer ces types de comportements. Ainsi, non seulement ces technologies numériques sont utiles pour alimenter les indicateurs et systèmes d'alerte précoce dans une perspective de recherche et de pratique, mais elles peuvent être utilisées au sein des systèmes et entre eux pour détecter de nombreux types de modèles différents.

Alors que la recherche dans ce domaine continue, il existe une gamme de techniques d'analyse de modèles qui sont en cours de développement pour mieux orienter les indicateurs et les systèmes d'alerte précoce. C'est sur ce point que se concentre le reste de cette section.

Variables prédictives par apprentissage automatique : arbres de décision et forêts aléatoires.

Des travaux récents ont commencé à élargir le nombre de techniques disponibles pour la recherche et la pratique des systèmes et indicateurs d'alerte précoce. Les chercheurs explorent désormais les possibilités d'utilisation d'analyses issues des domaines de l'exploration de données, de la science des données et de la modélisation longitudinale (Agasisti et Bowers, 2017[17] ; Piety, 2019[75]), notamment via les arbres de décision, les visualisations d'analyse par classification longitudinale et les modèles de survie et de risque temporels.

Tout d'abord, les arbres de décision de classification et de régression (CART) sont une famille de modèles bien connus à la fois des chercheurs et décideurs pour leur utilité. Ces arbres de décision fournissent des points de séparation, des priorités et des pondérations identifiés empiriquement sur les variables en rapport avec un résultat. En tant que forme d'exploration de données, le résultat d'un arbre de décision est une figure qui sépare et hiérarchise les variables les plus importantes identifiées par l'algorithme pour prédire le résultat. Le système donne un point de séparation sur cette variable si elle est continue, puis établit des embranchements dans l'arbre, montrant l'ensemble suivant de variables de plus haute priorité, et ainsi de suite (Breiman et al., 1993[81] ; Quinlan, 1993[82] ; Quinlan, 1990[83]). Les arbres de décision et de régression ont été utilisés dans la recherche et la politique de l'éducation pour identifier les variables prédictives de la réussite et des résultats aux tests (Koon et Petscher,

2015[84] ; Koon, Petscher et Foorman, 2014[85] ; Martínez Abad et Chaparro Caso López, 2017[86]), mais moins souvent pour prédire l'obtention d'un diplôme et l'abandon scolaire. Par exemple, Baker et al. (2020) ont utilisé des arbres de régression pour analyser les données de près de 5 000 élèves du Texas en fonction de 23 groupes de caractéristiques variables. Ces travaux ont confirmé des constats précédents sur les variables prédictives concernant l'abandon scolaire et ont identifié des variables prédictives supplémentaires intéressantes, telles que le non-respect du code vestimentaire et le nombre de fois où un élève absent a été marqué comme étant présent (Baker et al., 2020[18]). Dans une autre étude sur la prédiction du décrochage scolaire, Soland (2013[87] ; 2017[88]) a utilisé de grands ensembles de données généralisables aux États-Unis et plus de 40 variables pour déterminer que les aspirations universitaires et professionnelles étaient des variables importantes à inclure dans la prédiction de l'alerte précoce du décrochage, en plus de la moyenne générale, des résultats aux tests standardisés et des attentes des enseignants (Soland, 2013[87] ; 2017[88]).

Les chercheurs utilisant des arbres de décision à apprentissage automatique sont parvenus à prédire le décrochage scolaire avec une grande précision dans différents pays, dont le Danemark (Márquez-Vera, Morales et Soto, 2013[89]), le Mexique (Nicolae-Bogdan et al., 2015[90]) et la Corée (Chung et Lee, 2019[91]). Au Mexique, l'étude a examiné les données de 670 élèves de l'établissement scolaire de Zacatecas et a inclus plus de 70 variables prédictives. L'étude a révélé que les arbres de régression étaient les plus précis pour prédire un éventuel décrochage scolaire (Márquez-Vera et al., 2013[92] ; Márquez-Vera, Morales et Soto, 2013[89]).

En second lieu, les « forêts » aléatoires sont une autre technique puissante d'analyse de données basée sur les arbres de décision. Comme leur nom le laisse entendre, les forêts aléatoires comportent de nombreux « arbres » de régression, ce qui permet de procéder à un grand nombre d'analyses CART, tout en utilisant une gamme de paramètres de départ aléatoires, puis en testant la « forêt » de modèles d'arbres pour trouver la meilleure solution (Breiman, 2001[93]). Au Danemark, à partir d'un vaste échantillon de plus de 72 000 élèves, on a examiné de multiples procédures d'apprentissage automatique pour déterminer leur précision dans la prédiction de l'abandon scolaire. L'analyse a porté sur des données relatives aux élèves, notamment leurs notes, les absences, les devoirs non remis, ainsi que la taille et l'effectif de l'établissement scolaire ainsi que les données démographiques de la communauté (Nicolae-Bogdan et al., 2015[90]). Les techniques de forêt aléatoire ont donné des résultats plus précis que ceux obtenus via la méthode CART. De la même manière, en utilisant la forêt aléatoire et en analysant les données de plus de 165 000 élèves du secondaire en Corée, Chung et Lee (2019) se sont appuyés sur une série de variables prédictives telles que les absences, les retards à l'école ou en classe, et le temps consacré aux activités personnelles ou extrascolaires (p. ex., les clubs et le bénévolat), et ont constaté une grande précision dans la prédiction du décrochage (Chung et Lee, 2019[91]). En utilisant le même ensemble de données, Chung et Lee (2019[91]) ont observé un grand déséquilibre dans les données coréennes relatives au décrochage. En effet, le pourcentage d'élèves qui abandonnent l'école est assez faible, ce qui peut créer des problèmes pour de nombreux algorithmes d'apprentissage automatique standard basés sur des arbres de régression. Les auteurs ont donc inclus un facteur de correction pour ce déséquilibre, ce qui a permis d'améliorer la précision des algorithmes basés sur les arbres de régression et les forêts aléatoires (Lee et Chung, 2019[94]).

Les algorithmes d'apprentissage automatique de type forêt aléatoire ont également été utilisés récemment avec des données aux États-Unis. Dans une étude analysant les données d'un district scolaire régional sur la côte atlantique comptant environ 11 000 élèves (Aguiar et al., 2015[95]), les auteurs ont utilisé une série de variables prédictives telles que les résultats scolaires, l'assiduité et la mobilité. Plutôt que de prédire la possibilité de décrochage effectif, les auteurs ont prédit que les élèves se situaient dans le percentile 10 supérieur de leur catégorie à risque, ce qui rend difficile la comparaison des résultats à ceux d'autres études. Plus récemment, une étude utilisant un algorithme d'apprentissage automatique de type forêt aléatoire et des données provenant de millions d'élèves à travers les États-Unis (Christie et al., 2019[96]) a analysé un modèle qui comprenait plus de 70 variables prédictives relatives aux élèves, y compris les résultats scolaires, l'assiduité, le comportement, la discipline et les crédits de cours accumulés, parmi beaucoup d'autres. Malheureusement, bien que les auteurs démontrent la grande précision de leur modèle pour prédire le décrochage, ils n'énumèrent pas les 70 variables prédictives, l'algorithme ou la façon dont les variables prédictives sont pondérées ou utilisées dans le modèle, ce qui rend difficile l'évaluation ou l'utilisation de ces résultats dans des recherches ultérieures.

Il est intéressant de noter que dans chacune de ces études utilisant l'apprentissage automatique par forêt aléatoire, la précision globale des prédictions était comparable à celle des variables prédictives du modèle de mélange à croissance de distributions évoqué ci-dessus, avec une précision supérieure à 80-90 %. Néanmoins,

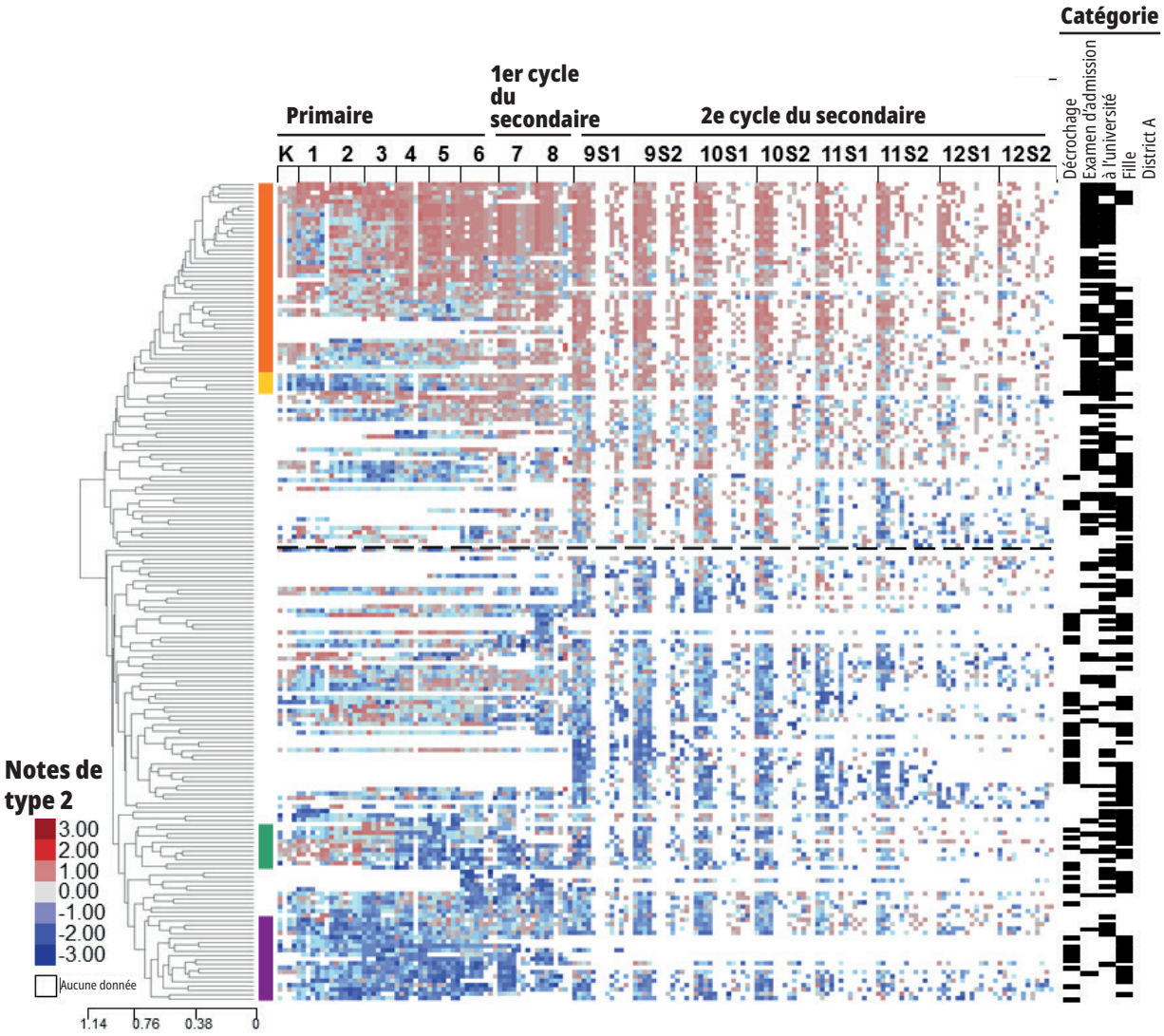
une critique concernant ces modèles utilisant l'apprentissage automatique (tels que la forêt aléatoire) (Villagrá-Arnedo et al., 2017[97]) revient de manière constante : il est difficile de les interpréter et d'agir en conséquence, car le fonctionnement exact du code et de l'algorithme n'est pas apparent ou simple à rapporter, et avec un si grand nombre de variables prédictives, savoir comment les exploiter et agir ensuite n'est pas simple (Knowles, 2015[71]). Même si un modèle peut prédire avec précision le décrochage scolaire, si l'algorithme est trop complexe ou dissimulé, il est plus difficile de comprendre et de mettre en œuvre des modèles dans différents contextes, et peut-être plus important encore, de concevoir et de tester des interventions efficaces.

Carte de densité des classifications hiérarchiques

Comme déjà évoqué, l'utilisation des indicateurs et des systèmes d'alerte précoce pour prédire le décrochage scolaire peut être problématique dans la mesure où parfois on ne sait pas ce qu'il se passe « à l'intérieur » de l'algorithme. Quel est le code utilisé ? Quels sont les modèles identifiés par la méthode employée ? (Agasisti et Bowers, 2017[17] ; Bowers et al., 2019[19]). Les experts doivent avoir la possibilité de décortiquer l'algorithme et son code afin de comprendre son fonctionnement. Ils peuvent alors comprendre qu'ils travaillent avec des élèves qu'ils ne peuvent simplement résumer à des moyennes de résultats scolaires, des scores de prédiction ou encore des catégories à risque (Hawn Nelson et al., 2020[98]). Au contraire, ils perçoivent l'élève à travers tout son parcours scolaire grâce au système qui leur permet d'accéder aux données individuelles (Bowers, 2010[34]). Grâce à la technologie d'analyse visuelle des données, les cartes de densité des classifications hiérarchiques permettent de mieux appréhender la situation dans sa granularité. Adaptées de la taxonomie des mégadonnées et de la bio-informatique (Bowers, 2010[34] ; Eisen et al., 1998[99] ; Wilkinson et Friendly, 2009[100]), mais rarement utilisées dans le domaine de l'éducation (Kinnebrew, Segedy et Biswas, 2014[101] ; Lee et al., 2016[102] ; Moyer-Packenham et al., 2015[103]), les cartes de densité d'analyse par classification permettent de visualiser des clusters de données individuelles et mettent en lien ces informations avec les résultats globaux des élèves, ce qui permet d'examiner non seulement les types de clusters, mais aussi la variance entre les clusters, les élèves et les variables. Par exemple, le Graphique 9.1. de Bowers (2010[34]) applique des cartes de densité à l'ensemble de l'historique longitudinal des notes de 188 élèves de deux petits établissements scolaires aux États-Unis. La méthode structure les données de tous les élèves et permet visualiser chaque note de cours individuelle dans toutes les matières, de la maternelle à la terminale, et les met en lien avec des résultats globaux tels que l'obtention d'un diplôme ou le décrochage, ainsi que la participation à un examen d'admission à l'université (American College Test). À des fins de visualisation, les données de chaque élève sont reportées sur une « carte de densité » où les notes les plus élevées dans chaque matière sont représentées en rouge foncé et les notes les plus basses en bleu foncé. Les données chiffrées sont remplacées par des couleurs.

Les classifications hiérarchiques, qui s'appuient sur une longue histoire des techniques d'analyse par classification issues de l'exploration de données (Bowers, 2007[52] ; Romesburg, 1984[104] ; Wilkinson et Friendly, 2009[100]), constituent un moyen efficace pour structurer et analyser les données sur l'éducation. D'habitude, les données sur l'éducation sont représentées dans des fichiers de données avec des lignes d'élèves organisées selon leur nom ou leur numéro d'identification, auxquelles s'ajoutent des colonnes contenant différentes variables. Lorsque l'analyse par classification est appliquée à ce type de données, au lieu d'un tri en fonction du nom ou du numéro d'identification des élèves, on utilise la similarité des variables dans les colonnes pour réorganiser la liste, avec des indications sur la proximité ou la distance de chaque élève par rapport à son cluster et à tous les autres (Bowers, 2010[34]). La carte de densité fournit alors un moyen visuel d'afficher toutes les données, et comme les rangées similaires sont les unes à côté des autres, des blocs de couleurs se forment à travers l'ensemble de données, permettant aux chercheurs et aux décideurs de visualiser l'ensemble des données et tous les élèves en même temps, en lien avec les résultats globaux (pour une synthèse, veuillez consulter Bowers, 2010a). En comparaison, les méthodes plus traditionnelles de visualisation des données dans le domaine de l'éducation, telles que les graphiques à barres ou les tracés linéaires des données des élèves, s'organisent autour d'une sélection de variables. Ces modes de présentation peuvent devenir difficilement interprétables en raison du grand nombre de lignes ou de barres, ne fût-ce que pour une centaine d'élèves seulement. Plutôt que de résumer les données des élèves à des moyennes générales par rapport à une petite sélection de variables, l'analyse par carte de densité présente chaque élève de l'ensemble de données ainsi que chaque point de données, de manière à permettre d'examiner chaque groupe par rapport aux résultats.

Graphique 9.1 La classification hiérarchique des notes dans toutes les matières, de la maternelle à la terminale, permet de déterminer le décrochage scolaire



Remarque : chaque élève est représenté par une ligne, les colonnes représentent toutes les matières de chaque année de la maternelle à la terminale, classées de gauche à droite, des matières principales (mathématiques, lecture/anglais, sciences, etc.) aux matières secondaires (langues, éducation physique, etc.). Chaque note de type Z (par colonne) dans chaque matière pour chaque élève est représentée par une carte de densité allant du bleu foncé (inférieur à la note moyenne pour cette matière à ce niveau scolaire) au gris (moyen), au rouge foncé (supérieur à la moyenne). Le blanc représente l'absence de données. À gauche se trouvent les clusters : les lignes horizontales plus petites représentent une plus grande similarité entre les rangées. À droite, les annotations représentent des résultats dichotomiques ou des variables démographiques. Il est à noter que l'ensemble des données se divise en deux grands groupes (au-dessus et au-dessous de la ligne horizontale en pointillé) : les élèves les plus performants (en rouge) n'abandonnent pas et présentent l'examen d'admission à l'université, tandis que les élèves les moins performants (en bleu) abandonnent beaucoup plus souvent et ne présentent pas l'examen d'admission à l'université. Les blocs de couleur à gauche représentent des groupes spécifiques où des modèles émergent déjà dans l'enseignement primaire et sont prédictifs de l'achèvement des études secondaires. Pour en savoir plus, voir Bowers (2010[34]).
Source: Bowers (2010[34]).

Dans le cadre de l'étude de Bowers (2010[34]), les notes de chaque élève tout au long de son parcours dans le système éducatif, de la maternelle à la terminale, ont été analysées et mises en rapport avec l'ensemble de ses résultats. Il est important de noter que des groupes spécifiques de modèles de résultats longitudinaux ont pu être identifiés, modèles qui étaient auparavant inconnus du système scolaire. Comme un groupe d'élèves qui a obtenu des notes élevées jusqu'en troisième et quatrième année, puis qui a vu les notes chuter. Ceux-ci correspondant aux élèves faiblement notés qui abandonnent plus souvent l'école (voir le Graphique 9.1. , marqué en vert en bas dans le graphique). À l'inverse, l'un des plus petits clusters était un groupe d'élèves qui avaient des notes faibles pendant les premières années de scolarité, mais qui ont ensuite rapidement progressé vers la fin de l'enseignement primaire et ont tous obtenu leur diplôme (voir le Graphique 9.1. , marqué en jaune en haut dans le graphique). Dans

les deux cas, les élèves de chaque groupe peuvent être identifiés dans le graphique, ainsi que toutes les données qui les concernent. Les responsables scolaires ont ainsi une occasion unique de voir l'ensemble des données importantes en vue de l'obtention d'un diplôme du deuxième cycle de l'enseignement secondaire, réparties dans le temps et entre les élèves eux-mêmes. Les cartes de densité permettent aux responsables de se concentrer sur des élèves spécifiques afin de mieux comprendre leur propre expérience vécue dans le système scolaire. Cette technologie permet donc de mettre au point des mesures concrètes qui peuvent être personnalisées en fonction de la façon dont l'élève a progressé dans le système.

Questions relatives à l'apprentissage automatique et à l'exploration de données : caractère généralisable, accès libre et précision

Le bémol de ces techniques d'exploration et de visualisation de données est qu'elles sont utilisées à petite échelle (établissements ou districts scolaires), mais sont censées fonctionner ensuite à l'échelle des systèmes éducatifs. Ces modèles d'exploration de données ont la réputation de ne pas être en mesure d'établir des constats généralisables à grande échelle. En effet, une recherche récente sur les indicateurs et systèmes d'alerte précoce dans trois établissements scolaires de l'État de l'Ohio aux États-Unis a montré des résultats différents dans chaque district (Stuit et al., 2016[23]). Les auteurs ont donc demandé aux chercheurs de comparer les résultats de leurs propres travaux (en utilisant les mêmes variables) avec des résultats de recherches extérieures. Comme les auteurs de chapitre le recommandent :

> *Malgré la variation dans les prédictions de décrochage scolaire ou du taux d'obtention du diplôme d'enseignement secondaire, les résultats donnent à croire qu'il est important que les districts scolaires passent en revue les résultats individuels et puissent eux-mêmes mettre au point leur propre système d'alerte précoce (p. ii).*

De même, à plus grande échelle, dans une étude récente visant à prédire le décrochage et qui portait sur les résultats scolaires, l'assiduité aux cours et le comportement de plus d'un million d'élèves aux États-Unis, lorsque l'algorithme de prédiction par exploration de données a été appliqué à 30 districts cibles en plus de ceux de la série de données, « aucun des… modèles n'a donné d'aussi bons résultats que leur moyenne lorsqu'ils ont été appliqués aux districts cibles » (p. 735) (Coleman, Baker et Stephenson, 2019[105]). Ainsi, la généralisation au-delà de l'ensemble de données d'entraînement constitue actuellement une limite majeure des techniques d'exploration de données dans la prédiction du décrochage scolaire, et pourtant ce travail est d'une importance critique pour les systèmes scolaires concernés dans les données d'entraînement. Pour les dirigeants des établissements et systèmes scolaires, les techniques utilisées dans le domaine de la science des données de l'éducation, telles que l'exploration de données, l'analyse de modèles, leur visualisation et la précision des prédictions, sont des innovations récentes importantes qui peuvent aider à prendre des décisions dans l'ensemble du système éducatif en utilisant des données exploitables (Agasisti et Bowers, 2017[17] ; Bowers, 2010[55] ; Krumm, Means et Bienkowski, 2018[106] ; Bowers, 2017[78] ; Piety, 2019[75]). Comme indiqué dans la littérature récente sur les recoupements entre la science des données, les cycles d'amélioration fondés sur des données probantes et le leadership scolaire, appelé Education Leadership Data Analytics (analyse des données du leadership scolaire), (Bowers et al., 2019[19]), les travaux en cours comprennent :

> *ELDA practitioners working collaboratively with schooling system leaders and teachers to analyze, pattern, and visualize previously unknown patterns and information from the vast sets of data collected by schooling organisations, and then integrate findings in easy to understand language and digital tools into collaborative and community building evidence-based improvement cycles with stakeholders. (p. 8).*

Ce travail d'analyse des modèles au sein de chaque district et système scolaire est donc important et permet d'étayer la prise de décision (Bowers, 2017[78] ; Mandinach et Schildkamp, 2020[107]).

Néanmoins, ce type de transposition et de comparaison des modèles à l'échelle locale ne peut avoir lieu que si les méthodes et les algorithmes utilisés sont publics et en accès libre. À la suite de demandes similaires dans les domaines de la recherche, de la santé, de l'industrie et de l'action publique, dans lesquels de grands ensembles de données sont analysés de manière similaire pour formuler des recommandations (Stodden et al., 2016[108] ; Wachter et Mittelstadt, 2019[109]), des appels ont récemment été lancés en faveur de la transparence et de la publication en libre accès de tous les algorithmes utilisés dans le monde de l'éducation. Les données sur l'éducation doivent être privées et confidentielles. Mais si un algorithme fait une recommandation, une prédiction

ou prend une décision concernant des élèves, des enseignants ou des établissements scolaires, il est éthiquement recommandé que le code et l'algorithme soient rendus publics et en accès libre, sans caractéristiques propriétaires cachées (Agasisti et Bowers, 2017[17] ; Bowers et al., 2019[19]). La publication de ces données et le libre accès aux algorithmes utilisés dans les décisions éducatives évitent des problèmes déjà rencontrés dans d'autres domaines de la science des données sociologiques et de l'exploration de données, tels que les prêts bancaires et les décisions d'emprisonnement. Les algorithmes dissimulés et les conséquences non voulues entraînent des biais et des inégalités dans les algorithmes et leurs résultats qui passent inaperçus (Benjamin, 2019[110] ; Hawn Nelson et al., 2020[98] ; O'Neil, 2016[111]), alors que les algorithmes ouverts présentant les informations pertinentes peuvent être testés pour vérifier leur caractère équitable et l'absence de biais (Corbett-Davies et Goel, 2018[112] ; d'Alessandro, O'Neil et LaGatta, 2017[113] ; Dudik et al., s.d.[114] ; Loukina, Madnani et Zechner, 2019[115] ; Zehlike et al., 2017[116]).

Récemment, afin d'aider les spécialistes des systèmes scolaires à évaluer la précision des indicateurs et systèmes d'alerte précoce, Bowers et Zou (2019[6]) ont mis au point un guide pour l'analyse de la fonction d'efficacité du récepteur. Comme indiqué ci-dessus, cette analyse permet de comparer la précision de plusieurs variables prédictives par rapport à un résultat escompté, la technique de l'aire sous la courbe ROC permettant de mesurer la précision en tant que telle et de comparer la différence de précision entre deux variables prédictive (Bowers et Zhou, 2019[6]). Cependant, comme les praticiens des données dans les systèmes scolaires se retrouvent dans leur poste après avoir suivi des parcours professionnels différents (Bowers, 2017[78] ; Bowers et al., 2019[19]), ils n'ont pas reçu, en règle générale, une formation adaptée et ne savent pas nécessairement comment comparer la précision de différentes variables prédictives. En outre, dans de nombreux cas, les praticiens des données sur l'éducation qui travaillent sur des indicateurs et des systèmes d'alerte précoce n'ont pas le temps ou la formation nécessaires pour générer le code servant à évaluer et comparer la précision des indicateurs d'alerte précoce. Cette question est d'autant plus complexe que peu d'études de recherche en éducation publient actuellement leur algorithme et leur code complets pour permettre la réplication et l'utilisation par les praticiens (Bowers et al., 2019[19] ; Knowles, 2015[71]). Pour remédier à ce problème, Bowers et Zhou (2019[6]) ont utilisé de grands ensembles de données généralisables à l'échelle des États-Unis, ouverts et publics, pour fournir un guide et une marche à suivre aux praticiens des données sur l'éducation souhaitant appliquer l'analyse de l'aire sous la courbe d'efficacité du récepteur pour évaluer la précision de chaque indicateur et comparer statistiquement les niveaux de précision significativement différents dans la prédiction des résultats scolaires. Il est important de noter que l'étude fournit non seulement un guide démontrant l'analyse de la précision de l'indicateur de l'aire sous la courbe d'efficacité du récepteur pour un large éventail de résultats en matière d'éducation, allant du décrochage scolaire et de l'obtention du diplôme de l'enseignement secondaire à la scolarisation et à la réussite dans l'enseignement postsecondaire, entre autres (Bowers et Zhou, 2019[6]), mais aussi des données supplémentaires qui comprennent tout le code source ouvert en langage de programmation R, et ce pour chaque tableau, équation et figure de l'étude. Ce type d'étude permet de partager les ressources algorithmiques dans divers contextes, de tester les comparaisons au niveau des codes des résultats ainsi que l'application aux communautés éducatives locales afin de prendre des décisions (Bowers et al., 2019[19]).

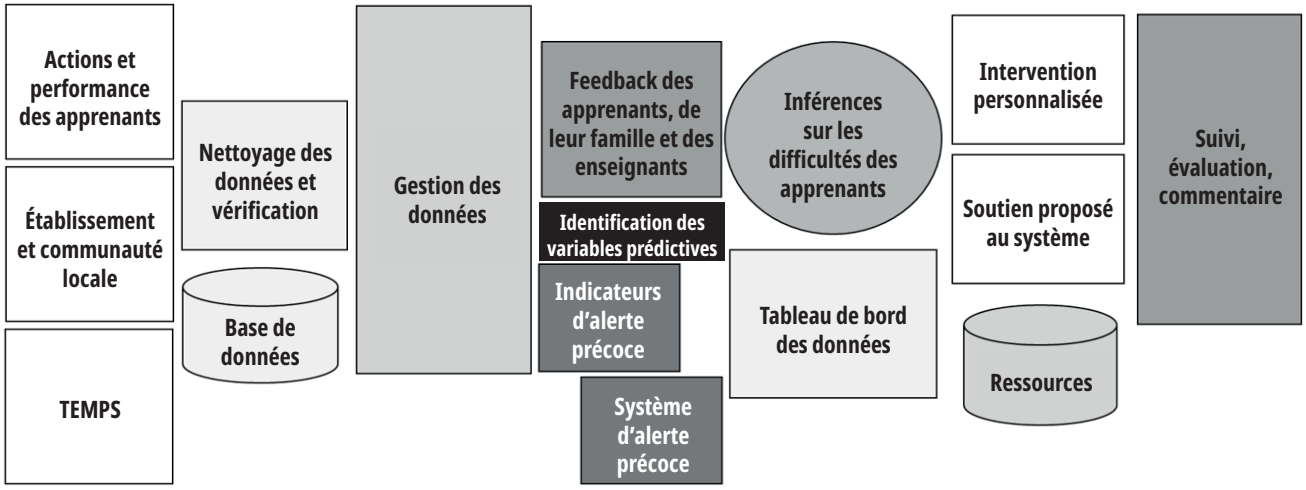
Conclusions et orientations futures

Dans le cadre de la recherche et de la pratique sur les indicateurs et systèmes d'alerte précoce en vue de réduire le décrochage scolaire, les technologies émergentes de l'analyse des modèles, de l'exploration des données, de l'analyse de l'apprentissage et de l'apprentissage automatique permettent d'élargir les connaissances sur la manière de prédire avec précision les résultats des élèves, et de proposer ensuite des interventions qui contribuent à leur réussite. Cependant, l'identification des variables prédictives et l'analyse de leur précision ne constituent qu'une composante d'un système beaucoup plus vaste.

Même si l'identification des variables prédictives des résultats des élèves et l'analyse de leur précision dans les indicateurs et les systèmes d'alerte précoce ont fait l'objet de nombreuses recherches et d'un grand intérêt récemment, l'identification des variables prédictives ne représente qu'une petite composante d'un système beaucoup plus vaste. En s'inspirant d'un graphique provenant d'un document rédigé par des ingénieurs de Google Inc. dans lequel ils notent que l'apprentissage automatique n'est qu'un tout petit élément dans lequel « l'infrastructure environnante requise est vaste et complexe » (p. 4) (Sculley et al., 2015[117]), le Graphique 9.2. situe les questions d'« identification des variables prédictives » dans le contexte plus large des systèmes de prévention du décrochage scolaire. De multiples éléments différents travaillent ensemble tout au long du processus, qui commence à gauche du Graphique 9.2. par la collecte, le nettoyage et le traitement d'un large éventail de données

sur les élèves et les établissements scolaires, en collaboration avec les membres de la communauté ; il fournit ensuite ces informations aux parties prenantes par le biais du système d'alerte précoce et du tableau de bord ; et il combine finalement ces informations avec les contributions des élèves, des enseignants et des membres de la famille. Cette approche permet alors de faire des inférences sur les difficultés des élèves et leur réussite dans le système, qui, lorsqu'elles sont combinées aux ressources appropriées, peuvent servir à adapter les mesures aux besoins des élèves ou modifier les soutiens actuels que le système éducatif offre à tous. En fin de compte, comme indiqué à droite du Graphique 9.2. , des informations peuvent être recueillies pour alimenter le système et ainsi contribuer à l'amélioration continue.

Graphique 9.2 Seule une petite partie des systèmes d'alerte précoce d'un établissement scolaire est liée à l'identification de variables prédictives



Source: Alex J. Bowers.

Nous nous sommes, certes, concentrés tout au long de ce chapitre sur les spécificités des indicateurs d'alerte précoce et leur précision, mais notre réflexion s'inscrit dans une perspective plus large : celle du rôle des structures éducatives dans le soutien à la réussite des élèves. Ce point précis est illustré par le travail réalisé dans la ville de Chicago (Allensworth, Nagaoka et Johnson, 2018[15]). Comme indiqué plus haut, l'indicateur de « bonne voie » de Chicago est un indicateur d'alerte précoce transversal bien connu et assez précis du décrochage scolaire. Au cours des deux dernières décennies, la ville de Chicago a connu une augmentation spectaculaire des taux d'obtention de diplôme (Allensworth et al., 2016[118]), passant de 52,4 % en 1998 à plus de 90 % en 2019 (Issa, 2019[119]). Cependant, comme l'ont déclaré les chercheurs de Chicago, le fait de trouver des indicateurs de « bonne voie » plus précis et de les intégrer dans un système d'alerte précoce n'a pas entraîné d'amélioration, car il s'agit d'une mesure nécessaire, mais insuffisante pour lutter contre le décrochage scolaire. Le système d'alerte précoce est plutôt une composante d'un ensemble beaucoup plus vaste de systèmes qui, combinés à l'action des professionnels de l'éducation, fournissent des données utiles. Ceux-ci élaborent ensuite des mesures destinées aux élèves et créent des outils pour favoriser la persévérance scolaire ou modifient les outils existants. Comme l'indique Allensworth (2013[7]) :

> *Il y a dix ans, la lutte contre le décrochage scolaire semblait être un problème insoluble… C'était l'époque où l'accès aux systèmes de données concernant les élèves n'était pas encore généralisé. Maintenant que les professionnels de l'éducation peuvent suivre la progression des élèves tout au long de leur scolarité, ils disposent d'indicateurs d'alerte précoce qui permettent de prédire quand les élèves commenceront à fréquenter le lycée, et sont facilement accessibles aux enseignants du secondaire. De plus, les facteurs les plus directement associés à l'obtention éventuelle d'un diplôme sont aussi ceux qui sont les plus susceptibles d'être modifiés par les pratiques des établissements scolaires : l'assiduité des élèves et leurs efforts en classe. Non seulement les établissements scolaires peuvent identifier les élèves ayant besoin de soutien, mais ils peuvent utiliser les tendances issues des indicateurs pour s'attaquer aux problèmes structurels qui rendent plus difficile l'obtention d'un diplôme (pp. 68-69) (Allensworth, 2013[7]).*

Les systèmes d'alerte précoce doivent être précis, accessibles, exploitables et redevables (les fameux 4A en anglais évoqués au début du chapitre)

Pour s'inscrire dans une stratégie efficace de soutien à la persévérance scolaire et à la réussite scolaire, les systèmes d'alerte précoce doivent reposer sur des indicateurs qui présentent quatre caractéristiques fondamentales : précis, accessibles, exploitables et redevables.

- *Précis* en ce sens que la variable prédictive identifie effectivement le résultat à un moment antérieur, ce qui est plus facile à déterminer en utilisant des mesures de précision telles que l'aire sous la courbe de la fonction d'efficacité du récepteur, comme indiqué ci-dessus.
- *Accessible* en ce sens que la variable prédictive est facile à comprendre et disponible pour des travaux de recherche. Accessible ne veut pas dire simple, mais plutôt que l'algorithme est susceptible d'être consulté, étudié et compris. L'accessibilité est à l'opposé des algorithmes propriétaires, dissimulés ou à apprentissage automatique, qui masquent la manière dont la prédiction se déroule, mais elle signifie, au contraire, ouverte, publique et compréhensible.
- *Exploitable* en ce sens que la variable prédictive peut être utilisée pour prendre des mesures afin d'adapter les réponses ou pour modifier le système actuel et résoudre des problèmes systémiques. Les indicateurs d'alerte précoce exploitables se basent sur des variables prédictives qui sont récentes ou fonctionnent en temps réel, malléables et sous le contrôle des parties prenantes, en opposition aux variables prédictives sur lesquelles les élèves, les enseignants, les responsables scolaires ou les familles n'ont aucune prise.
- *Redevables* en ce sens que les variables prédictives sont régulièrement contrôlées pour éviter les biais, qu'elles sont examinées par les communautés d'utilisateurs, et qu'elles sont régulièrement auditées afin d'appréhender les biais algorithmiques potentiels et de promouvoir au bout du compte l'équité. Les indicateurs d'alerte précoce redevables incluent les parties concernées dans la conception et l'application des variables prédictives par rapport aux questions qui les préoccupent, en concevant et en utilisant les variables prédictives en collaboration avec les utilisateurs pour qui le système est conçu.

Parmi les différentes caractéristiques, la redevabilité est peut-être l'aspect le plus important à prendre en compte pour les systèmes et indicateurs d'alerte précoce. Lorsque celle-ci est bien appréhendée, les trois autres caractéristiques (précision, accessibilité et exploitabilité) deviennent plus faciles à comprendre. En effet, la redevabilité en matière de prédiction algorithmique est un sujet de préoccupation croissant à l'échelle mondiale. En évoquant des questions juridiques autour de la confidentialité des données et de la prédiction algorithmique dans l'Union européenne et aux États-Unis, Wachter et Mittelstadt (2019[109]) relèvent :

> *Malheureusement, il est peu vraisemblable que les organisations fourniront de leur plein gré des explications complètes couvrant le processus, le fondement et la précision de la décision générée par l'algorithme, à moins d'y être obligées. Ces systèmes sont souvent très complexes, impliquent des données personnelles (sensibles) et utilisent des méthodes et des modèles considérés comme des secrets commerciaux. Une explication pourrait informer la personne du résultat ou de la décision et des hypothèses, prédictions ou inférences sous-jacentes qui y ont conduit. En revanche, cette explication ne garantit pas que la décision, l'hypothèse, la prédiction ou l'inférence est justifiée. Autrement dit, l'explication d'une décision n'a pas la même valeur que la justification d'une inférence ou d'une décision. Par conséquent, si le fondement des décisions algorithmiques est au cœur des appels à la redevabilité et à l'explicabilité algorithmiques, des droits individuels sont nécessaires pour donner aux personnes concernées la possibilité de gérer la façon dont les inférences portant atteinte à la vie privée sont faites, et de demander réparation pour inférences abusives lorsqu'elles servent à prendre des décisions importantes. (pp. 503-505) (Wachter et Mittelstadt, 2019[109]).*

Cette question est d'autant plus sensible lorsqu'on met en parallèle de récentes prédictions algorithmiques, empreintes de biais raciaux, ethniques et communautaires, dans les domaines des soins de santé, de la finance, du maintien de l'ordre et de l'emprisonnement. Comme l'a récemment relevé Benjamin (2019[110]) dans la revue *Science* :

> *Les données utilisées pour entraîner les systèmes automatisés sont généralement historiques et, dans le contexte des soins de santé, elles engendrent des structures hospitalières ségréguées, des programmes d'études médicales racistes et des systèmes d'assurance inégaux, entre autres facteurs. Et pourtant, de nombreux secteurs et organisations, bien au-delà des soins de santé, intègrent des outils automatisés,*

de l'éducation au secteur bancaire en passant par la police et le logement, avec la perspective que les décisions algorithmiques soient moins biaisées que celles prises par les êtres humains. Mais ce sont les humains qui décident des données et conçoivent les algorithmes, ces derniers s'abritant désormais derrière des perspectives d'impartialité tout en présentant un potentiel de discrimination injuste à une échelle beaucoup plus grande que celle des individus biaisés (p. 422) (Benjamin, 2019[110]).

La responsabilité envers la communauté de bénéficiaires est donc une question centrale pour les systèmes d'alerte précoce utilisés dans le monde de l'éducation. Cette situation, caractéristique des systèmes prédictifs, plaide en faveur d'un plus grand rôle de la communauté dans la planification, la conception, la mise à l'essai et l'utilisation de ces systèmes de données (Bowers et al., 2019[19] ; Hawn Nelson et al., 2020[98] ; Mandinach et Schildkamp, 2020[107]). Ces recommandations invitent les parties prenantes à participer sur un pied d'égalité au cycle d'utilisation des données probantes en collaboration avec les chercheurs, les enseignants et les administrateurs scolaires, en communiquant sur la façon dont les systèmes d'alerte précoce et les indicateurs sont conçus, sur les inférences faites à partir des résultats et sur la façon dont celles-ci seront utilisées de manière positive et constructive, et en définissant des étapes spécifiques et pragmatiques (Hawn Nelson et al., 2020[98]).

Orientations futures pour la recherche en matière d'indicateurs d'alerte précoce et leur utilisation

Compte tenu des travaux actuels, trois domaines présentent un réel intérêt dans la progression de la recherche en matière d'indicateurs d'alerte précoce et leur utilisation :

En premier lieu, il faut se pencher sur la réplication des résultats précis et des algorithmes, et tester de nouvelles variables prédictives dans de multiples contextes, avec de nombreux ensembles de données. Chaque étude qui identifie un indicateur d'alerte précoce analyse généralement les données, constate les mesures de précision (ou non), puis met en application l'indicateur en question. En fait, tant pour les algorithmes d'apprentissage automatique que pour les indicateurs, il faut répliquer chaque indicateur dans différents contextes, confirmer la précision et tester les biais potentiels afin d'obtenir des comparaisons de base, puis innover à partir de ce qui est déjà connu. Ainsi, davantage d'études sur les indicateurs d'alerte précoce devraient répliquer les indicateurs les plus précis en vue d'obtenir des résultats à partir d'un nouvel ensemble de données. En se basant sur des exemples récents (Bowers, Sprott et Taff, 2013[35] ; Coleman, Baker et Stephenson, 2019[105] ; Knowles, 2015[71]), ces études devraient ensuite communiquer les valeurs sous la courbe de la fonction d'efficacité du récepteur et les comparer avec les résultats de toute nouvelle analyse, et enfin publier le code en accès libre (Agasisti et Bowers, 2017[17] ; Bowers et al., 2019[19]). Afin de stimuler ce type de partage et de réplication de code entre les ensembles de données, la mise en œuvre de normes spécifiques (connues sous l'acronyme anglais de FAIR : Findable, Accessible, Interoperable and Reproducible) stimulerait considérablement l'innovation en encourageant des ensembles de données dépersonnalisées et des algorithmes consultables, accessibles, interopérables et reproductibles (Austin et al., 2017[120] ; Singh et al., 2019[121]). Pour un résumé détaillé des normes spécifiques, voir Austin et al. (2017[120]).

En deuxième lieu, la grande majorité des indicateurs d'alerte précoce dans la plupart des systèmes d'alerte précoce sont des variables transversales à un moment donné dans le temps, dont beaucoup sont collectées dans le premier cycle du secondaire. Cependant, comme nous l'avons montré ci-dessus, les variables prédictives les plus précises utilisent des données longitudinales, en examinant les trajectoires des élèves au fil du temps. Ainsi, un domaine d'avenir consiste à inclure toujours plus de données longitudinales et chronologiques qui utilisent des données sur le long terme démarrant bien avant l'enseignement secondaire. Cependant, le temps en tant que variable peut créer de nombreux problèmes tant pour les statistiques traditionnelles que pour l'exploration de données, car les données d'un élève dans le temps dépendent de moments antérieurs et postérieurs, ce qui est contraire à une hypothèse centrale des statistiques basées sur la régression. De plus, les données concernant le décrochage scolaire présentent un autre problème lié au temps en ce sens que, au fur et à mesure que le temps passe, l'ensemble de données de l'échantillon évolue de manière dynamique. En effet, des élèves abandonnent l'école et « sortent » donc de l'ensemble de données. Cette dépendance temporelle des données longitudinales, tant au niveau individuel qu'au niveau de l'échantillon, peut poser des difficultés aux chercheurs et aux praticiens qui cherchent à appliquer des méthodes issues de la littérature interdisciplinaire. Alors que la recherche sur le décrochage scolaire a rarement été confrontée à ce problème jusqu'à présent, il existe quelques études qui se sont efforcées d'appliquer des modèles tirés de l'épidémiologie, dans laquelle ces problèmes de données conditionnelles longitudinales dépendantes du temps sont constamment présents (Bowers, 2010[55] ; Lamote et al.,

2013[122]). Il est intéressant de noter que ces questions peuvent être modélisées assez bien à l'aide de techniques de modélisation de la survie, en particulier les modèles de risque à temps discret (Singer et Willett, 2003[123]). Comme le montre Bowers (2010[55]), le risque de décrochage est lié au facteur temps, et l'estimation de ce risque dépend de l'échantillon d'étudiants restants. Lorsque cet élément est pris en compte, de multiples variables prédictives peuvent alors être testées pour savoir quand elles influencent le plus le risque de décrochage à des moments spécifiques. L'accent mis sur le risque de décrochage à différents moments peut potentiellement orienter les interventions, car une intervention qui pourrait être efficace au début des études secondaires pourrait n'avoir aucun effet plus tard, ou l'inverse.

Troisièmement, un problème bien connu concernant le décrochage scolaire aux États-Unis est ce que l'on appelle les « usines à décrocheurs » (Balfanz et al., 2010[124] ; Balfanz et Legters, 2006[125] ; Balfanz et West, 2009[126]). C'est le reflet d'une situation où dans un pays donné, il peut y avoir des établissements scolaires spécifiques qui concentrent une grande partie des élèves qui abandonnent l'école. Aux États-Unis, le taux d'obtention d'un diplôme s'élève à seulement 50 % dans certains établissements. Ces « usines à décrocheurs » donnent à penser que le problème du décrochage se situe, dans une certaine mesure, au niveau des établissements et du système scolaire lui-même. Pour y répondre, un cadre de modélisation multiniveau permettant de répartir correctement les élèves dans les établissements scolaires est nécessaire (Hox, 2010[127] ; Raudenbush et Bryk, 2002[128]). Il faut estimer la variance du décrochage scolaire qui est attribuable au niveau des élèves et des établissements (Lamote et al., 2013[122]), une question évoquée précédemment dans l'exemple du décrochage scolaire par rapport au renvoi de l'établissement (Rumberger et Palardy, 2005[80]). En matière de recherche sur les indicateurs et systèmes d'alerte précoce, il serait intéressant d'utiliser des cadres de modélisation hiérarchique en association avec les analyses de modèles et les analyses prédictives décrites ci-dessus pour fournir des informations exploitables. Par exemple, le modèle de croissance à mélange de distributions ou l'analyse multiniveau de structure latente peut déterminer quels établissements scolaires ont des proportions différentes d'élèves de différents groupes dans une typologie de décrochage. Pour expliquer l'importance de la nature dépendante des données chronologiques, (Lamote et al., 2013[122]) ont utilisé un modèle multiniveau de risque à temps discret et ont démontré l'importance de prendre en compte la mobilité longitudinale des élèves entre les établissements scolaires. La recherche sur les variables prédictives doit également prendre en compte le niveau des établissements. Si des types spécifiques de décrochage se retrouvent dans un bâtiment spécifique d'un établissement scolaire, la direction de l'établissement pourrait se pencher sur la situation dans ce bâtiment pour aider à améliorer les résultats des élèves qui le fréquentent.

En conclusion, les indicateurs et systèmes d'alerte précoce en matière d'éducation ont récemment connu de sérieuses avancées. Grâce à l'utilisation de techniques d'analyse de données, certains systèmes d'alerte précoce prédisent l'abandon scolaire avec une précision supérieure à 80-90 %. Toutefois, certains domaines spécifiques nécessitent des recherches plus approfondies et une application pratique. Par exemple, la plupart des techniques reposant sur l'apprentissage automatique et l'exploration de données ne sont pas facilement transférables d'un contexte éducatif à un autre. De manière plus inquiétante, de nombreux indicateurs d'alerte précoce sont encore très imprécis.

Les caractéristiques des systèmes d'alerte précoce (précision, accessibilité, exploitation et redevabilité) fournissent un cadre de référence qui peut s'avérer utile dans le développement de l'analyse prédictive et des algorithmes, avec pour but de soutenir les résultats de l'éducation. En fin de compte, la technologie des indicateurs et des systèmes d'alerte précoce n'est qu'une petite partie par rapport à l'utilisation des données dans les établissements scolaires. D'autres éléments comprennent le rôle de la communauté, la dimension éthique de l'utilisation des données et des algorithmes tout au long du processus et une attention continue sur la façon de soutenir la réussite des élèves en fournissant des interventions individuelles et en abordant les offres et les politiques au niveau du système. Le développement de techniques et d'outils qui rendent les données exploitables n'est qu'une des étapes vers des actions efficaces qui visent à l'amélioration de l'apprentissage et à la réussite des élèves. Mais il s'agit bien d'une étape prometteuse qui se matérialisera dans un avenir proche grâce à la numérisation et aux innovations en matière d'exploration et d'analyse des données.

Références

Adelman, M., F. Haimovich, A. Ham et E. Vazquez (2018), « Predicting school dropout with administrative data: new evidence from Guatemala and Honduras », *Education Economics*, Vol. 26/4, pp. 356-372, http://dx.doi.org/10.1080/09645292.2018.1433127. [73]

Agasisti, T. et A. Bowers (2017), « Data Analytics and Decision-Making in Education: Towards the Educational Data Scientist as a Key Actor in Schools and Higher Education Institutions », dans Johnes, G. et al. (dir. pub.), *Handbook on the Economics of Education*, Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK, https://doi.org/10.7916/D8PR95T2. [17]

Agodini, R. et M. Dynarksi (2004), « Are experiments the only option? A look at dropout prevention programs », *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 86/1, pp. 180-194. [64]

Aguiar, E. , H. Lakkaraju, N. Bhanpuri, D. Miller, B. Yuhas et K. Addison (2015), *Who, when, and why: a machine learning approach to prioritizing students at risk of not graduating high school on time*, ACM, Poughkeepsie, New York, http://dx.doi.org/10.1145/2723576.2723619. [95]

Alexander, K., D. Entwisle et N. Kabbani (2001), « The dropout process in life course perspective: Early risk factors at home and school », *The Teachers College Record*, Vol. 103/5, pp. 760-822. [67]

Allensworth, E. (2013), « The Use of Ninth-Grade Early Warning Indicators to Improve Chicago Schools », *Journal of Education for Students Placed at Risk (JESPAR)*, Vol. 18/1, pp. 68-83, http://dx.doi.org/10.1080/10824669.2013.745181. [7]

Allensworth, E. et J. Easton (2007), *What matters for staying on-track and graduating in Chicago public high schools: A close look at course grades, failures, and attendance in the freshman year*, The University of Chicago, http://www.consortium-chicago.org. [25]

Allensworth, E. et J. Easton (2005), *The on-track indicator as a predictor of High School graduation*, http://www.consortium-chicago.org/publications/p78.html. [24]

Allensworth, E. , J. Gwynne, M. de la Torre et P. Moore (2014), *Looking Forward to High School and College: Middle Grade Indicators of Readiness in Chicago Public Schools*, http://ccsr.uchicago.edu/sites/default/files/publications/Middle%20Grades%20Report.pdf. [38]

Allensworth, E. , J. Gwynne, K. Healey et R. Crespin (2016), *High school graduation rates through two decades of district change: The influence of policies, data records, and demographic shifts.*, http://consortium.uchicago.edu/sites/default/files/publications/High%20School%20Graduation%20Rates-Jun2016-Consortium.pdf. [118]

Allensworth, E. et S. Luppescu (2018), *Why do students get good grades, or bad ones? The influence of the teacher, class, school, and student*, https://consortium.uchicago.edu/sites/default/files/publications/Why%20Do%20Students%20Get-Apr2018-Consortium.pdf. [53]

Allensworth, E., J. Nagaoka et D. Johnson (2018), *High School Graduation and College Readiness Indicator Systems: What We Know, What We Need to Know*, https://consortium.uchicago.edu/sites/default/files/publications/High%20School%20Graduation%20and%20College-April2018-Consortium.pdf. [15]

Austin, C. , T. Bloom, S. Dallmeier-Tiessen, V. Khodiyar, F. Murphy, A. Nurnberger, L. Raymond, M. Stockhause, J. Tedds, M. Vardigan et A. Whyte (2017), « Key components of data publishing: using current best practices to develop a reference model for data publishing », *International Journal on Digital Libraries*, Vol. 18/2, pp. 77-92, http://dx.doi.org/10.1007/s00799-016-0178-2. [120]

Baker, R. , A. Berning, S. Gowda, S. Zhang et A. Hawn (2020), « Predicting K-12 Dropout », *Journal of Education for Students Placed at Risk (JESPAR)*, Vol. 25/1, pp. 28-54, http://dx.doi.org/10.1080/10824669.2019.1670065. [18]

Balfanz, R. , J. Bridgeland, L. Moore et J. Horning Fox (2010), *Building a grad nation: Progress and challenge in ending the high school dropout epidemic.*, https://www.americaspromise.org/resource/building-grad-nation-progress-challenge-ending-high-school-dropout-epidemic-november-2010 (consulté le 18 janvier 2021). [124]

Balfanz, R. et V. Byrnes (2019), « Early Warning Indicators and Intervention Systems: State of the Field », dans Fredricks, J., A. Reschly and S. Christenson (dir. pub.), *Handbook of Student Engagement Interventions, Elsevier*, http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-813413-9.00004-8. [8]

Balfanz, R., L. Herzog et D. Mac Iver (2007), « Preventing Student Disengagement and Keeping Students on the Graduation Path in Urban Middle-Grades Schools: Early Identification and Effective Interventions », *Educational Psychologist*, Vol. 42/4, pp. 223-235, http://dx.doi.org/10.1080/00461520701621079. [33]

Balfanz, R. et N. Legters (2006), « Closing 'dropout factories': The graduation-rate crisis we know, and what can be done about it », *Education Week,* Vol. 25, pp. 42-43. [125]

Balfanz, R. et T. West (2009), *Raising graduation rates: A series of data briefs: Progress toward increasing national and state graduation rates.*, https://new.every1graduates.org/raising-graduation-rates/ (consulté le 18 janvier 2021). [126]

Battin-Pearson, S. , M. Newcomb, R. Abbott, K. Hill, R. Catalano et J. Hawkin (2000), « Predictors of early high school dropout: A test of five theories », *Journal of Educational Psychology*, Vol. 92/3, pp. 568-582, http://dx.doi.org/10.1037/0022-0663.92.3.568. [54]

Belfield, C. et H. Levin (2007), « The education attainment gap: Who's affected, how much, and why it matters », dans Belfield, C. and H. Levin (dir. pub.), *The price we pay: Economic and social consequences of inadequate education,* Brookings Institution Press, Washington D.C. [2]

Benjamin, R. (2019), « Assessing risk, automating racism », *Science*, Vol. 366/6464, pp. 421-422, http://dx.doi.org/10.1126/science.aaz3873. [110]

Bienkowski, M., M. Feng et B. Means (2012), *Enhancing Teaching and Learning Through Educational Data Mining and Learning Analytics: An Issue Brief*, http://www.ed.gov/edblogs/technology/files/2012/03/edm-la-brief.pdf. [77]

Bowers, A. (2019), « Towards Measures of Different and Useful Aspects of Schooling: Why Schools Need Both Teacher Assigned Grades and Standardized Assessments », dans Brookhart, S. and J. McMillan (dir. pub.), *Classroom Assessment as Educational Measurement, National Council on Measurement in Education (NCME) Book Series,* Routledge, New York. [50]

Bowers, A. (2017), « Quantitative Research Methods Training in Education Leadership and Administration Preparation Programs as Disciplined Inquiry for Building School Improvement Capacity », *Journal of Research on Leadership Education*, Vol. 12/1, pp. 72-96, http://dx.doi.org/10.1177/1942775116659462. [78]

Bowers, A. (2011), « What's in a grade? The multidimensional nature of what teacher-assigned grades assess in high school », *Educational Research and Evaluation,* Vol. 17/3, pp. 141-159, http://dx.doi.org/10.1080/13803611.2011.597112. [49]

Bowers, A. (2010), « Analyzing the longitudinal K-12 grading histories of entire cohorts of students: Grades, data driven decision making, dropping out and hierarchical cluster analysis », *Practical Assessment Research and Evaluation*, Vol. 15/7, pp. 1-18, http://pareonline.net/pdf/v15n7.pdf. [34]

Bowers, A. (2010), « Grades and Graduation: A Longitudinal Risk Perspective to Identify Student Dropouts », *The Journal of Educational Research,* Vol. 103/3, pp. 191-207, http://dx.doi.org/10.1080/00220670903382970. [55]

Bowers, A. (2009), « Reconsidering grades as data for decision making: more than just academic knowledge », *Journal of Educational Administration,* Vol. 47/5, pp. 609-629, http://dx.doi.org/10.1108/09578230910981080. [48]

Bowers, A. (2007), *Grades and data driven decision making: Issues of variance and student patterns,* Michigan State University, East Lansing, http://files.eric.ed.gov/fulltext/ED538574.pdf. [52]

Bowers, A. , A. Bang, Y. Pan et K. Grave (2019), *Education leadership data analytics (ELDA): A white paper report on the 2018 ELDA Summit*, Teachers College, Columbia University, https://doi.org/10.7916/d8-31a0-pt97. [19]

Bowers, A. anetd R. Sprott (2012), « Examining the Multiple Trajectories Associated with Dropping Out of High School: A Growth Mixture Model Analysis », *The Journal of Educational Research*, Vol. 105/3, pp. 176-195, http://dx.doi.org/10.1080/00220671.2011.552075. [41]

Bowers, A. et R. Sprott (2012), « Why Tenth Graders Fail to Finish High School: A Dropout Typology Latent Class Analysis », *Journal of Education for Students Placed at Risk (JESPAR)*, Vol. 17/3, pp. 129-148, http://dx.doi.org/10.1080/10824669.2012.692071. [61]

Bowers, A., R. Sprott et S. Taff (2013), « Do we know who will drop out? A review of the predictors of dropping out of high school: Precision, sensitivity and specificity », *The High School Journal,* Vol. 96/2, pp. 77-100, http://muse.jhu.edu/journals/high_school_journal/v096/96.2.bowers.html. [35]

Bowers, A. et B. White (2014), « Do Principal Preparation and Teacher Qualifications Influence Different Types of School Growth Trajectories in Illinois? A Growth Mixture Model Analysis », *Journal of Educational Administration*, Vol. 52/5, pp. 705-736. [42]

Bowers, A. et X. Zhou (2019), « Receiver Operating Characteristic (ROC) Area Under the Curve (AUC): A Diagnostic Measure for Evaluating the Accuracy of Predictors of Education Outcomes », *Journal of Education for Students Placed at Risk (JESPAR),* Vol. 24/1, pp. 20-46, http://dx.doi.org/10.1080/10824669.2018.1523734. [6]

Breiman, L. (2001), « Random forests », *Machine learning,* Vol. 45/1, pp. 5-32. [93]

Breiman, L., J. Friedman, C. Stone et R. Olshen (1993), *Classification and regression trees*, Routledge, New York. [81]

Brookhart, S. (2015), « Graded Achievement, Tested Achievement, and Validity », *Educational Assessment*, Vol. 20/4, pp. 268-296, http://dx.doi.org/10.1080/10627197.2015.1093928. [51]

Brookhart, S. , T. Guskey, A. Bowers, J. McMillan, J. Smith, L. Smith, M. Stevens et M. Welsh (2016), « A Century of Grading Research », *Review of Educational Research*, Vol. 86/4, pp. 803-848, http://dx.doi.org/10.3102/0034654316672069. [58]

Carl, B. , J. Richardson, E. Cheng, H. Kim et R. Meyer (2013), « Theory and Application of Early Warning Systems for High School and Beyond », *Journal of Education for Students Placed at Risk (JESPAR)*, Vol. 18/1, pp. 29-49, http://dx.doi.org/10.1080/10824669.2013.745374. [9]

Christie, S. , D. Jarratt, L. Olson et T. Taijala (2019), *Machine-Learned School Dropout Early Warning at Scale*, Paper presented at the The 12th International Conference on Educational Data Mining, Montreal, Canada., https://www.infinitecampus.com/pdf/Machine-learned-School-Dropout-Early-Warning-at-Scale.pdf. [96]

Chung, J. et S. Lee (2019), « Dropout early warning systems for high school students using machine learning », *Children and Youth Services Review*, Vol. 96, pp. 346-353, https://doi.org/10.1016/j.childyouth.2018.11.030. [91]

Coleman, C., R. Baker et S. Stephenson (2019), « A Better Cold-Start for Early Prediction of Student At-Risk Status in New School Districts », *Paper presented at the Proceedings of The 12th International Conference on Educational Data Mining (EDM 2019).* [105]

Collins, L. et S. Lanza (2010), *Latent Class and Latent Transition Analysis: With Applications in the Social, Behavioral, and Health Sciences*, Wiley, Hoboken, NJ. [62]

Corbett-Davies, S. et S. Goel (2018), *The Measure and Mismeasure of Fairness: A Critical Review of Fair Machine Learning.*, Stanford University. [112]

d'Alessandro, B., C. O'Neil et T. LaGatta (2017), « Conscientious Classification: A Data Scientist's Guide to Discrimination-Aware Classification », *Big Data*, Vol. 5/2, pp. 120-134, http://dx.doi.org/10.1089/big.2016.0048. [113]

Davis, M., L. Herzog et N. Legters (2013), « Organizing Schools to Address Early Warning Indicators (EWIs): Common Practices and Challenges », *Journal of Education for Students Placed at Risk (JESPAR)*, Vol. 18/1, pp. 84-100, http://dx.doi.org/10.1080/10824669.2013.745210. [10]

Dudik, M. et al. (s.d.), *fairlearn: A Python package to assess and improve fairness of machine learning models.*, Redmond, WA: Microsoft., https://fairlearn.github.io/. [114]

Dupéré, V. , E. Dion, T. Leventhal, I. Archambault, R. Crosnoe et M. Janosz (2018), « High School Dropout in Proximal Context: The Triggering Role of Stressful Life Events », *Child Development*, Vol. 89/2, pp. e107-e122, http://dx.doi.org/10.1111/cdev.12792. [68]

Dupéré, V., T. Leventhal, E. Dion, R. Crosnoe, I. Archambault et M. Janosz (2015), « Stressors and Turning Points in High School and Dropout », *Review of Educational Research*, Vol. 85/4, pp. 591-629, http://dx.doi.org/10.3102/0034654314559845. [69]

Dynarksi, M., L. Clarke, B. Cobb, J. Finn, R. Rumberger et J. Smink (2008), *Dropout prevention: A practice guide*, http://ies.ed.gov/ncee/wwc/pdf/practiceguides/dp_pg_090308.pdf. [21]

Dynarski, M. et P. Gleason (2002), « How can we help? What we have learned from recent federal dropout prevention evaluations », *Journal of Education for Students Placed at Risk*, Vol. 2002/1, pp. 43-69, http://dx.doi.org/10.1207/S15327671ESPR0701_4. [22]

Eisen, M. , P. Spellman, P. Brown et D. Botstein (1998), « Cluster analysis and display of genome-wide expression patterns », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 95, pp. 14863-14868, http://rana.lbl.gov/papers/Eisen_PNAS_1998.pdf. [99]

Faria, A., N. Sorensen, J. Heppen, J. Bowdon, S. Taylor, R. Eisner et S. Foster (2017), *Getting students on track for graduation: Impacts of the Early Warning Intervention and Monitoring System after one year*, https://ies.ed.gov/ncee/edlabs/projects/project.asp?projectID=388. [27]

Finn, J. (1989), « Withdrawing from school », *Review of Educational Research*, Vol. 59/2, pp. 117-142. [56]

Frazelle, S. et A. Nagel (2015), *A practitioner's guide to implementing early warning systems*, http://ies.ed.gov/ncee/edlabs/regions/northwest/pdf/REL_2015056.pdf. [11]

Freeman, J. et B. Simonsen (2015), « Examining the Impact of Policy and Practice Interventions on High School Dropout and School Completion Rates », *Review of Educational Research*, Vol. 85/2, pp. 205-248, http://dx.doi.org/10.3102/0034654314554431. [65]

Goldhaber, D., M. Wolff et T. Daly (2020), *Assessing the Accuracy of Elementary School Test Scores as Predictors of Students' High School Outcomes: CALDER Working Paper No. 235-0520*, https://caldercenter.org/sites/default/files/CALDER%20WP%20235-0520_0.pdf. [72]

Hargis, C. (1990), *Grades and grading practices: Obstacles to improving education and helping at-risk students, Charles C. Thomas, Springfield.* [57]

Hartman, J., C. Wilkins, L. Gregory, L. Feagans Gould et S. D'Souza (2011), *Applying an on-track indicator for high school graduation: Adapting the Consortium on Chicago School Research indicator for five Texas districts*, http://ies.ed.gov/ncee/edlabs/regions/southwest/pdf/REL_2011100.pdf. [26]

Hawn Nelson, A., D. Jenkins, S. Zanti, M. Katz, E. Berkowitz, TC. Burnett et D. Culhane (2020), *A Toolkit for Centering Racial Equity Throughout Data Integration*, https://www.aisp.upenn.edu/wp-content/uploads/2020/05/AISP-Toolkit_5.27.20.pdf. [98]

Hox, J. (2010), Multilevel Analysis, Routledge, http://dx.doi.org/10.4324/9780203852279. [127]

India AI (2019), *AI is being used to identify potential school dropout rate in Andhra Pradesh*, https://indiaai.gov.in/case-study/ai-is-being-used-to-identify-potential-school-dropout-rate-in-andhra-pradesh (consulté le 29 avril 2021). [29]

Interview between Pasi Silander et Stéphan Vincent-Lancrin (2021), *Private communication between Pasi Silander, City of Helsinki, and Stéphan Vincent-Lancrin, OECD.* [32]

Issa, N. (2019, August 22), *Chicago high school dropout rate hits all-time low, CPS says.*, https://chicago.suntimes.com/2019/8/22/20828653/cps-chicago-public-schools-dropout-rate (consulté le 18 janvier 2021). [119]

Janosz, M., I. Archambault, J. Morizot et L. Pagani (2008), « School engagement trajectories and their differential predictive relations », *Journal of Social Issues*, Vol. 64/1, pp. 21-40. [39]

Kelly, S. (2008), « What Types of Students' Effort Are Rewarded with High Marks? », *Sociology of Education*, Vol. 81/1, pp. 32-52, http://dx.doi.org/10.1177/003804070808100102. [59]

Kemple, J., M. Segeritz et N. Stephenson (2013), « Building On-Track Indicators for High School Graduation and College Readiness: Evidence from New York City », *Journal of Education for Students Placed at Risk (JESPAR)*, Vol. 18/1, pp. 7-28, http://dx.doi.org/10.1080/10824669.2013.747945. [12]

Kinnebrew, J., J. Segedy et G. Biswas (2014), « Analyzing the temporal evolution of students' behaviors in open-ended learning environments », *Metacognition and Learning*, Vol. 9/2, pp. 187-215, http://dx.doi.org/10.1007/s11409-014-9112-4. [101]

Knowles, J. (2015), « Of Needles and Haystacks: Building an Accurate Statewide Dropout Early Warning System in Wisconsin », *Journal of Educational Data Mining*, Vol. 7/3, pp. 18-67, http://www.educationaldatamining.org/JEDM/index.php/JEDM/article/view/JEDM082. [71]

Koedinger, K., S. D'Mello, E. McLaughlin, Z. Pardos et C. Rosé (2015), « Data mining and education », *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, Vol. 6/4, pp. 333-353, http://dx.doi.org/10.1002/wcs.1350. [74]

Koon, S. et Y. Petscher (2015), *Comparing methodologies for developing an early warning system*, http://ies.ed.gov/ncee/edlabs/regions/southeast/pdf/REL_2015077.pdf. [84]

Koon, S., Y. Petscher et B. Foorman (2014), *Using evidence-based decision trees instead of formulas to identify at-risk readers*, http://dx.doi.org/REL 2014–036. [85]

Krumm, A., B. Means et M. Bienkowski (2018), *Learning Analytics Goes to School*, Routledge, New York, NY : Routledge, 2018., http://dx.doi.org/10.4324/9781315650722. [106]

Lamote, C., J. Van Damme, W. Van Den Noortgate, S. Sperybroeck, T. Boonen et J. Bilde (2013), « Dropout in secondary education: an application of a multilevel discrete-time hazard model accounting for school changes », *Quality and Quantity*, Vol. 47/5, pp. 2425-2446. [122]

Larusson, J. et B. White (dir. pub.) (2014), *Educational data mining and learning analytics*, Springer, New York, http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4614-3305-7_4. [76]

Lee, J., M. Recker, A. Bowers et M. Yuan (2016), *Hierarchical Cluster Analysis Heatmaps and Pattern Analysis: An Approach for Visualizing Learning Management System Interaction Data*, Paper presented at the International Conference of Educational Data Mining (EDM), Raleigh, NC, http://www.educationaldatamining.org/EDM2016/proceedings/paper_34.pdf. [102]

Lee, S. et J. Chung (2019), « The Machine Learning-Based Dropout Early Warning System for Improving the Performance of Dropout Prediction », *Applied Sciences*, Vol. 9/15, pp. 3093, https://doi.org/10.3390/app9153093. [94]

Loukina, A., N. Madnani et K. Zechner (2019), « The many dimensions of algorithmic fairness in educational applications », *Proceedings of the Fourteenth Workshop on Innovative Use of NLP for Building Educational Applications*, http://dx.doi.org/10.18653/v1/w19-4401. [115]

Lyche, C. (2010), *« Taking on the Completion Challenge: A Literature Review on Policies to Prevent Dropout and Early School Leaving »*, OECD Education Working Papers, No. 53, OECD Publishing, Paris, https://dx.doi.org/10.1787/5km4m2t59cmr-en. [3]

Mac Iver, M. (2013), « Early Warning Indicators of High School Outcomes », *Journal of Education for Students Placed at Risk (JESPAR)*, Vol. 18/1, pp. 1-6, http://dx.doi.org/10.1080/10824669.2013.745375. [13]

Mac Iver, M. et M. Messel (2013), « The ABCs of Keeping On Track to Graduation: Research Findings from Baltimore », *Journal of Education for Students Placed at Risk (JESPAR)*, Vol. 18/1, pp. 50-67. [20]

Márquez-Vera, C., A. Cano, C. Romero et S. Ventura (2019), « An Efficacy Study of a Ninth-Grade Early Warning Indicator Intervention », *Journal of Research on Educational Effectiveness*, Vol. 12/3, pp. 363-390, http://dx.doi.org/10.1080/19345747.2019.1615156. [28]

Mandinach, E. et K. Schildkamp (2020), « Misconceptions about data-based decision making in education: An exploration of the literature », *Studies in Educational Evaluation*, http://dx.doi.org/10.1016/j.stueduc.2020.100842. [107]

Márquez-Vera, C., A. Cano, C. Romero et S. Ventura (2013), « Predicting student failure at school using genetic programming and different data mining approaches with high dimensional and imbalanced data », *Applied Intelligence*, Vol. 38/3, pp. 315-330, http://dx.doi.org/10.1007/s10489-012-0374-8. [92]

Marquez-Vera, C., C. Morales et S. Soto (2013), « Predicting School Failure and Dropout by Using Data Mining Techniques », *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologias del Aprendizaje*, Vol. 8/1, pp. 7-14, http://dx.doi.org/10.1109/rita.2013.2244695. [89]

Martin, D. et T. von Oertzen (2015), « Growth Mixture Models Outperform Simpler Clustering Algorithms When Detecting Longitudinal Heterogeneity, Even With Small Sample Sizes », *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, Vol. 22/2, pp. 264-275, http://dx.doi.org/10.1080/10705511.2014.936340. [43]

Martínez Abad, F. et A. Chaparro Caso López (2017), « Data-mining techniques in detecting factors linked to academic achievement », *School Effectiveness and School Improvement*, Vol. 28/1, pp. 39-55, http://dx.doi.org/10.1080/09243453.2016.1235591. [86]

Masyn, K. (2011), *Latent class analysis and finite mixture modeling*, Oxford University Press, Oxford. [44]

McMahon, B. et S. Sembiante (2020), « Re-envisioning the purpose of early warning systems: Shifting the mindset from student identification to meaningful prediction and intervention », *Review of Education*, Vol. 8/1, pp. 266-301, http://dx.doi.org/10.1002/rev3.3183. [14]

Menzer, J. et R. Hampel (2009), « Lost at the last minute », *Phi Delta Kappan*, Vol. 90/9, pp. 660-664. [63]

Moyer-Packenham, P., S. Tucker, A. Westenkow et J. Symanzik (2015), « Examining Patterns in Second Graders' Use of Virtual Manipulative Mathematics Apps through Heatmap Analysis », *International Journal of Educational Studies in Mathematics*, Vol. 2/2, pp. 1-16, http://dx.doi.org/10.17278/ijesim.2015.02.004. [103]

MSV, J. (2016), *Forbes*, https://www.forbes.com/sites/janakirammsv/2016/07/30/how-microsoft-is-making-big-impact-with-machine-learning/?sh=784705a02f16 (consulté le 29 avril 2021). [31]

Muthén, B. (2004), « Latent variable analysis: Growth mixture modeling and related techniques for longitudinal data », dans Kaplan, D. (dir. pub.), *The Sage handbook of quantitative methodology for the social sciences*, Sage Publications, Thousand Oaks, CA, http://www.statmodel.com/papers.shtml. [40]

Nicolae-Bogdan, S., R. Halland, C. Igel et S. Alstrup (2015), *High-School Dropout Prediction Using Machine Learning: A Danish Large-scale Study*, Paper presented at the European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning, Bruges, Belgium.

OECD (2019), *Education at a Glance 2019: OECD Indicators*, OECD Publishing, Paris, https://dx.doi.org/10.1787/f8d7880d-en. [1]

O'Neil, C. (2016), *Weapons of math destruction: How big data increases inequality and threatens democracy.*, Broadway Books. [111]

Pallas, A. (2003), « Educational transitions, trajectories, and pathways », dans Mortimer, J. and M. Shanahan (dir. pub.), *Handbook of the life course*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York. [70]

Piety, P. (2019), « Components, Infrastructures, and Capacity: The Quest for the Impact of Actionable Data Use on P–20 Educator Practice », *Review of Research in Education*, Vol. 43/1, pp. 394-421, http://dx.doi.org/10.3102/0091732x18821116. [75]

Piety, P., D. Hickey et M. Bishop (2014), *Educational data sciences: Framing emergent practices for analytics of learning, organizations, and systems*, ACM. [16]

Quinlan, J. (1993), *C4.5: Programs for Machine Learning, Morgan Kaufmann*, San Mateo, CA. [82]

Quinlan, J. (1990), « Probablistic decision trees », dans Kodratoff, Y. and R. Michalski (dir. pub.), *Machine learning*, Morgan Kaufmann, San Francisco (CA), https://doi.org/10.1016/B978-0-08-051055-2.50011-0. [83]

Ram, N. et K. Grimm (2009), « Methods and Measures: Growth mixture modeling: A method for identifying differences in longitudinal change among unobserved groups », *International Journal of Behavioral Development*, Vol. 33/6, pp. 565-576, http://dx.doi.org/10.1177/0165025409343765. [45]

Raudenbush, S. et A. Bryk (2002), *Hierarchical linear models: Applications and data analysis methods (2nd ed.)*, Thousand Oaks: Sage. [128]

Riehl, C. (1999), « Labeling and letting go: An organizational analysis of how high school students are discharged as dropouts », dans Pallas, A. (dir. pub.), *Research in sociology of education and socialization*, JAI Press, New York. [79]

Romesburg, H. (1984), *Cluster analysis for researchers*, Lifetime Learning Publications, Belmont, CA. [104]

Rumberger, R. (2011), *Dropping Out: Why Students Drop Out of High School and What Can Be Done About It*, Harvard University Press, Cambridge, Mass. [4]

Rumberger, R., H. Addis, E. Allwnsworth, R. Blafanza, J. Bruch, E. Dillon, D. Duardo, M. Dynarski, J. Fugerson, M. Jayanthi, R. Newman-Gonchar, K. Place et C. Tuttle (2017), *Preventing dropout in secondary schools (NCEE 2017-4028)*, https://ies.ed.gov/ncee/wwc/Docs/PracticeGuide/wwc_dropout_092617.pdf. [5]

Rumberger, R. et G. Palardy (2005), « Test Scores, Dropout Rates, and Transfer Rates as Alternative Indicators of High School Performance », *American Educational Research Journal*, Vol. 42/1, pp. 3-42, http://dx.doi.org/10.3102/00028312042001003. [80]

Sansone, D. (2019), « Beyond Early Warning Indicators: High School Dropout and Machine Learning », *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, Vol. 81/2, pp. 456-485, http://dx.doi.org/10.1111/obes.12277. [66]

Sculley, D., G. Holt, D. Golovin, E. Davydov et T. Phillips (2015), « Hidden technical debt in machine learning systems », *Paper presented at the Advances in neural information processing systems.* [117]

Singer, J. et J. Willett (2003), *Applied Longitudinal Data Analysis*, Oxford University Press, http://dx.doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195152968.001.0001. [123]

Singh, L., A. Deshpande, W. Zhou, A. Banerjee, A. Bowers, S. Friedler, H. Jagadish, G. Karypis, Z. Obradovic, A. Vullikanti et W. Zuo (2019), « NSF BIGDATA PI Meeting - Domain-Specific Research Directions and Data Sets », *ACM SIGMOD Record*, Vol. 47/3, pp. 32-35, http://dx.doi.org/10.1145/3316416.3316425. [121]

Soland, J. (2017), « Combining Academic, Noncognitive, and College Knowledge Measures to Identify Students Not on Track For College: A Data-Driven Approach », *Research & Practice in Assessment*, Vol. 12/Summer 2017, pp. 5-19, http://www.rpajournal.com/dev/wp-content/uploads/2017/07/Summer_2017.pdf#page=5. [88]

Soland, J. (2013), « Predicting High School Graduation and College Enrollment: Comparing Early Warning Indicator Data and Teacher Intuition », *Journal of Education for Students Placed at Risk (JESPAR)*, Vol. 18/3-4, pp. 233-262, http://dx.doi.org/10.1080/10824669.2013.833047. [87]

Stodden, V., M. McNutt, D. Bailey, E. Deelman, Y. Gil, B. Hanson, M. Heroux, J. Ioannidis et M. Taufer (2016), « Enhancing reproducibility for computational methods », *Science*, Vol. 354/6317, pp. 1240-1241, http://dx.doi.org/10.1126/science.aah6168. [108]

Stuit, D., M. O'Cummings, H. Norbury, J. Heppen, S. Dhillon, J. Lindsay et B. Zhu (2016), *Identifying early warning indicators in three Ohio school districts*, http://ies.ed.gov/ncee/edlabs/regions/midwest/pdf/REL_2016118.pdf. [23]

Swets, J. (1988), « Measuring the accuracy of diagnostic systems », *Science*, Vol. 240/4857, pp. 1285-1293, http://dx.doi.org/10.1126/science.3287615. [36]

Swets, J., R. Dawes et J. Monahan (2000), « Psychological Science Can Improve Diagnostic Decisions », *Psychological Science in the Public Interest*, Vol. 1/1, pp. 1-26, http://dx.doi.org/10.1111/1529-1006.001. [37]

The Wire (2016), *Aadhaar in Andhra: Chandrababu Naidu, Microsoft Have a Plan For Curbing School Dropouts*, https://thewire.in/politics/aadhaar-in-andhra-chandrababu-naidu-microsoft-have-a-plan-for-curbing-school-dropouts (consulté le 29 avril 2021). [30]

Vermunt, J. et J. Magidson (2002), « Latent class cluster analysis », dans Hagenaars, J. and A. McCutcheon (dir. pub.), *Applied latent class analysis*, Cambridge University Press. [47]

Vermunt, J., B. Tran et J. Magidson (2008), « Latent class models in longitudinal research », dans Menard, S. (dir. pub.), *Handbook of longitudinal research: Design, measurement and analysis,* Elsevier, Burlington, MA, http://www.statisticalinnovations.com/articles/VermuntTranMagidson2006.pdf. [46]

Villagrá-Arnedo, C., F. Gallego-Durán, F. Llorens-Largo, P. Compañ-Rosique, R. Satorre-Cuerda et R. Molina-Carmona (2017), « Improving the expressiveness of black-box models for predicting student performance », *Computers in Human Behavior,* Vol. 72, pp. 621-631, http://dx.doi.org/10.1016/j.chb.2016.09.001. [97]

Wachter, S. et B. Mittelstadt (2019), « A right to reasonable inferences: re-thinking data protection law in the age of big data and AI », *Columia Business Law Review,* Vol. 494. [109]

Wilkinson, L. et M. Friendly (2009), « The History of the Cluster Heat Map », The American Statistician, Vol. 63/2, pp. 179-184, http://dx.doi.org/10.1198/tas.2009.0033. [100]

Willingham, W., J. Pollack et C. Lewis (2002), « Grades and test scores: Accounting for observed differences », *Journal of Educational Measurement*, Vol. 39/1, pp. 1-37, http://www.jstor.org/stable/1435104. [60]

Zehlike, M., F. Bonchi, C. Castillo, S. Haijan, M. Megahed et R. Baeza-Yates (2017), *FA*IR: A Fair Top-k Ranking Algorithm,* ACM, Singapore, Singapore, http://dx.doi.org/10.1145/3132847.3132938. [116]

10 Des évaluations éducatives par le jeu

Jack Buckley, Laura Colosimo, Rebecca Kantar, Marty McCall, et Erica Snow
Imbellus, Inc., États-Unis

Ce chapitre examine comment les progrès récents de la technologie numérique pourraient conduire à une nouvelle génération d'évaluations éducatives par le jeu. Les systèmes d'éducation disposeraient alors d'évaluations capables de tester des compétences plus complexes que les tests standardisés classiques. Après avoir souligné certains des avantages des évaluations par le jeu par rapport aux autres tests, ce chapitre aborde la manière dont ces tests sont construits, comment ils fonctionnent, mais aussi certaines de leurs limites. Si les jeux présentent un grand potentiel pour améliorer la qualité des tests et étendre l'évaluation à des compétences complexes à l'avenir, ils viendront probablement compléter les tests classiques, qui ont aussi leurs avantages. Trois exemples d'évaluations par le jeu qui intègrent des technologies avancées illustrent cette perspective

Introduction

Les récents développements technologiques tels que la réalité virtuelle/augmentée, l'interface utilisateur numérique et la conception d'expériences, l'apprentissage automatique/l'intelligence artificielle ainsi que l'exploration des données éducatives ont permis d'améliorer les environnements numériques simulés et d'accélérer les progrès en matière de qualité et de conception des simulations numériques et des jeux vidéo. Nous disposons aujourd'hui d'applications d'« apprentissage en ligne » à utiliser dans le cadre scolaire et en dehors de celui-ci (p. ex., les laboratoires virtuels ou les outils d'apprentissage médical en ligne avec simulation), mais les récents progrès technologiques ont également ouvert la voie à une nouvelle génération d'évaluations standardisées. Ces évaluations par le jeu permettent d'évaluer un plus large éventail de compétences (p. ex., la créativité, la collaboration ou les compétences socio-émotionnelles), ainsi que de mieux mesurer certains aspects de la « pensée » des répondants, y compris dans des domaines traditionnels comme les sciences et les mathématiques. En outre, l'utilisation d'environnements simulés permet d'évaluer les connaissances et les compétences dans des contextes qui correspondent à la mise en pratique de ces compétences dans la « vraie vie ».

Même si cette nouvelle génération d'évaluations semble promise à un bel avenir, elle n'en comporte pas moins ses propres limites. Par exemple, ces évaluations sont plus coûteuses et plus difficiles à développer que les tests standardisés traditionnels basés sur une simple succession de questions précises ou de petites tâches. Néanmoins, certaines évaluations par le jeu standardisées ont déjà été développées avec succès et feront probablement partie des évaluations de demain. Le chapitre est organisé de la manière suivante : nous soutenons tout d'abord que ces nouvelles évaluations répondent à de nombreuses critiques envers les évaluations classiques et qu'elles ont le potentiel de mieux correspondre aux besoins de l'enseignement et l'apprentissage en classe. Nous expliquons

ensuite comment ces évaluations fonctionnent, quel type de technologie et de données elles utilisent et nous soulignons les défis liés à leur élaboration. Nous fournissons enfin quelques exemples de ces évaluations innovantes standardisées, avant d'envisager le rôle qu'elles pourraient avoir à l'avenir et l'infrastructure nécessaire pour les proposer à grande échelle.

Pourquoi proposer des évaluations éducatives par le jeu ou par simulation ?

L'utilisation d'évaluations standardisées dans l'éducation - de plus en plus associées à des normes bien définies par rapport au contenu académique - est loin d'être une idée nouvelle, puisqu'elle remonte à une quarantaine d'années dans certains pays à revenu élevé et à au moins 20 ans au niveau international (Braun et Kanjee, 2006[1]). Plus récemment, des responsables dans le domaine de la politique de l'éducation, de l'enseignement et de l'apprentissage, et de la théorie cognitive se sont réunis pour demander davantage de cohérence entre l'enseignement, les programmes de cours et les évaluations, ainsi qu'un système d'évaluation complet qui oriente les décisions, de l'appareil législatif aux établissements scolaires (Gong, 2010[2]). Dans le cadre de cette initiative, on observe un intérêt croissant envers les nouvelles technologies et approches d'évaluation, notamment les évaluations immersives, par le jeu ou par simulation (DiCerbo, 2014[3] ; Shaffer et al., 2009[4] ; Shute, 2011[5]). Comme nous l'expliquons ci-dessous, ces nouvelles approches tirent parti de la diffusion croissante des technologies éducatives dans les établissements scolaires, ainsi que des avancées en matière de psychométrie, de conception d'évaluations informatisées, d'exploration de données éducatives et d'apprentissage automatique/intelligence artificielle qui bénéficient aux concepteurs de tests.

Dans le domaine de l'éducation, les évaluations standardisées classiques ont longtemps été dominées par un modèle centré sur des séries de questions précises (également appelées « items ») conçues pour couvrir le contenu d'un cadre d'évaluation en abordant les parties du domaine à mesurer (Mislevy et al., 2012[6]). En revanche, les évaluations par le jeu cherchent à réduire le fossé entre les évaluations classiques et les activités d'apprentissage plus stimulantes grâce à l'utilisation de jeux et de simulations conçus pour mesurer des constructs dans un environnement qui maximise la « fluidité » et récompense les élèves pour avoir démontré leurs processus cognitifs dans des situations plus stimulantes et authentiques, et pas seulement leur capacité à mémoriser des éléments clés (Shute et al., 2009[7]).

Alors que les évaluations éducatives classiques sont conçues pour répondre généralement à des normes de qualité technique telles que la validité (l'évaluation mesure-t-elle ce qu'elle est censée mesurer ?), la *fiabilité* (le fait-elle de manière cohérente et avec un minimum d'erreur ?) et *l'équité* (l'évaluation est-elle culturellement sensible, accessible et exempte de tout biais à l'égard de participants aux tests ?), ces évaluations ont été critiquées sous plusieurs angles. Nous examinons brièvement les différentes critiques émises à l'encontre des évaluations standardisées traditionnelles (p. ex., Sanders et Horn, 1995[8]) et la manière dont l'évaluation basée sur le jeu peut les améliorer :

- nécessité d'appliquer la théorie psychologique moderne aux évaluations ;
- manque de cohérence entre les évaluations et les programmes de cours (Duncan et Hmelo-Silver, 2009[9]) ;
- manque d'intégration des évaluations à des fins différentes, notamment formatives, partielles et sommatives (Perie, Marion et Gong, 2009[10]) ;
- incapacité des évaluations classiques à mesurer certains constructs importants et de plus en plus pertinents pour les politiques éducatives (Darling-Hammond, 2006[11]), et ;
- baisse de l'implication et de la motivation des étudiants (Nichols et Dawson, 2012[12]).

Application de la théorie psychologique moderne aux évaluations

L'ouvrage fondamental Knowing *What Students Know* (National Research Council, 2001[13]) a introduit la théorie cognitive dans le domaine de l'évaluation en utilisant un cadre accessible aux enseignants et aux décideurs. Il préconisait l'examen des fonctions mentales impliquées dans la compréhension profonde, des concepts difficiles à évaluer avec le type de questions courtes et déconnectées, fréquemment utilisées dans les tests standardisés (Darling-Hammond et al., 2013[14]). Cet ouvrage demandait la mise en place de nouveaux types de tâches (ou d'items fréquemment utilisés en classe, mais pas dans les tests normalisés) qui mobilisaient des compétences plus poussées, y compris des dissertations, portfolios, projets pédagogiques et observations des performances en classe. Les jeux et les simulations ont gagné en importance en raison de leur capacité à générer des éléments probants en matière de compréhension approfondie et de processus cognitifs. L'interprétation des données en

continu provenant du jeu ou de l'interaction avec une interface utilisateur numérique soigneusement conçue permet aux chercheurs d'évaluer comment les apprenants s'y prennent pour résoudre des problèmes et peut conduire à un retour d'information mieux ciblé (Chung, 2014[15]). Par exemple, les normes scolaires modernes en termes de contenu scientifique exigent de plus en plus que les élèves apprennent et démontrent des faits et pratiques scientifiques (c'est-à-dire qu'ils pensent et raisonnent comme un scientifique). Dans ce sens, les évaluations par le jeu permettent aux concepteurs des tests de créer des scénarios et des simulations permettant d'observer le raisonnement et les processus suivis par les élèves grâce à leurs interactions complexes avec les éléments du jeu ou de la simulation.

Nécessité de mieux adapter les évaluations aux programmes de cours et à l'enseignement

Conformément à l'objectif d'améliorer l'éducation, les programmes de cours ont évolué. Ils intègrent désormais les théories de l'apprentissage et des approches conceptuelles centrées sur les preuves qui offrent aux étudiants des expériences de base et des exemples pratiques (Mislevy et al., 2012[6] ; Arieli-Attali et al., 2019[16]). Cependant, les évaluations standardisées classiques sont restées relativement figées, ne fournissant que des informations limitées aux enseignants et aux apprenants, et accentuant le fossé entre ce qui est appris (contenu du programme de cours) et ce qui est effectivement testé (contenu des évaluations) (Martone et Sireci, 2009[17]). Les chercheurs et les décideurs continuent de réclamer de nouveaux cadres d'évaluation qui comprennent les théories de l'apprentissage et des compétences fondamentales transférables cohérentes avec l'activité en classe (National Research Council, 2012[18] ; Darling-Hammond et al., 2013[14] ; Conley, 2018[19]), ce qui a suscité un intérêt accru envers le développement de jeux, de simulations et de systèmes de tutorat intelligents conçus autour de processus d'apprentissage ou d'unités pédagogiques spécifiques.

Améliorer la cohérence des évaluations

Les évaluations sont en général classées en fonction de leur objectif : comment les scores sont-ils utilisés et interprétés ? Les tests sommatifs sont administrés à la fin d'une leçon ou d'un chapitre de cours pour évaluer ce qui a été appris. Parmi les exemples d'applications de l'évaluation sommative, citons les épreuves annuelles à grande échelle et les examens d'entrée à l'université, mais aussi les enquêtes comme PISA, TIMSS et diverses évaluations nationales (Oranje et al., 2019[20]). Les évaluations sommatives peuvent représenter des enjeux élevés pour les apprenants (examens d'entrée à l'université ou de fin d'études). En règle générale, elles représentent souvent un faible enjeu pour les élèves, mais un enjeu plus élevé pour les autres acteurs du système éducatif. Les évaluations intermédiaires sont organisées pendant la période d'enseignement pour évaluer les progrès en fonction des objectifs sommatifs et suggérer des changements dans l'approche pédagogique. Les évaluations formatives sont également faites pendant l'enseignement, mais sont étroitement liées à un enseignement spécifique et à la performance individuelle. Contrairement aux évaluations intermédiaires qui peuvent être regroupées à différents niveaux d'enseignement et sont liées à des objectifs sommatifs plus larges, les évaluations formatives sont ajustées aux besoins individuels et à la stratégie d'enseignement à court terme (Shepard, Penuel et Pellegrino, 2018[21]). Chacun de ces niveaux d'évaluation éducative a des objectifs différents et nécessite souvent des modèles de mesure et des méthodes de validation appropriés (Ferrara et al., 2017[22]).

La combinaison de tous ces différents types d'évaluation peut être source de confusion pour les professionnels de l'éducation et les parents et se fait souvent au détriment du temps d'instruction des élèves. C'est dans ce contexte que l'on cherche désormais à rationaliser ce système un peu confus et fragmenté. Aux États-Unis, par exemple, alors que les examens fondés sur la théorie et pertinents sur le plan de l'enseignement sont devenus plus importants, de nombreux appels ont été lancés en faveur d'une plus grande cohérence en matière d'évaluation (Gong, 2010[2] ; Marion et al., 2019[23]). En d'autres termes, les décideurs politiques et les professionnels de l'éducation souhaitent de plus en plus que toutes les évaluations auxquelles les élèves participent tout au long de l'année scolaire fonctionnent ensemble comme un système unique et cohérent.

Alors que les jeux et les simulations utilisés dans les évaluations ont le plus souvent ciblé le niveau formatif, les progrès récents dans le développement et la notation ont rendu possible leur utilisation dans les tests sommatifs des systèmes nationaux et des enquêtes internationales (Verger, Parcerisa et Fontdevila, 2019[24] ; Klieme, 2020[25]). Dans un système plus cohérent, une évaluation immersive par le jeu pourrait être utilisée de différentes manières. Sur le plan formatif, les évaluations par le jeu pourraient permettre de fournir un retour continu et des suggestions personnalisées tout au long de l'apprentissage. À titre de mesure intermédiaire, les élèves peuvent être évalués

dans des conditions de simulation plus standardisées afin de mesurer leurs progrès par rapport aux objectifs sommatifs. En mode sommatif, on pourrait présenter aux élèves un scénario d'évaluation par le jeu, un scénario inhabituel, mais en rapport avec le sujet. Ils seraient invités à le résoudre sans soutien formatif, ce qui permettrait de mieux comprendre ce que les élèves ont appris et sont capables de faire. Encadré 10.1 présente un exemple d'évaluation des compétences professionnelles en Allemagne.

Encadré 10.1 Simulations pour la formation et l'évaluation des compétences professionnelles en Allemagne

Avec les projets ASCOT+, le ministère fédéral allemand de l'Éducation et de la Recherche soutient le développement de la formation et de l'évaluation numériques des compétences professionnelles dans différents domaines (mécatronique automobile, résolution de problèmes pour les systèmes techniques, résolution de problèmes commerciaux, compétences interprofessionnelles et socio-émotionnelles en soins infirmiers). En plus des unités de formation numérique qui utilisent des vidéos et des simulations, le projet développe des évaluations en guise d'examens pour certifier les compétences des apprentis. Par exemple, dans le domaine des professions commerciales, un créateur de tâches d'évaluation axées sur les compétences est en cours de développement pour permettre aux évaluateurs de concevoir des examens qui certifient les compétences des apprenants, permettant la mise en place d'un examen basé sur les compétences, plutôt que sur les connaissances. Les évaluateurs pourront s'appuyer sur une banque de tâches numériques d'évaluation pouvant être légèrement modifiées ou combinées à des fins de personnalisation. Elle sera lancée en 2022 (et officiellement reconnue en Allemagne). Dans le domaine de la mécatronique automobile, des tâches d'examen sont également développées pour tester les compétences des stagiaires dans un environnement simulé et aussi pour renforcer leurs compétences.

Source: Bundesministerium für Bildung und Forschung (s.d.[26]).

Mesure de différents constructs - compétences « difficiles à mesurer »

Une autre critique formulée à l'encontre des évaluations classiques est qu'elles sont inefficaces pour mesurer les connaissances, les compétences et les aptitudes au-delà de contenus très simples, dans des domaines circonscrits (Madaus et Russell, 2010[27]). Par exemple, si un test standardisé classique peut être un moyen valide, fiable, équitable et efficace pour évaluer des connaissances en algèbre, il peut ne pas être approprié pour mesurer des constructs tels que la pensée créative ou la résolution collaborative de problèmes. Cette critique s'avère particulièrement pertinente dans le domaine de l'éducation, et ce pour deux raisons. Premièrement, les programmes pédagogiques modernes du monde entier sont de plus en plus multidimensionnels ; ils incluent à la fois des compétences transversales et des contenus académiques plus traditionnels. Par exemple, les normes scientifiques de prochaine génération aux États-Unis (www.nextgenscience.org/) comprennent non seulement des concepts de base dans une matière spécifique, mais aussi des idées transversales en sciences et en ingénierie. Deuxièmement, les décideurs internationaux prennent de plus en plus conscience de l'importance des « compétences du XXIe siècle » ou des compétences associées à un « apprentissage plus approfondi », telles que l'esprit critique, la communication, la collaboration et la créativité (Trilling et Fadel, 2009[28] ; Vincent-Lancrin et al., 2019[29] ; Fadel, Bialik et Trilling, 2015[30]). L'utilisation de jeux ou de simulations est un moyen très prometteur d'évaluer ces constructs complexes, soit dans le cadre d'un programme de cours révisé, soit comme un complément au contenu couvert par les tests standardisés habituels (Stecher et Hamilton, 2014[31] ; Seelow, 2019[32]).

Mesurer les constructs différemment - interaction et implication

Il est établi que la plupart des personnes qui passent des tests n'apprécient pas trop les évaluations classiques (Nichols et Dawson, 2012[12] ; Madaus et Russell, 2010[27]). Outre les avantages déjà évoqués ci-dessus, un des attraits des évaluations basées par le jeu réside dans leur capacité à fournir une mesure valide et fiable de constructs complexes tout en proposant une forme d'implication et d'immersion propre aux jeux vidéo modernes.

Même si de nombreux éléments probants viennent conforter cet avantage dans un large éventail d'évaluations par le jeu (Hamari et al., 2016[33]), il faut néanmoins garder à l'esprit qu'il y a une différence majeure entre les jeux pratiqués pour le plaisir et les jeux visant à mesurer certains constructs (en particulier, mais sans s'y limiter, ceux utilisés dans des contextes à enjeux élevés). En outre, les évaluations par le jeu doivent répondre à des critères scientifiques plus stricts en matière de validité, de fiabilité et d'équité, ce qui signifie que la transférabilité de l'implication et de l'immersion peut être quelque peu limitée ou du moins de nature différente (Oranje et al., 2019[20]). Pour faire bref, les évaluations par le jeu pourraient ne pas être aussi amusantes que les « vrais » jeux.

Nous allons maintenant examiner de plus près les caractéristiques de telles évaluations et envisager brièvement leur mode de conception.

Comment élaborer des évaluations par le jeu ?

Concevoir à partir du terrain

L'utilisation des jeux et de leurs caractéristiques comme moyen d'accroître l'implication des répondants et de saisir des constructs difficiles à mesurer n'est pas une idée nouvelle (Cordova et Lepper, 1996[34]). Cependant, les connaissances dans le domaine de l'évaluation, ainsi que la compréhension de la meilleure façon de mettre en œuvre ce type d'évaluation et d'utiliser au mieux les données qui en découlent continuent d'évoluer. Il existe de nombreuses façons d'incorporer des jeux et des caractéristiques propres à ceux-ci dans un système ou une évaluation. Ainsi, l'élaboration d'une évaluation par le jeu requiert une réflexion préalable sur les types exacts de caractéristiques que l'on veut mettre en avant et leur impact potentiel sur l'apprenant et la collecte de données (Shute et Ventura, 2013[35]).

Le concepteur de l'évaluation doit déterminer, a priori, ce que le jeu tente de mesurer exactement et comment chaque élément fournit des éléments probants qui viennent renforcer l'objectif initial. Cela veut dire qu'il faut « scénariser » les mesures dignes d'intérêt, déterminer les éléments qui viendront étayer ces mesures et la quantité exacte de ces éléments. Comme Mislevy (2018[36]) le soutient, « *la pire façon de concevoir une évaluation par le jeu ou une simulation est de concevoir ce qui ressemble à un super jeu ou une super simulation, de recueillir quelques observations pour obtenir toutes les informations que les performances au jeu fournissent, puis de confier les données à un psychométricien ou à un scientifique des données pour qu'ils leur assignent une note.* » Même si les analyses exploratoires a posteriori présentent des avantages, elles ne devraient pas être l'élément moteur qui détermine la façon dont on note l'évaluation. Avant que les concepteurs de l'évaluation ne commencent à élaborer les spécifications du jeu, ils doivent d'abord définir ce qu'ils veulent mesurer et comment cela sera fait. Cela inclut la quantification des éléments à vérifier et les échelles qui seront utilisées.

Cet important travail ne peut pas être effectué a posteriori, car il en résulterait souvent des performances psychométriques médiocres ou un manque d'interprétabilité. Par exemple, si l'adaptation d'un jeu existant en vue de son utilisation comme évaluation peut, à première vue, sembler générer une grande quantité de données pour chaque personne testée, il arrive souvent que ces données produisent des items ou des possibilités de mesure qui ne sont pas en phase avec le domaine à évaluer, qui présentent une forte intercorrélation (rendant bon nombre d'entre eux inutiles) ou qui ne sont pas au bon niveau de difficulté (c'est-à-dire trop faciles ou trop difficiles pour la population cible). Par conséquent, le processus de conception des items devrait avoir lieu plus tôt dans le projet, car la conception d'une évaluation par le jeu exige beaucoup de réflexion et de rigueur, et les égarements peuvent s'avérer particulièrement coûteux.

Toutefois, cela ne veut pas dire que l'analyse des données réelles des participants au test dans le cadre du processus d'élaboration des évaluations par le jeu n'est pas importante. Non seulement les concepteurs doivent-ils effectuer les analyses psychométriques empiriques traditionnelles nécessaires à la création d'évaluations valides et fiables, mais ils doivent également tirer parti de la richesse des données supplémentaires générées par les évaluations par le jeu pour appliquer de nouvelles méthodes issues de domaines tels que l'apprentissage automatique afin d'extraire des informations plus exploitables sur les aptitudes des personnes testées ou d'autres constructs lorsque cela est possible, voir (Gobert, Baker et Wixon, 2015[37]).

Jeux pour évaluation contre « ludification »

Nous établissons ici une distinction importante entre la conception de jeux ou de simulations explicitement à des fins de mesure et la « ludification » ou l'ajout d'éléments ludiques à des tâches ou à des activités existantes afin

d'accroître l'implication ou la motivation (Deterding et al., 2011[38]). Un exemple de ludification serait l'ajout d'un tableau de classement, de badges, d'avatars personnalisés ou de barres de progression à une activité en classe et, bien que cela puisse être utile pour améliorer l'implication ou la motivation des élèves, ce n'est pas le type d'évaluation par le jeu dont nous parlons ici. Il est important de noter, cependant, que la distinction entre ces dernières et la ludification est un peu moins nette dans l'évaluation de l'apprentissage socio-émotionnel ou des compétences « non cognitives » dans l'éducation et le monde professionnel. Néanmoins, il est toujours possible d'évaluer ces autres types de compétences et de dispositions via des jeux spécifiquement développés à cet effet (Yang et al., 2019[39]) et non simplement via l'ajout d'éléments ludiques à des tests traditionnels.

La télémétrie et la question de la « furtivité »

Les évaluations par le jeu ou la simulation permettent de recueillir une multitude de données qui sont souvent négligées ou impossibles à saisir via les tests classiques - parfois de manière « furtive » ou à l'insu de la personne qui passe le test (Shute et Ventura, 2013[35]). Il s'agit notamment de modèles de choix, de comportements de recherche, du temps passé sur une tâche et, dans certains cas, de mouvements oculaires ou d'autres informations biométriques. Ces riches sources de données peuvent servir à illustrer les processus cognitifs dans lesquels les élèves se lancent lorsqu'ils effectuent une tâche (Sabourin et al., 2011[40] ; Snow et al., 2015[41]), plutôt que de se concentrer uniquement sur le résultat final de leur performance. Cependant, afin de recueillir et de quantifier ces informations, les développeurs des évaluations par le jeu doivent définir avec soin les données que le système recueille, souvent appelées « télémétrie ». Ce processus implique qu'il faut répertorier chaque action qu'un utilisateur peut effectuer pendant la phase de conception et lui attribuer une valeur ou un nom dans l'infrastructure de données. Pour ce faire, on utilise le plus souvent des cadres de collecte de données ou de mesure tels que la conception centrée sur les preuves [Evidence-Centred Design] (Mislevy et al., 2012[6]). La mise en correspondance de la télémétrie avec les objectifs de mesure nécessite un effort concerté entre les concepteurs, les ingénieurs logiciels et les scientifiques de la mesure. Comme pour toute évaluation, les parties prenantes doivent avoir confiance dans ce qui est mesuré et dans la façon dont c'est fait. Si nous voulons utiliser la télémétrie dans les évaluations éducatives - en particulier dans les applications sommatives et à enjeu élevé - nous devons être très clairs sur les actions qui sont enregistrées, leur interprétation et la manière dont elles doivent être stockées et quantifiées.

Est-ce réellement difficile à mettre en place ? Quels sont les coûts par rapport aux approches plus traditionnelles ?

Notre expérience nous donne à croire que la mise au point d'évaluations par le jeu qui soient valides, fiables et équitables est considérablement plus complexe et difficile que le développement de tests standardisés classiques. Pour obtenir un résultat probant, il faut une équipe interdisciplinaire dotée d'un large éventail de compétences, notamment des concepteurs de jeux, des ingénieurs logiciels ayant idéalement une formation en jeu et des spécialistes des sciences cognitives, ainsi que des concepteurs de tests, des experts en contenu, des chercheurs en éducation et, enfin, des psychométriciens. Le développement d'une évaluation par le jeu est donc relativement coûteux et n'est pas nécessairement le meilleur moyen de mesurer des constructs de base. À titre d'exemple, même si les avantages des évaluations par le jeu ont conduit des programmes d'évaluation, comme le PISA (OCDE) et le National Assessment of Educational Progress (NAEP) des États-Unis, à ajouter des composantes de jeu ou de simulation dans le matériel d'enquête, ils l'ont fait de façon limitée, en raison du coût, en combinant nouveautés et items plus traditionnels (Bergner et von Davier, 2018[42]).

Un autre défi à relever est de rendre les évaluations par le jeu utilisables et accessibles aux élèves souffrant de déficiences. De nombreux progrès ont été réalisés à cet égard ces dernières décennies. Si l'on veut élargir des cadres d'évaluation comme la Conception universelle de l'apprentissage (CUA) (Rose, 2000[43]) aux évaluations par le jeu, il faudra une conception minutieuse, des tests approfondis et, dans certains cas, inventer de nouvelles approches et de nouvelles technologies telles que les dispositifs haptiques qui mettent en œuvre des interfaces utilisateur tactiles et permettent l'évaluation des étudiants malvoyants (Darrah, 2013[44]).

Nouvelles méthodes psychométriques et défis

Les évaluations par le jeu font appel à un éventail plus large de compétences techniques, mais requièrent également des innovations technologiques et de nouvelles approches en termes de mesure. Par exemple, les psychométriciens ont proposé de nouveaux modèles de mesure reflétant la complexité des

tâches (Mislevy et al., 2000[45] ; Bradshaw, 2016[46] ; de la Torre et Douglas, 2004[47]). Ceux-ci et d'autres en cours de développement visent à mieux prendre en compte les théories de la cognition et de l'apprentissage et à saisir les structures latentes complexes des aptitudes des apprenants. Ils fournissent des modèles de mesure adaptés aux nouveaux flux de données générés par les jeux et les simulations.

Les évaluations éducatives par le jeu soulèvent également de nouvelles préoccupations en matière de justice et d'équité. Concrètement, l'accès aux ordinateurs, dans le cadre familial ou scolaire, n'est pas universel. La maîtrise de la logique des jeux vidéo ou de l'interface utilisateur n'est pas uniforme non plus. Ces éléments pourraient creuser davantage les écarts de résultats existants ou en créer de nouveaux. Le développement responsable des évaluations par le jeu doit tenir compte de ces différences et minimiser le fonctionnement différentiel des items (FDI - c'est-à-dire le fait que les items ne se comportent pas comme prévu pour des personnes ayant la même capacité, mais des expériences différentes) en fonction des sous-groupes habituels (sexe, ethnicité, statut linguistique), mais aussi de nouveaux autres sous-groupes potentiels, comme l'expérience des jeux vidéo (voir l'Encadré 10.2). Un élément fondamental qui réduit le risque de fonctionnement différentiel des items dans les évaluations par le jeu est la conception de tutoriels efficaces dans chaque jeu ou simulation, qui enseignent rapidement les mécanismes du jeu aux personnes qui sont peut-être moins familières avec l'interface utilisateur.

Encadré 10.2 L'importance du choix de la technologie pour l'égalité entre les sexes : aperçu d'une expérience au Chili

Les résultats d'une expérience menée dans un établissement public de Santiago suggèrent que les différences de genre dans l'apprentissage des jeux éducatifs peuvent dépendre de la plateforme technologique utilisée (Echeverría et al., 2012[48]). Ce constat peut également s'appliquer aux évaluations par le jeu. Dans le cadre de cette expérience, des élèves de 11e année ont joué à First Colony, un jeu éducatif qui demande aux élèves d'appliquer des concepts d'électrostatique. Les joueurs se mettent dans la peau d'astronautes envoyés en mission pour rapporter un cristal précieux. Le cristal étant fragile, les astronautes ne peuvent le déplacer qu'en utilisant la force électrique. Dans la version du jeu mise en œuvre sur une plateforme équipée de plusieurs souris d'ordinateur, les élèves jouent par groupes de trois, chaque élève contrôlant une souris. À l'aide de celle-ci, les élèves peuvent déplacer leur astronaute, modifier la valeur et la polarité de leur charge et activer leur charge pour interagir avec le cristal. Dans la version en réalité augmentée, les élèves peuvent effectuer les mêmes actions à l'aide d'une tablette. La salle de classe se fond ici dans l'univers du jeu : chaque pupitre est recouvert d'un ensemble de marqueurs qui permettent au système de réalité augmentée de placer des objets virtuels sur les bureaux. Grâce à la webcam située en haut de l'écran, le système détermine l'emplacement de l'astronaute de chaque élève en détectant la position relative de chacun par rapport aux marqueurs en papier. Alors qu'aucune différence de performance entre les sexes n'a été observée lorsque les élèves ont joué à l'aide de la plateforme à souris multiples, les garçons ont obtenu de meilleurs résultats que les filles lorsqu'ils ont joué au même jeu à l'aide d'une plateforme de réalité augmentée, avec une différence statistiquement significative.

Les résultats de l'expérience ont révélé des différences de performance statistiquement significatives entre les garçons et les filles après l'utilisation de la plateforme de réalité augmentée. Étant donné qu'il n'y avait pas d'écart entre les sexes après l'utilisation de la version du jeu à souris multiples, cela donne à penser que le choix de la plateforme peut créer un écart entre les sexes dans l'apprentissage qui n'est pas lié au jeu proprement dit. Il est donc vraisemblable que l'utilisation de la technologie de la réalité augmentée désavantage les filles. Les professionnels de l'éducation doivent donc choisir avec soin la technologie utilisée dans les évaluations par le jeu.

Les perspectives de l'IA et de l'apprentissage automatique

Au-delà des innovations en matière de psychométrie, les évaluations par le jeu et par simulation offrent également de nouvelles possibilités d'innovation technique en lien avec les récents développements de l'apprentissage

automatique et de l'intelligence artificielle (Ciolacu et al., 2018[49]). Par exemple, dans les applications à enjeu élevé nécessitant une évaluation à plusieurs variantes pour garantir la sécurité, les algorithmes d'intelligence artificielle (IA) à forte intensité de calcul permettent de calibrer la difficulté des variantes d'un jeu pour garantir l'équité pour tous les participants aux tests. En d'autres termes, on peut faire appel à l'IA pour « simuler » toutes les variantes proposées d'une évaluation afin d'augmenter la probabilité qu'elles soient toutes comparables en termes de difficulté, avant de passer à des tests pilotes coûteux et longs avec des participants humains.

De manière plus générale, un mécanisme d'IA similaire, ainsi que l'application de techniques d'apprentissage automatique sur des jeux de données concernant la performance au jeu, peuvent être utilisés pour obtenir des informations pertinentes à partir des journaux de données télémétriques (c'est-à-dire les données recueillies au cours du processus d'évaluation par le jeu/la simulation). En d'autres termes, une partie essentielle du développement des évaluations par le jeu devrait inclure une étape où les scores sont affinés et améliorés par le biais d'une analyse exploratoire des données et d'une fouille des données éducatives, à mesure que de plus grandes quantités de données sur les participants aux tests deviennent disponibles. Même si la fouille de données ne doit pas remplacer le processus de conception décrit ci-dessus, les expériences suggèrent que l'itération assistée par ordinateur peut améliorer la fiabilité et l'efficacité des évaluations par le jeu en augmentant la quantité d'informations utiles sur la performance des participants (Mislevy et al., 2014[50]).

Quelques exemples d'évaluations éducatives par le jeu

SimCityEDU : Pollution Challenge (GlassLab)

SimCityEDU : Pollution Challenge est une évaluation par le jeu publiée en 2014 par GlassLab. Il s'agit d'une initiative de développement collaboratif financée par les fondations John D. et Catherine T. MacArthur et Bill et Melinda Gates. Conceptuellement, il s'inspire de la série de jeux SimCity et place le joueur dans le rôle du maire d'une ville virtuelle, chargé de concilier développement économique et protection de l'environnement sur une série de quatre niveaux de complexité croissante. SimCityEDU a été conçu comme une évaluation formative de la résolution de problèmes, de la pensée et de la causalité systémiques s'adressant aux élèves du niveau du premier cycle de l'enseignement secondaire.

Le contenu est expressément conforme aux normes du cadre d'évaluation de l'apprentissage au XXIe siècle et du Conseil pour l'enseignement et s'inspire également des normes scientifiques de nouvelle génération et des normes mathématiques de base. Tout comme dans le jeu initial, les tâches de résolution de problèmes sont très intéressantes et en grande partie de nature spatiale et économique. GlassLab a également consacré des ressources considérables à la résolution de problèmes tels que la « tutorisation » et le traitement de la télémétrie afin de créer des items d'évaluation utiles, ainsi qu'à la mise au point de nouveaux modèles psychométriques pour favoriser les inférences et la production de rapports (Mislevy et al., 2014[49] ; Mislevy, 2018[36]).

Graphique 10.1 SimCityEDU : Pollution Challenge (GlassLab)

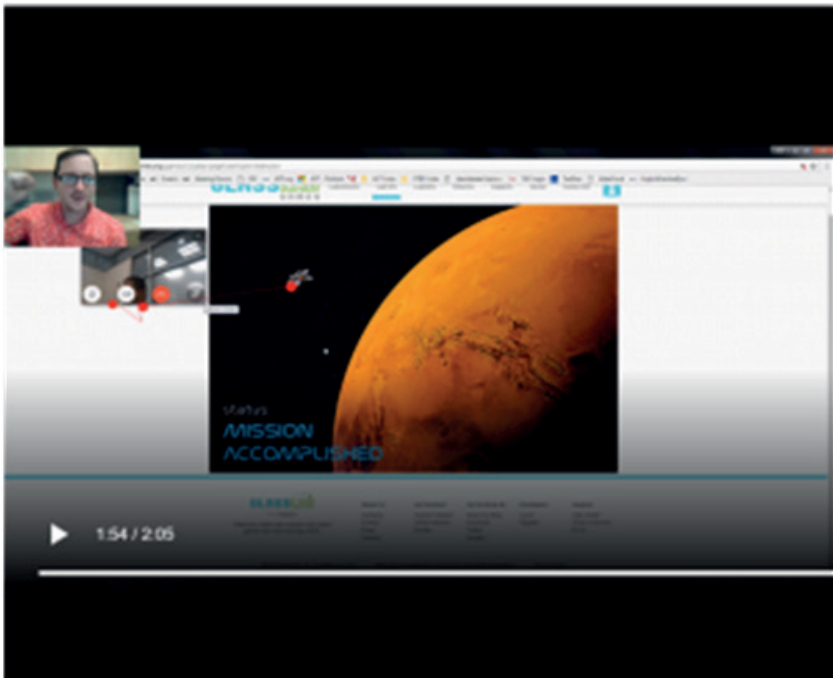
Remarque : Lancé en 2013 par la société aujourd'hui disparue GlassLab, SimCityEDU : Pollution Challenge est une version adaptée de la célèbre franchise de jeux vidéo SimCity et est destinée aux élèves du premier cycle de l'enseignement secondaire. Les élèves utilisent une version modifiée de l'interface de SimCity pour résoudre divers problèmes urbains. Les données télémétriques sont traitées par des modèles psychométriques sophistiqués.
Source: Games for change (s.d.[51]); Glasslab (s.d.[52]).

Crisis in Space (ACTNext)

Dans Crisis in Space, ACTNext a développé une version pilote d'une évaluation par le jeu afin évaluer la résolution collaborative de problèmes et les compétences socio-émotionnelles des élèves du premier cycle du secondaire. Dans ce jeu, deux élèves doivent travailler ensemble pour résoudre une série de problèmes dans une station spatiale : l'un joue le rôle d'un astronaute dans la station et l'autre contrôle la mission au sol. En demandant aux élèves de collaborer réellement dans un jeu coopératif, Crisis in Space offre une expérience authentique et attrayante tout en améliorant les tentatives précédentes de mesurer la collaboration par le biais d'une interaction élève-agent (chatbot).

Crisis in Space, qui a remporté le prix de l'innovation aux 2020 e-Assessment Awards, est particulièrement remarquable parce qu'il utilise un large éventail de données, y compris la télémétrie générée par l'interface utilisateur, les enregistrements des conversations des élèves et les données de suivi oculaire des joueurs. ACTNext a également mis en œuvre une technologie d'apprentissage automatique avancée, telle que le traitement du langage naturel (TLN), pour traiter ces données et évaluer les moments de collaboration (Chopade et al., 2019[53]).

Graphique 10.2 Crisis in Space (ACTNext)



Remarque : Crisis in Space est une évaluation pilote par le jeu développée par ACT, Inc. dans le cadre d'un programme de recherche et de développement de l'évaluation collaborative de la résolution de problèmes mené par la branche de recherche, ACTNext. Dans le scénario, deux joueurs travaillent ensemble pour dépanner une station spatiale. Les technologies utilisées pour évaluer le comportement des joueurs comprennent le suivi oculaire et le traitement du langage naturel.
Source: https://actnext.org/collaboration-assessment-online-games/ ; https://actnext.org/research-and-projects/cps-x-crisis-in-space/ (reproduit avec autorisation).

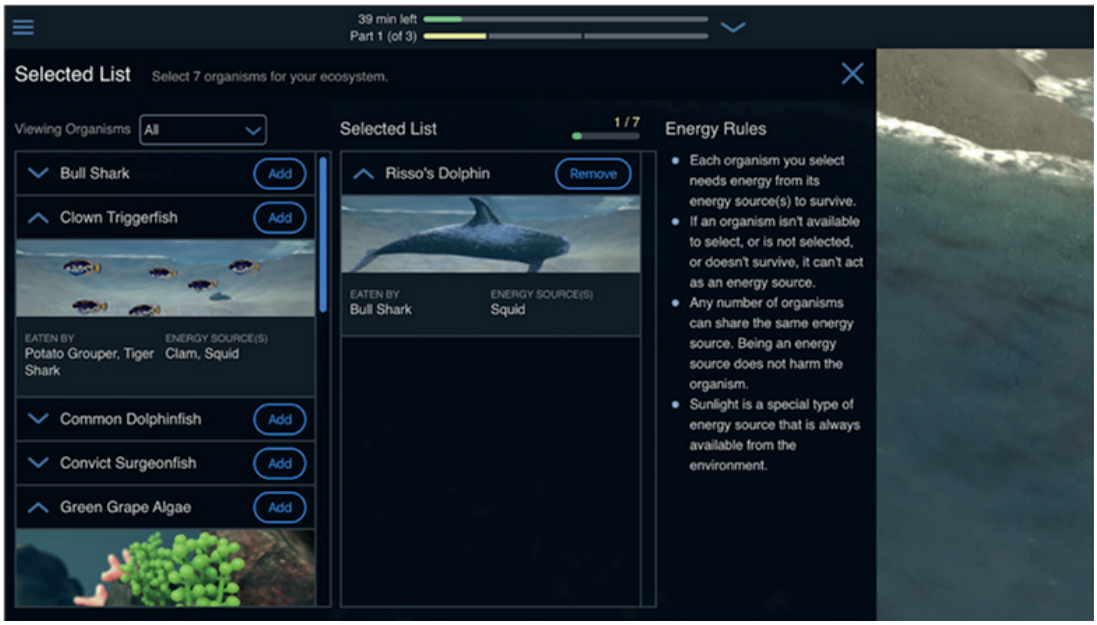
PEEP – Project Education Ecosystem Placement (Imbellus)

Le troisième exemple d'évaluation par le jeu, *Project Education Ecosystem Placement* (PEEP), est également en phase pilote et vise à mesurer la résolution de problèmes chez les élèves de l'enseignement secondaire grâce à un jeu dans lequel les participants doivent construire un réseau alimentaire ou un écosystème viable et le placer dans un environnement naturel où il peut se développer. *PEEP*, financé par la fondation de la famille Walton, est la version adaptée d'une évaluation par le jeu, initialement conçue pour recruter du personnel et actuellement utilisée par le cabinet de conseil international McKinsey pour sélectionner de nouveaux analystes de gestion.

La version éducative a été adaptée pour prendre en compte des sujets propres aux sciences de la vie et mieux correspondre à l'apprentissage des élèves. Le *PEEP* est conçu pour être éventuellement utilisé dans le cadre

d'évaluations sommatives à enjeu élevé et permet la création de nombreuses versions parallèles afin d'améliorer la sécurité des tests. Dans cette perspective, le *PEEP* utilise un algorithme pour créer des solutions d'écosystèmes viables de difficulté approximativement équivalente à partir d'une grande bibliothèque d'organismes. Le *PEEP* peut également être administré en tant que tâche d'évaluation « adaptative par étapes », où l'on présente aux candidats une série de problèmes à résoudre dont la difficulté varie de manière algorithmique en fonction des performances antérieures.

Graphique 10.3 PEEP - Project Education Ecosystem Placement (Imbellus)



Remarque : Conçu pour être utilisé dans le cadre d'une évaluation plus large de la résolution de problèmes, le PEEP demande aux élèves de construire un écosystème viable et de le placer dans un environnement naturel où il peut se développer. L'évaluation est une adaptation d'un autre produit développé par Imbellus pour être utilisé dans le recrutement. La fondation de la famille Walton a soutenu le projet, en partenariat avec *Summit Public Schools* et d'autres systèmes scolaires. La télémétrie des élèves est utilisée pour évaluer les processus mobilisés et offrir la possibilité de noter les résultats selon la théorie de la réponse à l'item.
Source: Avec l'aimable autorisation d'Imbellus.

Quelles sont les perspectives à long terme de cette approche et que doit-on mettre en œuvre pour parvenir à destination ?

Les professionnels de l'éducation, les administrateurs scolaires et les décideurs devraient envisager d'intégrer les évaluations par le jeu dans leurs systèmes d'évaluation de l'éducation, car elles offrent des avantages uniques par rapport aux approches plus traditionnelles. Les évaluations par le jeu sont spéciales, car elles peuvent refléter les interactions dynamiques, la complexité structurelle et les boucles de rétroaction qui sont présentes dans le monde réel. À long terme, les systèmes d'évaluation intégrés devraient s'appuyer sur des scénarios basés sur le jeu et la simulation pour évaluer la manière dont les élèves intègrent et appliquent leurs connaissances, leurs compétences et leurs aptitudes. Les scénarios peuvent certes concerner des éléments précis d'une matière donnée, mais leur plus grand avantage est peut être de faciliter la mesure des compétences du XXIe siècle comme la résolution de problèmes et la collaboration.

Les avantages des évaluations par le jeu, notamment la capacité d'évaluer des processus cognitifs historiquement difficiles à mesurer, un meilleur alignement avec les programmes de cours modernes et une participation accrue des élèves dans le processus de mesure, en font un élément important de l'avenir de tous les systèmes d'évaluation de l'éducation. Cependant, les approches par le jeu ne produisent souvent pas autant de données chiffrées (des scores) utilisables que nous pourrions l'espérer, surtout si l'on tient compte de leur coût de développement relativement élevé par rapport aux items classiques. Un système d'évaluation rentable et robuste pourrait donc utiliser des scénarios basés sur le jeu en combinaison avec des items d'évaluation classiques et moins coûteux,

qui seraient améliorés grâce à des technologies spécifiques. Une approche pertinente en termes de développement consisterait à utiliser des évaluations classiques relativement peu coûteuses lorsque cela est possible (par exemple, pour mesurer les compétences dans une matière scolaire) et à réserver les évaluations par le jeu plus coûteuses à la mesure de constructions cognitives complexes. De plus, l'utilisation des évaluations par le jeu ne devrait pas se limiter aux seules évaluations sommatives, mais devrait plutôt faire partie d'un système cohérent d'évaluation tout au long de l'année scolaire. Un tel système d'évaluation hybride pourrait en théorie être conçu pour d'autres utilisations, notamment la production de rapports de redevabilité, le pilotage de l'enseignement à l'échelle locale et la modélisation de la progression de chaque élève.

Si l'on veut bénéficier des avantages des évaluations par le jeu et par simulation, les ministères de l'Éducation doivent investir dans les infrastructures qui sont nécessaires à la conception, à la mise en œuvre et à l'administration de ces tests. La mise en œuvre d'une partie de ces capacités peut être sous-traitée à des fournisseurs du secteur privé, mais il faudra également mobiliser des capacités publiques. Il faudra notamment disposer de matériel informatique en quantité suffisante dans les établissements scolaires (bien que l'on ait de plus en plus tendance à envisager des politiques du type « apportez votre propre appareil ») et d'une structure de réseau capable de supporter des vitesses de transfert acceptables.

Références

Arieli-Attali, M., S. Ward, J. Thomas, B. Deonovic et A. von Davier (2019), « The Expanded Evidence-Centered Design (e-ECD) for Learning and Assessment Systems: A Framework for Incorporating Learning Goals and Processes Within Assessment Design », *Frontiers in Psychology*, Vol. 10, http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00853. [16]

Bergner, Y. et A. von Davier (2018), « Process Data in NAEP: Past, Present, and Future », *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, Vol. 44/6, pp. 706-732, http://dx.doi.org/10.3102/1076998618784700. [42]

Bradshaw, L. (2016), « Diagnostic Classification Models », dans *The Handbook of Cognition and Assessment*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, http://dx.doi.org/10.1002/9781118956588.ch13. [46]

Braun, H. et A. Kanjee (2006), « Using assessment to improve education in developing nations », dans Braun, H. et al. (dir. pub.), *Improving Education Through Assessment, Innovation, and Evaluation.*, Cambridge, Mass.: American Academy of Arts and Sciences. [1]

Bundesministerium für Bildung und Forschung (s.d.), *ASCOT+*, https://www.ascot-vet.net (consulté le 30 mai 2021). [26]

Chopade, P., D. Edwards, S. Khan, A. Andrade et S. Pu (2019), « CPSX: Using AI-Machine Learning for Mapping Human-Human Interaction and Measurement of CPS Teamwork Skills », *2019 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST)*, http://dx.doi.org/10.1109/hst47167.2019.9032906. [53]

Chung, G. (2014), « Toward the Relational Management of Educational Measurement Data », *Teachers College Record*, Vol. 116/11. [15]

Ciolacu, M., A. Fallah Tehrani, L. Binder et P. Mugur Svasta (2018), « Education 4.0 - Artificial Intelligence Assisted Higher Education: Early recognition System with Machine Learning to support Students' Success », *2018 IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, http://dx.doi.org/10.1109/siitme.2018.8599203. [49]

Conley, D. (2018), *The Promise and Practice of Next Generation Assessment.*, Harvard University Press, Cambridge, MA. [19]

Cordova, D. et M. Lepper (1996), « Intrinsic motivation and the process of learning: Beneficial effects of contextualization, personalization, and choice », *Journal of Educational Psychology*, Vol. 88/4, pp. 715-730, http://dx.doi.org/10.1037/0022-0663.88.4.715. [34]

Darling-Hammond, L. (2006), « Constructing 21st-Century Teacher Education », *Journal of Teacher Education*, Vol. 57/3, pp. 300-314, http://dx.doi.org/10.1177/0022487105285962. [11]

Darling-Hammond, L., J. Herman, J. Pellegrino, J. Abedi, J. Lawrence Aber, E. Baker, R. Bennett, E. Gordon, E. Haertel, K. Hakuta, A. Ho, R. Lee Linn, P.D. Pearson, J. Popham, L. Resnik, A. Schoenfeld, R. Shalveson, L. Shepard, L. Shulman et C. Steele (2013), « Criteria for High-quality Assessment », *Stanford Center for Opportunity Policy in Education.* [14]

Darrah, M. (2013), « Computer Haptics: A New Way of Increasing Access and Understanding of Math and Science for Students Who are Blind and Visually Impaired », *Journal of Blindness Innovation and Research*, Vol. 3/2, http://dx.doi.org/10.5241/3-47. [44]

de la Torre, J. et J. Douglas (2004), « Higher-order latent trait models for cognitive diagnosis », *Psychometrika*, Vol. 69/3, pp. 333-353, http://dx.doi.org/10.1007/bf02295640. [47]

Deterding, S., D. Dixon, R. Khaled et L. Nacke (2011), « From game design elements to gamefulness », *Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference on Envisioning Future Media Environments - MindTrek '11*, http://dx.doi.org/10.1145/2181037.2181040. [38]

DiCerbo, K. (2014), « Game-Based Assessment of Persistence », *Educational Technology & Society*, Vol. 17/1, pp. 17-28. [3]

Duncan, R. et C. Hmelo-Silver (2009), « Learning progressions: Aligning curriculum, instruction, and assessment », *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 46/6, pp. 606-609, http://dx.doi.org/10.1002/tea.20316. [9]

Echeverría, A., M. Améstica, F. Gil, M. Nussbaum, E. Barrios et S. Leclerc (2012), « Exploring different technological platforms for supporting co-located collaborative games in the classroom », *Computers in Human Behavior*, Vol. 28/4, pp. 1170-1177. [48]

Fadel, C., M. Bialik et B. Trilling (2015), *Four-dimensional Education: the Competencies Learners Need to Succeed.*, Center for Curriculum Redesign, Cambridge, MA. [30]

Ferrara, S., E. Lai, A. Reilly et P. Nichols (2017), « Principled Approaches to Assessment Design, Development, and Implementation », dans The *Handbook of Cognition and Assessment*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, http://dx.doi.org/10.1002/9781118956588.ch3. [22]

Games for change (s.d.), Games for change, http://www.gamesforchange.org/game/simcityedu-pollution-challenge/ (consulté le 30 avril 2021). [51]

Glasslab (s.d.), *SIMCITY edu: pollution challenge*, https://s3-us-west-1.amazonaws.com/playfully-games/SC/brochures/SIMCITYbrochure_v3small.pdf (consulté le 30 avril 2021). [52]

Gobert, J., R. Baker et M. Wixon (2015), « Operationalizing and Detecting Disengagement Within Online Science Microworlds », *Educational Psychologist*, Vol. 50/1, pp. 43-57, http://dx.doi.org/10.1080/00461520.2014.999919. [37]

Gong, B. (2010), *Using balanced assessment systems to improve student learning and school capacity: An introduction.*, Council of Chief State School Officers, Washington, DC. [2]

Hamari, J., D. Shernoff, E. Rowe, B. Coller, J. Asbell-Clarke et T. Edwards (2016), « Challenging games help students learn: An empirical study on engagement, flow and immersion in game-based learning », *Computers in Human Behavior*, Vol. 54, pp. 170-179, http://dx.doi.org/10.1016/j.chb.2015.07.045. [33]

Klieme, E. (2020), « Policies and Practices of Assessment: A Showcase for the Use (and Misuse) of International Large Scale Assessments in Educational Effectiveness Research », dans *International Perspectives in Educational Effectiveness Research*, Springer International Publishing, Cham, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-44810-3_7. [25]

Madaus, G. et M. Russell (2010), « Paradoxes of High-Stakes Testing », *Journal of Education*, Vol. 190/1-2, pp. 21-30, http://dx.doi.org/10.1177/0022057410190001-205. [27]

Marion, S., J. Thompson, C. Evans, J. Martineau et N. Dadey (2019), « A Tricky Balance: The Challenges and Opportunities of Balanced Systems of Assessment », dans *Paper Presented at the Annual Meeting of the National Council on Measurement in Education Toronto, Ontario April 6, 2019*, National Center for the Improvement of Educational Assessment, https://www.nciea.org/sites/default/files/inline-files/Marion%20et%20al_A%20Tricky%20Balance_031319.pdf (consulté le 2 janvier 2020). [23]

Martone, A. et S. Sireci (2009), « Evaluating Alignment Between Curriculum, Assessment, and Instruction », Vol. 79/4, pp. 1332-1361, http://dx.doi.org/10.3102/0034654309341375. [17]

Mislevy, R. (2018), *Sociocognitive Foundations of Educational Measurement.*, Routledge, New York. [36]

Mislevy, R., R. Almond, D. Yan et L. Steinberg (2000), « Bayes nets in educational assessment: Where do the numbers come from? », *(CSE Report 518). Los Angeles: University of California, National Center for Research on Evaluation, Standards, and Student Testing (CRESST).* [45]

Mislevy, R., J. Behrens, K. Dicerbo et R. Levy (2012), « Design and discovery in educational assessment: Evidence-centered design, psychometrics, and educational data mining », *Journal of educational data mining*, Vol. 4/1, pp. 11-48. [6]

Mislevy, R., A. Oranje, M. Bauer, A. von Davier, J. Hao, S. Corrigan, E. Hoffman, K. DiCerbo et M. John (2014), *Psychometric Considerations in Game-Based Assessment.*, Glasslab Games, Redwood City, CA. [50]

National Research Council (2001), *What Students Know: The Science and Design of Educational Assessment.*, National Academies Press, Washington, D.C., http://dx.doi.org/10.17226/10019. [13]

Nichols, S. et H. Dawson (2012), « Assessment as a Context for Student Engagement », dans *Handbook of Research on Student Engagement*, Springer US, Boston, MA, http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-2018-7_22. [12]

Oranje, A., B. Mislevy, M. Bauer et G.Tanner Jackson (2019), « Summative Game-based Assessment », dans Ifenthaler, D. and Y. Kim (dir. pub.), Ga*me-based Assessment Revisited*, Springer. [20]

Pellegrino, J. et M. Hilton (dir. pub.) (2012), *Education for Life and Work: Developing Transferable Knowledge and Skills in the 21st Century. Committee on Defining Deeper Learning and 21st Century Skills.*, National Academies Press, Washington, D.C., http://dx.doi.org/10.17226/13398. [18]

Perie, M., S. Marion et B. Gong (2009), « Moving Toward a Comprehensive Assessment System: A Framework for Considering Interim Assessments », *Educational Measurement: Issues and Practice*, Vol. 28/3, pp. 5-13, http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-3992.2009.00149.x. [10]

Rose, D. (2000), « Universal Design for Learning », *Journal of Special Education Technology*, Vol. 15/3, pp. 45-49, http://dx.doi.org/10.1177/016264340001500307. [43]

Sabourin, J., J. Rowe, B. Mott et J. Lester (2011), « When Off-Task is On-Task: The Affective Role of Off-Task Behavior in Narrative-Centered Learning Environments », dans *Lecture Notes in Computer Science, Artificial Intelligence in Education*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-21869-9_93. [40]

Sanders, W. et S. Horn (1995), « Educational Assessment Reassessed », *education policy analysis archives*, Vol. 3, pp. 6, http://dx.doi.org/10.14507/epaa.v3n6.1995. [8]

Seelow, D. (2019), « The Art of Assessment: Using Game Based Assessments to Disrupt, Innovate, Reform and Transform Testing », *Journal of Applied Testing Technology*, Vol. 20/S1, pp. 1-16. [32]

Shaffer, D., D. Hatfield, G. Navoa Svarovsky, P. Nash, A. Nulty, E. Bagley, K. Frank, A. Rupp et R. Mislevy (2009), « Epistemic Network Analysis: A Prototype for 21st-Century Assessment of Learning », *International Journal of Learning and Media*, Vol. 1/2, pp. 33-53, http://dx.doi.org/10.1162/ijlm.2009.0013. [4]

Shepard, L., W. Penuel et J. Pellegrino (2018), « Using Learning and Motivation Theories to Coherently Link Formative Assessment, Grading Practices, and Large-Scale Assessment », *Educational Measurement: Issues and Practice*, Vol. 37/1, pp. 21-34, http://dx.doi.org/10.1111/emip.12189. [21]

Shute, V. (2011), *Stealth assessment in computer-based games to support learning. Computer games and instruction.*, Information Age Publishers, Charlotte, NC, http://myweb.fsu.edu/vshute/pdf/shute%20pres_h.pdf. [5]

Shute, V. et M. Ventura (2013), « Stealth Assessment: Measuring and Supporting Learning in Video Games », dans John, D. and C. MacArthur (dir. pub.), *Foundation Reports on Digital Media and Learning.*, The MIT Press, Cambride, MA, http://dx.doi.org/10.7551/mitpress/9589.001.0001. [35]

Shute, V., M. Ventura, M. Bauer et D. Zapata-Riviera (2009), « Melding the power of serious games and embedded assessment to monitor and foster learning », *Serious games: Mechanisms and effects*, Vol. 2, pp. 295-321. [7]

Snow, E., L. Allen, M. Jacovina et D. McNamara (2015), « Does agency matter?: Exploring the impact of controlled behaviors within a game-based environment », *Computers & Education*, Vol. 82, pp. 378-392, http://dx.doi.org/10.1016/j.compedu.2014.12.011. [41]

Stecher, M. et L. Hamilton (2014), Measuring hard-to-measure student competencies: A research and development plan., RAND Corporation, Santa Monica, CA, https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR863.html. [31]

Trilling, B. et C. Fadel (2009), *21st century skills: Learning for Life in Our Times.*, Jossey-Bass. [28]

Verger, A., L. Parcerisa et C. Fontdevila (2019), « The growth and spread of large-scale assessments and test-based accountabilities: a political sociology of global education reforms », *Educational Review*, Vol. 71/1, pp. 5-30, http://dx.doi.org/10.1080/00131911.2019.1522045. [24]

Vincent-Lancrin, S., C. Gonzalez-Sancho, M. Bouckaert, F. de Luca, M. Fernandez-Barrerra, G. Jacotin, J. Urgel et Q. Vidal (2019), *Fostering Students' Creativity and Critical Thinking: What it Means in School*, Educational Research and Innovation, OECD Publishing, Paris, https://dx.doi.org/10.1787/62212c37-en. [29]

Yang, F., L. Leqi, Y. Wu, Z. Lipton, P. Ravilkimar, W. Cohen et T. Mitchel (2019), « Game Design for Eliciting Distinguishable Behavior », *Paper prepared for the 33rd Conference on Neural Information Processing Systems.*, https://papers.nips.cc/paper/8716-game-design-for-eliciting-distinguishable-behavior.pdf (consulté le 2 janvier 2020). [39]

11 La blockchain et le monde de l'éducation : Un nouvel écosystème de délivrance de titres et diplômes

Natalie Smolenski
Hyland Credentials, États-Unis

La technologie blockchain est en train de révolutionner le monde des services financiers en fournissant des réseaux distribués pour les transactions en monnaies numériques. La même infrastructure numérique peut servir à vérifier d'importantes assertions ou des attestations portant sur les compétences, notamment les dossiers scolaires et universitaires. Dans le domaine de l'éducation du monde entier, on assiste à un important essor de l'utilisation de la technologie blockchain afin de délivrer, partager et vérifier les expériences et les qualifications éducatives. Le présent chapitre donne un aperçu de la technologie blockchain et met en lumière son utilisation dans l'éducation pour produire des justificatifs numériques portables, interopérables et contrôlés par l'utilisateur. Ces titres vérifiables constituent une forme de monnaie sociale qui donne aux étudiants et aux travailleurs la possibilité de transférer leurs compétences et leurs aptitudes partout dans le monde où ils choisissent de vivre, étudier ou travailler.

Introduction

Ce chapitre établit l'intérêt que revêt la technologie blockchain, pour le monde de l'éducation, en tant que nouvelle infrastructure de vérification numérique. Pour faire bref, cette technologie permet à quiconque de valider les données avancées par un individu ou un établissement d'enseignement, que ce soit en matière de compétences ou de qualifications, et ce de manière instantanée et fiable. Elle élimine la fraude aux diplômes, facilite la mobilité géographique et institutionnelle des apprenants et des travailleurs, et émancipe les individus en leur accordant plus de contrôle sur les données qui les concernent.

Ce chapitre est divisé en plusieurs sections : 1) une introduction générale à la technologie blockchain ; 2) une explication des avantages qu'elle présente pour l'éducation ; 3) une étude mondiale sur les mises en œuvre de la blockchain dans l'éducation menées par des entités des secteurs public et privé ; 4) et enfin, une série de recommandations à l'intention des décideurs politiques et des établissements d'enseignement concernant la meilleure façon d'aborder cette nouvelle technologie.

L'objectif de la première section de ce chapitre, « Comprendre la technologie blockchain », est d'aider les lecteurs peu familiers avec la blockchain à comprendre son fonctionnement avant de l'appliquer à des cas particuliers dans le secteur éducatif. Elle donne un aperçu de l'histoire et des principaux concepts de la blockchain, ainsi que de ses principales fonctions. Quelques cas pratiques sont également présentés. En un mot, le principal intérêt de la blockchain est de fournir un mécanisme permettant d'obtenir un consensus entre plusieurs parties qui ne se font pas confiance. Cette section se concentre sur les monnaies numériques, première application concrète de la technologie blockchain, mais elle met également en évidence d'autres utilisations possibles.

Les lecteurs qui disposent d'une bonne compréhension de la technologie blockchain peuvent donc passer directement à la section 2, « Avantages de la blockchain pour l'éducation », qui montre comment on peut s'en servir pour vérifier et transférer de manière fiable des diplômes, des dossiers universitaires et d'autres types de titres et certificats. Certes, la technologie blockchain peut potentiellement être utilisée à d'autres fins dans le domaine de l'éducation, telles que la rationalisation des processus administratifs, mais la vérification de titres de compétences est de loin l'application la plus au point aujourd'hui et, constitue, par conséquent, le thème central de ce chapitre.

La troisième section, « Déploiement dans le monde réel », fournit au lecteur une étude du marché mondial des solutions de délivrance de titres numériques vérifiables par le biais de la technologie blockchain. Compte tenu des progrès rapides dans le domaine, on peut dire que cette section est à jour au deuxième trimestre de 2021, mais cela est susceptible d'évoluer de manière significative dans les mois et les années à venir. Un des aspects particulièrement encourageants concernant la technologie blockchain réside dans son adoption immédiate à l'échelle mondiale. Ceci est vrai pour l'éducation comme pour d'autres secteurs.

En tant que technologie de réseau véritablement mondiale, la blockchain est donc à l'image du World Wide Web. La quatrième section, « Conduire le changement », recommande donc aux gouvernements, aux fournisseurs de solutions et aux établissements d'enseignement de privilégier la portabilité internationale et l'interopérabilité des plateformes qu'ils utilisent ou développent dans le cadre des solutions de délivrance de titres et de certificats par blockchain. La pandémie de COVID-19 n'a fait que souligner la nécessité d'un transfert de données numériques sécurisé, instantané et vérifiable entre les institutions ainsi qu'entre les individus et les institutions. Comme pour tout projet de numérisation, le passage à un modèle de certification numérique vérifiable nécessite à la fois des investissements budgétaires et une gestion efficace du changement. Toutefois, en choisissant des solutions et des fournisseurs qui s'appuient sur des normes ouvertes, les organisations peuvent pérenniser leurs projets et assurer leur viabilité à long terme.

En définitive, l'utilisation de la blockchain pour valider des titres et diplômes crée un écosystème mondial d'enregistrements interopérables, une nouvelle structure fiable pour soutenir la mobilité mondiale de la main d'œuvre et des services. Elle soutient également un modèle d'éducation fondé sur « l'apprentissage tout au long de la vie », dans lequel les établissements d'enseignement traditionnels constituent des étapes dans un parcours de développement personnel continu, qui se déroule à la fois au sein et en dehors des établissements d'enseignement. Dans l'économie du XXIe siècle, les natifs du numérique ont intériorisé ce modèle de développement personnel et attendent de leurs titres et diplômes qu'ils soient aussi pratiques, sûrs et portables que les autres formats de données numériques. Les établissements d'enseignement se trouvent donc dans une position passionnante et peut-être sans précédent. Ils sont à l'avant-garde mondiale d'une nouvelle innovation technologique : les dossiers universitaires, sécurisés par des registres numériques transnationaux qui deviennent les premiers cas d'utilisation non monétaire d'une monnaie sociale de confiance de nouvelle génération.

Comprendre la technologie blockchain

Une percée dans le domaine de l'informatique

Ce n'est qu'en 2009 que la monnaie numérique a été largement adoptée. Pourquoi ? Parce qu'avant cela il était trop facile de la « dépenser deux fois » : trop facile pour quelqu'un de prétendre avoir de la monnaie numérique qu'il n'avait pas et de la dépenser plusieurs fois. La possibilité pour quiconque de créer de la monnaie à volonté rend toute forme de monnaie de ce type sans valeur.

Les informaticiens ont passé des décennies à tenter de résoudre ce problème, qui a finalement trouvé une solution pratique avec le protocole Bitcoin pour les transactions monétaires électroniques entre particuliers (Nakamoto, 2008[1]). Le Bitcoin a été la première « blockchain » : la première chaîne de transactions non modifiables validées

par des nœuds antagonistes dans un réseau. Mais nous reviendrons un peu plus loin sur la nature de la blockchain et du Bitcoin. Avant de pouvoir vraiment comprendre l'importance de la percée de la blockchain, nous devons d'abord comprendre comment elle résout un problème informatique encore plus fondamental : le problème des généraux byzantins (PGB).

Le PGB implique la coordination d'une action entre plusieurs parties, dont certaines ne sont ni fiables ni dignes de confiance. Dans l'exemple classique du PGB, plusieurs généraux byzantins prévoient d'attaquer une ville, mais l'attaque ne sera réussie que s'ils attaquent tous en même temps. Si toutes ces parties ne peuvent pas se coordonner sur une seule action, tout le monde perd, mais si elles se coordonnent toutes sur la même action, tout le monde gagne (Moskov, 2018[2]). Il s'agit d'une situation binaire : échec complet ou victoire totale. Une victoire totale nécessite quelque chose de très difficile à obtenir dans tout groupe social : le consensus.

Les systèmes informatiques qui produisent de manière fiable un consensus entre plusieurs parties non dignes de confiance ou antagonistes sont des systèmes « byzantins tolérants aux pannes ». Les systèmes de contrôle de vol des avions, les systèmes de contrôle de vol des vaisseaux spatiaux, les systèmes de gestion d'énergie nucléaire et les systèmes de monnaie numérique sont des exemples de systèmes qui nécessitent une tolérance aux pannes (Wikipedia, s.d.[3] ; Binance Academy, s.d.[4]). Ces systèmes utilisent différentes solutions au problème des généraux byzantins, ou différents mécanismes de consensus. Un mécanisme de consensus est un moyen de parvenir à un consensus entre des parties qui ne se font pas confiance. Différents mécanismes de consensus sont apparus pour répondre aux différents besoins et objectifs des divers systèmes tolérants aux pannes.

Par exemple, si vous essayez de suivre une unité de gestion des stocks (UGS) à plusieurs étapes dans une chaîne d'approvisionnement et que vous ne faites pas confiance à tous les maillons de cette chaîne pour vous dire la vérité, vous aurez vraisemblablement besoin d'un système tolérant aux pannes. D'autre part, si vous essayez de suivre des dépenses en monnaie numérique et que chaque membre du réseau est susceptible de prétendre avoir plus d'argent qu'il n'en a réellement, un mécanisme de consensus encore plus robuste est nécessaire. Tous les systèmes tolérants aux pannes ne sont pas des blockchains. Mais le Bitcoin, premier déploiement de la technologie blockchain, est un système à tolérance de pannes qui a émergé pour contrôler la possession et les dépenses de monnaie numérique. En plus de résoudre le BGP, il a également résolu le problème du double dépôt grâce à un mécanisme de consensus connu sous le nom de « preuve de travail. » (Wikipedia, s.d.[5]).

Imaginez la preuve de travail comme un CAPTCHA, mais pour les ordinateurs. Avec CAPTCHA, un site Web vous demande de prouver que vous êtes un être humain en solutionnant une énigme facile à résoudre pour un humain, mais difficile à résoudre pour un ordinateur. Si vous parvenez à solutionner l'énigme, l'ordinateur récepteur vous permettra d'envoyer des données ou de vous abonner à un service. De la même manière, les ordinateurs auxquels d'autres ordinateurs demandent de faire quelque chose - comme envoyer de l'argent d'une entité à une autre - peuvent également exiger que les ordinateurs demandeurs démontrent qu'ils ont résolu une énigme complexe avant que leur demande ne soit acceptée. La vérification par l'ordinateur demandeur de la résolution de l'énigme constitue la « preuve de travail ».

La preuve de travail vise à rendre la communication entre ordinateurs plus coûteuse afin d'éliminer l'utilisation abusive et frauduleuse du réseau. Par exemple, les preuves de travail permettent d'éviter les attaques par déni de service distribué (DDoS) et les spams - où des utilisateurs hostiles grippent les rouages d'un réseau en l'inondant de données malveillantes ou absurdes. À mesure que les ordinateurs deviennent plus rapides et plus intelligents, la preuve de travail devient de plus en plus compliquée, et plus coûteuse en termes de puissance de traitement. C'est néanmoins nécessaire pour que les réseaux tolérants aux pannes restent sûrs, stables et utilisables. Mais la puissance de traitement nécessaire ne cesse d'augmenter et cela entraîne une consommation énergétique croissante. Les systèmes de preuve de travail comme le Bitcoin ont été critiqués pour leur impact sur l'environnement (Temple, 2019[6]). En réponse à ces critiques, les clusters d'ordinateurs exécutant le protocole Bitcoin utilisent désormais fréquemment des sources d'énergie renouvelables et sont situés dans des climats froids afin d'économiser l'énergie nécessaire à leur refroidissement (Baydakova, 2019[7] ; Morris, 2018[8]). Cependant, malgré la consommation d'énergie relativement élevée du protocole Bitcoin, plusieurs études importantes qui ont quantifié la consommation d'énergie dans le passé se sont révélées inexactes (DiChristopher, 2017[9]). Les affirmations selon lesquelles le réseau Bitcoin utiliserait autant d'électricité que le reste du monde d'ici 2020 ne se sont manifestement pas vérifiées (Cuthbertson, 2017[10]). Et comme la puissance de traitement des ordinateurs devient plus efficace sur le plan énergétique, le réseau Bitcoin le devient aussi - sans compromettre la sécurité

et la facilité d'utilisation nécessaires pour servir de réserve de valeur à long terme pour la monnaie numérique (American Chemical Society, 2019[11]) En fait, un récent livre blanc de la société de gestion d'investissements Ark Invest laisse entendre que le minage du Bitcoin pourrait jouer un rôle clé dans le passage aux énergies renouvelables en aidant à gérer l'offre et la demande sur les marchés de l'énergie (Ark Invest, 2021[12]).

Bitcoin est donc un système tolérant aux pannes qui a été conçu pour maintenir en toute sécurité et même accroître la valeur de sa monnaie numérique en évitant le problème du double paiement/double dépense grâce à la preuve de travail. Mais pourquoi l'appelle-t-on blockchain ?

Blockchains et registres distribués

Comme indiqué ci-dessus, tous les systèmes tolérants aux pannes ne sont pas des blockchains. Même s'il y a débat sur ce qui différencie exactement une blockchain des autres systèmes à tolérance de pannes, il y a un large consensus sur le fait que le mot « blockchain » fait référence à un type de registre distribué qui enregistre une base de données immuable de transactions. Le mot « blockchain » a été utilisé pour la première fois en relation avec le protocole Bitcoin pour désigner un registre de transactions en monnaie numérique. L'inventeur du Bitcoin, Satoshi Nakamoto, l'a d'abord appelé « chaîne de preuve de travail » ou « chaîne temporelle » parce que les transactions sont ajoutées au registre de manière séquentielle et horodatée, ce qui permet de toujours conserver l'enregistrement dans un ordre chronologique (Messari, 2019[13]). En outre, ces transactions sont regroupées en « blocs », qui sont déposés sur la chaîne après une période de temps déterminée. (Dans le cas du bitcoin, de nouveaux blocs de transactions sont ajoutés à la chaîne toutes les 10 minutes.) Cette architecture basée sur les blocs est désormais connue sous le terme de « blockchain », qui a été « inventé » par la première communauté Bitcoin.

Qu'en est-il des systèmes tolérants aux pannes qui ne reposent pas sur des blocs de transactions ajoutés à une base de données immuable ? On les appelle parfois « registres distribués ». Ceux-ci peuvent suivre ou non le mouvement de la monnaie dans un réseau et utilisent généralement des mécanismes de consensus différents de la preuve de travail. Ils peuvent même être modifiés par les parties disposant des autorisations nécessaires. Certaines personnes font une distinction entre les registres distribués et les blockchains et les traitent comme des choses différentes, tandis que d'autres considèrent les blockchains comme un type spécifique de registre distribué.

La distinction entre les blockchains et les registres distribués tient du fait que les différents réseaux tolérants aux pannes sont créés à des fins différentes. La principale différence entre les divers réseaux à tolérance de pannes est leur niveau relatif de centralisation ou de décentralisation. En d'autres termes, dans quelle mesure l'infrastructure d'un réseau est-elle soutenue par une ou plusieurs autorités et le consensus déterminé par celles-ci ? Dans certains cas, une architecture de blockchain plus centralisée a du sens, pour d'autres, ce n'est pas le cas. Nous examinons ci-dessous différents déploiements de blockchains plus ou moins décentralisées sous l'angle des parties prenantes qui les utilisent dans un but particulier.

Décentralisation ou centralisation

Il est utile de considérer le Bitcoin comme un exemple emblématique de blockchain décentralisée. Il est décentralisé en raison du principal problème à résoudre pour lequel il a été créé : celui de la croissance infinie de la masse monétaire qui finit par dévaluer la monnaie elle-même. Tout au long de l'histoire, les gouvernements ont été incités à créer de plus en plus de monnaie afin de financer des guerres, de soutenir les marchés ou de rembourser des dettes (Bhatia, 2021[14]). Au fil du temps, cette politique entraîne une dévaluation de la monnaie, ce qui détruit l'épargne et la richesse des citoyens ordinaires (Alden, 2021[15]). Le bitcoin évite la dévaluation de la monnaie, car il a été créé pour être numériquement rare, avec une offre fixe de 21 millions de pièces. Aucun individu ou gouvernement ne peut changer cela, car le protocole bitcoin sous-jacent a été conçu de manière rigide. Autrement dit, la monnaie bitcoin a été conçue pour être rare et donc pour prendre de la valeur au fil du temps. (le protocole Bitcoin s'écrit généralement avec une majuscule, tandis que la crypto-monnaie bitcoin ne prend pas de majuscule. La cryptomonnaie bitcoin est parfois abrégée en BTC).

Encadré 11.1 Public/privé, ouvert/fermé - Où est la différence ?

Les blockchains ont des règles concernant les personnes qui peuvent écrire des transactions sur leur réseau et celles qui peuvent faire fonctionner les nœuds de la chaîne et valider ces transactions. Les lignes directrices suivantes constituent un cadre de référence général pour comprendre les différences entre les différents types de blockchains.

Écriture sur la chaîne :

Publique = tout le monde peut écrire des transactions sur la chaîne et les voir une fois qu'elles ont été écrites.

Privée = seules les parties autorisées peuvent écrire des transactions sur la chaîne et les visualiser une fois qu'elles ont été écrites.

Exécution des nœuds et validation des transactions :

Ouverte = Tout le monde peut exécuter des nœuds et valider des transactions sur la chaîne. (Dans ce contexte, « ouvert » ne signifie pas « sources ouvertes ». De nombreuses blockchains privées sont basées sur un code source ouvert, mais sont privées, car l'utilisation du réseau est contrôlée).

Fermée = seules les parties autorisées peuvent exécuter les nœuds et valider les transactions sur la chaîne.

Les blockchains peuvent avoir l'une des combinaisons suivantes : publique/ouverte, publique/fermée, ou privée/fermée (bien que les chaînes de blocs privées/ouvertes soient possibles en théorie, dans la pratique, toutes les chaînes privées sont également soumises à autorisation).

Ce n'est pas parce qu'une transaction a eu lieu sur une blockchain publique et que tout le monde peut la voir, que tout le monde peut nécessairement en comprendre la signification. En effet, les blockchains publiques enregistrent généralement les transactions de manière anonyme (ou sous un pseudonyme) et hachent le contenu de la transaction afin qu'il ne soit pas lisible par autrui. Il s'agit d'une procédure nécessaire pour préserver la vie privée sur une plateforme publique (la critique qui veut que les blockchains publiques ne préservent pas la vie privée n'est donc pas fondée).

Afin de vérifier les transactions sur les blockchains publiques, un utilisateur humain s'appuie sur des normes techniques qui comportent une série d'étapes techniques de vérification. Celle-ci se fait généralement à l'aide d'une application, comme un navigateur web ou un portefeuille mobile. Les applications qui vérifient les transactions passées peuvent le faire de manière ouverte et gratuite, ou bien avoir recours à un péage informatique ou une autre barrière d'accès.

Par exemple, certaines sociétés qui utilisent des blockchains publiques pour sécuriser les transactions facturent la vérification des titres dans le cadre de leur modèle économique. Dans le cas des blockchains privées ou fermées, la vérification des titres peut également être verrouillée via un système de péage informatique ou un type de service d'authentification.

Certains membres de la communauté Bitcoin s'attendent à une hausse considérable et permanente de la valeur du bitcoin en raison d'un processus connu sous le nom d'« hyperbitcoinisation » - en fait, le contraire de l'hyperinflation (Krawisz, 2014[16] ; Kenobit, 2018[17]). Même si Nakamoto ne l'a jamais dit explicitement, la façon dont il a construit la politique monétaire du Bitcoin donne à penser qu'il s'attendait à ce que la valeur d'un bitcoin augmente tellement que la plupart des gens ne posséderaient jamais une unité entière. Pour cette raison, Nakamoto a subdivisé chaque bitcoin en 100 millions de satoshi. Grâce aux satoshi, il n'est pas nécessaire de posséder un seul bitcoin pour effectuer des transactions avec cette monnaie et l'utiliser comme réserve de valeur à long terme.

L'intention de Nakamoto de protéger la valeur du bitcoin des interventions d'une politique monétaire activiste montre clairement que le bitcoin est conçu comme une monnaie « apatride » Cela signifie qu'elle a été conçue pour lui éviter d'être un jour « détournée » par une autorité centralisée. La blockchain du Bitcoin étant ouverte et publique, n'importe qui peut exécuter des nœuds complets ou partiels du protocole et effectuer des transactions sur le réseau en utilisant la preuve de travail. Les transactions sur le réseau sont effectuées avec des pseudonymes et évoluent vers l'anonymat (Nuzzi, 2019[18]). L'ensemble du réseau est en code source ouvert, ce qui signifie que tout le monde peut y contribuer, et il est géré bénévolement par un groupe de développeurs et de cryptographes. Les personnes qui ne sont pas satisfaites de la façon dont le Bitcoin est géré peuvent également modifier le code pour créer des blockchains concurrentes, et le marché ouvert laisse les utilisateurs décider de la chaîne qu'ils veulent utiliser pour stocker leur valeur et effectuer des transactions financières. Jusqu'à présent, le bitcoin a de loin la plus grande capitalisation boursière de toutes les cryptomonnaies basées sur la blockchain. En avril 2021, la cryptomonnaie valait plus de 1 000 milliards de dollars, soit l'actif financier le plus rapide à atteindre cette étape dans l'histoire récente (Ali, 2021[19]). La deuxième cryptomonnaie la plus valorisée, l'éther (ETH), représente actuellement environ un tiers du réseau Bitcoin, soit l'équivalent de plus de 300 milliards USD (CoinMarketCap, s.d.[20]). Nous évoquerons ci-dessous Ethereum, le réseau blockchain sur lequel repose l'éther.

Il est compréhensible que ce niveau de décentralisation n'ait pas rendu le bitcoin populaire auprès de certains gouvernements (McWhinney, 2019[21]). Les banques - en particulier les banques centrales - ont été particulièrement réticentes à l'égard de la cryptomonnaie apatride (Steenis, 2017[22]), en partie parce qu'elle offre une réserve de valeur et un moyen d'échange alternatifs qui ne sont pas affectés par leurs interventions en matière de politique monétaire. En outre, de nombreuses entreprises et consortiums industriels sont réticents à l'idée d'utiliser des blockchains ouvertes et publiques, préférant des modèles privés ou publics fermés qui leur permettent d'exercer un plus grand contrôle sur qui peut utiliser le réseau et à quel titre. De plus, la décentralisation s'accompagne de compromis techniques : il est souvent plus facile de réaliser des gains d'efficacité à court terme en matière de vitesse du réseau et de traitement des transactions dans des réseaux contrôlés de manière plus centralisée. Cela s'explique par le fait que les réseaux qui ne donnent accès qu'à des utilisateurs dignes de confiance suppriment en partie le besoin d'une tolérance aux pannes : plus on fait confiance aux participants d'un réseau pour se comporter honnêtement, moins on a besoin d'un système tolérant aux pannes robuste, qui a tendance à ralentir le processus décisionnel d'un réseau.

En partie à cause de l'insatisfaction et du malaise suscités par le Bitcoin, mais aussi parce que ce protocole a suscité l'intérêt d'une génération de développeurs motivés par l'appât du gain (sur la base du seigneuriage de jetons en frappant leurs propres cryptomonnaies), d'autres cryptomonnaies et architectures de registres distribués sont rapidement apparues. Elles peuvent présenter certains aspects de la décentralisation du réseau Bitcoin, mais avec des caractéristiques davantage centralisées qui supposent une plus grande concentration d'acteurs de confiance. Certaines de ces cryptomonnaies assument ouvertement le fait d'être des systèmes totalement centralisés. Comme indiqué ci-dessus, nombre de ces blockchains centralisées n'ont pas de cryptomonnaie associée et servent plutôt d'infrastructure pour la fourniture de services, que leurs concepteurs peuvent facturer aux utilisateurs. Nous pouvons donc considérer la décentralisation comme un large spectre ; elle peut se manifester à un degré plus ou moins élevé dans différentes parties de l'architecture d'une blockchain.

Il est également important de noter que tout le monde ne considère pas la décentralisation de la même manière : le débat est animé à cet égard. Certaines décisions en matière d'architecture que certains considèrent comme décentralisées peuvent sembler très centralisées à d'autres. L'espace de la blockchain se caractérise, en effet, par des jugements de valeur et des prises de position idéologiques. Pour certains, la décentralisation est simplement et clairement positive, tandis que la centralisation est mauvaise. L'inverse est également vrai ; certains ont taxé les architectures décentralisées d'immorales ou de criminelles. Les discussions à cet égard restent passionnées. Dans cet article, nous ne portons pas de jugement de valeur sur la décentralisation ou la centralisation. Nous soulignons plutôt que les caractéristiques d'un système sont le reflet de sa raison d'être.

Ethereum, deuxième blockchain aujourd'hui en termes de capitalisation boursière (CoinMarketCap, s.d.[20]), est un exemple de blockchain calquée sur l'architecture hautement décentralisée du Bitcoin. À l'image de Bitcoin, Ethereum est une blockchain ouverte et publique. Tout le monde peut effectuer des transactions sur le réseau, exécuter des nœuds et contribuer au code source ouvert du réseau. En 2018, la US Securities and Exchange Commission (commission américaine des affaires boursières) a stipulé que le bitcoin et l'éther ne pouvaient pas

être considérés comme des valeurs mobilières, car aucun tiers n'exerce de « fonctions entrepreneuriales et de gestion » en ce qui concerne leur émission et leur valeur (Sharma, 2018[23] ; Pisani, 2018[24]).

Cependant, il existe deux différences majeures entre le Bitcoin et l'Ethereum qui ont contribué à une évolution distincte. La première est que, alors que le Bitcoin a été développé pour être la forme la plus sûre de monnaie numérique, Ethereum a été construit pour être une « machine virtuelle » distribuée - une infrastructure pour exécuter des applications décentralisées. L'éther, la cryptomonnaie associée à Ethereum, est appelée « gaz » parce que sa fonction première (mais pas unique) est d'alimenter des applications sur le réseau plutôt que de servir de réserve de valeur à long terme ou de moyen d'échange universel. En tant que plateforme informatique virtuelle, Ethereum permet l'inclusion de codes exécutables connus sous le nom de « contrats intelligents » dans les transactions de sa blockchain. Les contrats intelligents permettent aux organisations d'automatiser et de coordonner des actions à grande échelle. En utilisant la logique « si -> alors », les contrats intelligents exécutent certaines fonctions (généralement le paiement d'argent) lorsque les conditions définies dans le contrat sont remplies (CoinTelegraph, s.d.[25]). Cette caractéristique d'Ethereum a donné naissance à une catégorie d'applications appelées « applications décentralisées » ou DApps, dont les règlements et les procédures sont intégrés dans des contrats intelligents (Wikipedia, s.d.[26]) Même si les contrats intelligents peuvent également être exécutés sur Bitcoin, la fonctionnalité plus étendue et plus conviviale des contrats intelligents a permis à Ethereum d'être la blockchain la plus populaire en matière de DApps et la plus activement utilisée aujourd'hui (Leising et Kharif, 2020[27]).

Une autre différence majeure entre Bitcoin et Ethereum est que le fondateur du Bitcoin a choisi de rester anonyme et s'est retiré de toute participation visible à la gestion du réseau deux ans après son lancement (Bernard, 2018[28]). Bien que de nombreuses personnes aient prétendu être Satoshi Nakamoto dans les années qui ont suivi, aucune n'a pu le prouver de manière convaincante, et aucune n'a pu exercer une influence significative sur le développement technique du réseau. En revanche, le principal inventeur d'Ethereum, Vitalik Buterin, est bien connu et joue un rôle actif dans la gouvernance dudit réseau. Par exemple, Buterin a soutenu la décision de faire passer Ethereum d'un mécanisme de consensus de type « preuve de travail » à un mécanisme de type « preuve de participation » (PoS en anglais), un changement appelé Ethereum 2.0 (Foxley, 2020[29]).

Le rôle prépondérant de Buterin dans la gouvernance du réseau Ethereum s'est manifesté de manière visible après un incident en 2016, connu sous le nom de « piratage DAO ». Un pirate a exploité une faille dans un contrat intelligent Ethereum géré par une organisation autonome décentralisée (DAO) pour s'approprier 89 millions de dollars d'éther (Kar, 2016[34]). Buterin a dirigé un groupe qui a piraté le hacker et s'est réapproprié les fonds, mais une lettre anonyme provenant prétendument de l'attaquant a affirmé qu'ils les avaient pris légalement, car il ne faisait qu'effectuer des actions autorisées par le contrat intelligent (et « le code est la loi ») (Siegel, 2016[35]). Buterin, cependant, a redouté que le fait de se plier à la logique du pirate détruise la confiance des investisseurs dans Ethereum et dans toutes les futures DApps et DAOs construites dessus. Il a donc proposé un « embranchement divergent » du réseau, qui le ramènerait à une période antérieure à l'attaque et rendrait l'argent volé aux investisseurs dans les DAO.

La nature décentralisée du réseau Ethereum signifiait que la majorité des mineurs utilisant le protocole Ethereum devaient encore choisir d'adopter la proposition de Buterin, mais sa stature dans la communauté et le soutien dont il bénéficiait de la part des autres fondateurs d'Ethereum permettaient d'espérer qu'ils accepteraient sa proposition. Dans les faits, la plupart des développeurs d'Ethereum ont choisi d'exécuter le code embranché, faisant du nouvel Ethereum (ETH) la version la plus largement acceptée de la blockchain. Certains développeurs, cependant, ont refusé. Ils ont continué à exécuter la blockchain non embranchée, qui est maintenant connue sous le nom d'Ethereum Classic (ETC). En revanche, aucune des personnes prétendant être Satoshi Nakamoto n'a pu influencer l'évolution technique du bitcoin pendant la « guerre civile du bitcoin » de 2017 (Dinkins, 2017[36]). Au lieu de cela, la guerre civile a donné lieu à un certain nombre d'embranchements Bitcoin mineurs - Bitcoin Cash (BCH), Bitcoin Gold (BTG), Bitcoin Satoshi's Vision (BSV) - qui, à ce jour, restent des chaînes beaucoup plus petites, moins valorisées et utilisées, par rapport au Bitcoin original (BTC) (CoinMarketCap, s.d.[20]).

L'implication permanente de Buterin et des autres fondateurs d'Ethereum dans la gouvernance du réseau a permis d'ouvrir différentes possibilités pour le réseau - en particulier son adaptation au fonctionnement des entreprises et des gouvernements qui cherchent à rationaliser les applications et services commerciaux de base. Les contrats intelligents d'Ethereum permettent aux organisations d'exécuter des tâches qui nécessitent une coordination considérable entre des parties qui peuvent ne pas se faire confiance ou même ne pas se connaître : régler

des paiements, fournir des services de séquestre, verser des dividendes aux investisseurs, permettre un vote électronique sécurisé ou suivre des unités de stock dans une chaîne d'approvisionnement. La société ConsenSys, fondée par Joseph Lubin, cofondateur d'Ethereum, se concentre entièrement sur la fourniture de DApps pour les entreprises en utilisant Ethereum (ConsenSys, s.d.[37])

Encadré 11.2 Preuve de participation

Les partisans de la preuve de participation (*proof of stake* - PoS) affirment que le coût énergétique sans cesse croissant de la validation par preuve de travail (PoW en anglais) a rendu la gestion des nœuds de blockchain prohibitive pour les gens ordinaires, car elle a entraîné une centralisation du pouvoir de minage entre des groupes puissants appelés « coopératives de minage » (Muzzy, 2020[30]). Pour y remédier, la preuve de participation requiert du mineur (ou « faussaire », comme on l'appelle parfois pour le différencier des utilisateurs de la preuve de travail) qu'il mette en jeu sa propre cryptomonnaie pour valider une transaction plutôt que de dépenser de l'énergie pour résoudre des problèmes mathématiques complexes. La sanction d'une transaction malhonnête dans un système PoS se traduit par la confiscation à divers degrés de la cryptomonnaie. Dans le cas d'Ethereum, le passage à un système PoS se justifie également dans la mesure où il s'agit de la condition préalable pour sécuriser le développement de la capacité transactionnelle du réseau.

Cependant, le PoS a aussi ses détracteurs. Le cabinet d'études Messari a souligné que le PoS pouvait créer un système de gouvernance de blockchain selon les classes socio-économiques, dans lequel les participants les plus riches d'un réseau de blockchain ont davantage leur mot à dire sur ce qui est vrai ou validé sur le réseau (Watkins, 2020[31]). Ce risque est particulièrement aigu pour les blockchains qui mettent en œuvre la « gouvernance sur la chaîne » - une façon de placer le contrôle du développement technique d'un réseau entre les mains des détenteurs de jetons plutôt que des développeurs principaux, qui sont parfois perçus comme n'ayant pas de comptes à rendre aux utilisateurs du réseau (Messari.io., 2019[32]). En termes simples, il existe un risque que les riches détenteurs de jetons faussent les décisions relatives à la gouvernance des systèmes PoS afin de maximiser leur profit personnel.

Les détenteurs de jetons fortunés peuvent être les investisseurs initiaux d'un réseau qui reçoivent d'importantes allocations de cryptomonnaies en échange de leur soutien financier initial. Il peut également s'agir d'investisseurs qui achètent de grandes quantités de cryptomonnaies du réseau et les utilisent pour valider fréquemment des transactions, accumulant ainsi de plus en plus de récompenses pour la validation - une dynamique d'enrichissement qui finit par évincer les petits détenteurs de cryptomonnaies du réseau (Watkins, 2020[31]). D'autres détracteurs du PoS soutiennent que le développement de la capacité transactionnelle d'un réseau blockchain ne doit pas nécessairement se faire sur la chaîne. Par exemple, la nécessité de faire évoluer les systèmes PoW « lents » comme le Bitcoin a donné naissance à une industrie florissante d'applications de « couche 2 » qui permettent aux utilisateurs d'effectuer la plupart des transactions en dehors chaîne tout en utilisant la blockchain uniquement comme couche de règlement final (Coin Telegraph, s.d.[33]).

Il est important de noter ici qu'aucun réseau blockchain – Bitcoin, Ethereum ou autre - n'est apparu pour résoudre le problème de l'inégalité des richesses ou de leur redistribution Aujourd'hui, les propriétaires de chaque cryptomonnaie ne représentent qu'un très petit nombre de personnes par rapport à la population mondiale, ce qui fausse nécessairement la distribution de la richesse en cryptomonnaie. Les réseaux de blockchain sont certes des initiatives essentielles pour nous aider à réimaginer la gouvernance au XXIe siècle, mais leurs effets sociaux sont très ciblés et ne doivent pas être considérés comme des substituts à toutes les autres politiques et plateformes sociales.

Cependant, de nombreux acteurs institutionnels ne sont pas intéressés par l'utilisation d'une infrastructure numérique publique et ouverte pour mettre en œuvre des applications basées sur des contrats intelligents. *L'Enterprise Ethereum Alliance* (EEA) (s.d.[38]) a été créée afin de construire des versions d'Ethereum qui sont

publiques/fermées ou privées et qui ont des fonctionnalités spécialement conçues pour les cas d'utilisation spécifiques recherchés par les entreprises clientes (Sharma, 2019[39]). L'EEA compte désormais plus de 200 entreprises qui mettent en œuvre des versions centralisées d'Ethereum, financées et gérées par des entreprises ou des gouvernements. Un exemple marquant de mise en œuvre d'Ethereum est l'infrastructure européenne de services blockchain (EBSI), une blockchain publique et fermée qui est développée par la Commission européenne pour fournir des services publics transfrontaliers (CEF Digital, s.d.[40]). Dans le secteur privé, J.P. Morgan (membre de l'EEA) a été le fer de lance du développement de Quorum, une implantation fermée d'Ethereum mise au point spécifiquement pour le secteur financier (Quorum, s.d.[41])

En 2015, la Fondation Linux a annoncé le lancement du projet Hyperledger, une initiative d'un consortium de sociétés technologiques, financières et de chaînes d'approvisionnement visant à construire des blockchains privées qui amélioreraient l'évolutivité et la fiabilité des chaînes publiques existantes (Wikipedia, s.d.[42]). Le projet Hyperledger comprend maintenant plusieurs « boîtes à outils » de blockchain qui permettent aux organisations ou aux consortiums de créer des blockchains privées répondant à leurs besoins commerciaux spécifiques. Aucune de ces boîtes à outils ne crée de blockchain avec des cryptomonnaies, ce qui amène beaucoup de personnes à les appeler plutôt des registres distribués. Les boîtes à outils les plus connues aujourd'hui sont Hyperledger Fabric et Hyperledger Sawtooth. Hyperledger Besu est une initiative d'Enterprise Ethereum qui repose sur un code primaire, créée en 2019 (Castillo, 2019[43]). Dans le monde de la certification, les boîtes à outils Hyperledger ont été utilisées par des entreprises, notamment Salesforce, Workday et Greenlight, pour construire des réseaux de blockchain qu'elles gèrent (Lemoie et Souares, 2020[44]). Des entreprises telles qu'Amazon, IBM, Oracle et SAP utilisent également les boîtes à outils Hyperledger pour proposer des offres « Blockchain-as-a-Service » (BaaS) aux clients utilisant leurs infrastructures dans le cloud (Amazon, s.d.[45] ; IBM, s.d.[46] ; Oracle, s.d.[47] ; SAP, s.d.[48]). Certaines associations à but non lucratif utilisent également des boîtes à outils Hyperledger (entre autres) pour construire des infrastructures blockchain destinées à la fourniture de services publics et commerciaux. Parmi les exemples les plus connus, citons le consortium Alastria en Espagne (Alastria, s.d.[49]) et l'initiative LACChain du Laboratoire d'innovation de la Banque interaméricaine de développement (ConsenSys, 2020[50]).

La plateforme blockchain R3 Corda est un autre exemple de mise en œuvre de blockchain privée, adaptée aux entreprises. Fondée en 2014, R3 est une société privée qui a construit une blockchain pour gérer et synchroniser les accords financiers (Wikipedia, s.d.[51]). La plateforme Corda, développée en code source ouvert en 2016, a été mise au point pour se conformer aux exigences techniques et aux normes de l'industrie financière. Depuis lors, Corda a évolué pour répondre aux besoins de multiples secteurs (son principal concurrent est sans doute Hyperledger Fabric, qui a été développé quelques années plus tard) (Shin, 2020[52]). L'approche classique de Corda en matière de programmation informatique et de normes cryptographiques a récemment été récompensée par une étude de l'IEEE qui l'a considérée comme la seule plateforme blockchain compatible avec les normes NIST, et donc homologuée pour être utilisée par le gouvernement fédéral américain (Jessel, 2020[53]). De manière un peu ironique, la première mise en œuvre de la blockchain par le gouvernement fédéral américain est en fait une plateforme de passation de marchés pour le département de la santé et des services sociaux, construite sur Hyperledger Fabric (Malone, 2020[54]).

Enfin, un grand nombre de cryptomonnaies arrimées à la valeur des monnaies fiduciaires nationales - appelées « cryptomonnaies stables » - ont vu le jour pour faciliter les échanges de monnaie fiduciaire en cryptomonnaies et vice versa. Ces cryptomonnaies stables sont généralement « gérées et entièrement contrôlées par les sociétés privées qui les émettent et reçoivent des dépôts bancaires traditionnels en échange de l'émission de leurs monnaies respectives à destination de leurs clients » (Dagger, 2020[55]). Cependant, des cryptomonnaies stables décentralisées voient également le jour, en grande partie pour contourner des dispositions légales lourdes et contradictoires qui visent l'utilisation de cryptomonnaies stables centralisées (Fitzpatrick, 2020[56]). Toutefois, à mesure que les banques centrales des États commencent à émettre des monnaies fiduciaires numériques, la transition vers des cryptomonnaies stables centralisées gérées par les gouvernements est susceptible de s'accélérer.

Coûts et limites

Les blockchains, c'est du sérieux. Elles sont apparues pour résoudre le problème des généraux byzantins : comment créer un consensus entre un grand nombre d'acteurs antagonistes auxquels on ne peut faire confiance ? La réponse apportée - un réseau décentralisé de nœuds validant les transactions selon un mécanisme de

consensus partagé - ne fonctionne que si le réseau est déployé à grande échelle. Si une blockchain compte trop peu de validateurs, il est facile pour des acteurs malveillants de l'attaquer en acquérant une puissance de réseau suffisante pour annuler le consensus en leur faveur ou au détriment de quelqu'un d'autre. C'est ce qu'on appelle une attaque à 51 %. À l'inverse, si un petit réseau n'est constitué que d'acteurs de confiance, il n'a pas vraiment besoin d'être tolérant aux pannes, de sorte qu'il est généralement beaucoup moins coûteux et plus efficace dans ce cas-là d'utiliser des bases de données et des applications traditionnelles.

La création, le déploiement et l'exploitation d'un réseau de blockchains sont une entreprise colossale. Les blockchains publiques financent leurs opérations en proposant aux parties impliquées des incitations financières (liées à leurs cryptomonnaies initiales) : la récompense pour le minage du bitcoin et de l'éther en validant les transactions sur ces réseaux (et donc en les maintenant en fonctionnement et en sécurité) est en fait la cryptomonnaie bitcoin ou éther elle-même. En outre, des frais de transaction sont évalués et payés aux validateurs de blocs dans la cryptomonnaie du réseau.

Satoshi Nakamoto a conçu le protocole Bitcoin avec une réserve limitée de bitcoins (21 millions) et l'hypothèse d'une hyperbitcoinisation : si le réseau connaissait le succès, la valeur du bitcoin monterait en flèche et une grande partie de l'économie mondiale finirait par fonctionner sur la base de transactions en bitcoins. Cela signifie que, à mesure que les revenus tirés du minage diminuent et que l'utilisation du réseau augmente, le coût de fonctionnement et de maintenance du bitcoin pourrait être subventionné par les seuls frais de transaction (comme c'est le cas aujourd'hui pour des systèmes tels que VISA ou Master Card).

Les fondateurs d'Ethereum, en revanche, n'ont pas plafonné la quantité absolue d'éthers. Les éthers sont attribués pour chaque bloc miné, avec un montant qui a diminué au fil du temps (EthHub, s.d.[57] ; ConsenSys, 2019[58]) et un plafond annuel de 18 millions de nouveaux éthers (Sharma, 2019[59]). Vitalik Buterin a fait le pari que le nombre d'éthers en circulation n'atteindrait pas 100 millions avant au moins un siècle (Buterin, 2016[60]), mais en raison de la popularité du réseau, le seuil a été atteint en 2018 (Varshney, 2018[61]). En conséquence, Buterin a proposé de plafonner le nombre total d'éthers à 120 millions pour éviter l'inflation (ou 144 millions si le plafond de 120 millions est dépassé), mais cette proposition n'a pas encore été acceptée (Varshney, 2018[61]). Comme pour le Bitcoin, les utilisateurs d'Ethereum paient également des frais de transaction, mais surtout, les contrats intelligents ont besoin d'éther (ou de gaz) pour fonctionner. En d'autres termes, Ethereum a misé sur sa future domination non pas pour devenir la monnaie de réserve du monde, comme le Bitcoin, mais pour devenir l'ordinateur du monde. La combinaison de frais de transaction et de gaz pourrait financer le réseau Ethereum en cas de disparition des paiements liés au minage.

Les blockchains fermées et privées, en revanche, n'ont généralement pas de cryptomonnaies associées. Cela signifie qu'elles doivent être financées à grands frais, avec des montants qui s'élèvent facilement à des centaines de milliers, voire des millions de dollars chaque année. Dans certains cas, comme la gestion d'une chaîne d'approvisionnement pour tout un secteur industriel, un tel coût peut se justifier et être réparti entre les organisations membres pour générer un retour sur investissement. Toutefois, dans les cas où une seule organisation cherche à rationaliser ses processus internes, le coût est généralement bien supérieur à la valeur ajoutée. L'utilisation de blockchains là où une base de données privée fait l'affaire devient alors une expérience coûteuse, trop élaborée qui risque de se solder par un échec.

L'échelle nécessaire pour rentabiliser l'exploitation des blockchains commence à faire pencher la balance de nouveau vers les blockchains publiques. Après tout, les blockchains ne fournissent de la valeur que grâce aux effets de réseau, mais chaque blockchain privée est, de par sa nature conceptuelle, son propre réseau fermé. Si chaque entreprise développe sa propre blockchain privée, le monde risque de se retrouver avec un océan de réseaux privés construits sur des normes différentes qui ne sont pas interopérables. Le problème des silos de données se répète une fois de plus - cette fois, après des dépenses considérables en R-D.

Ernst & Young a été l'acteur le plus critique du secteur, affirmant que l'ère des blockchains privées est effectivement terminée. Paul Brody, responsable mondial de la blockchain chez EY, explique :

> *« Ce qui s'est généralement passé jusqu'à présent, c'est que pour chaque entreprise désireuse de rejoindre un consortium ou un réseau, il y en a deux qui ont créé le leur. L'effet « réseau » est donc potentiellement limité à l'avenir. Les blockchains, comme la plupart des technologies de réseau, sont des monopoles naturels. Plus elles ont d'utilisateurs, plus elles deviennent utiles, et une fois qu'elles ont atteint une position dominante, [les blockchains privées] ont tendance à commencer à réclamer des « redevances » à leurs membres. Après avoir observé ce modèle dans plusieurs applications grand public,*

nous pensons, chez EY, que la plupart des entreprises préféreront s'en tenir à leurs outils existants plutôt que de se retrouver dans une situation de monopole où des acteurs de blockchains privées sont tout puissants dans l'espace B2B. Les blockchains publiques comme Ethereum constituent un meilleur choix pour les entreprises. Même si elles parviennent à une domination de type monopolistique, il n'y a pas d'entité de contrôle pour en tirer des bénéfices excessifs - il n'y a qu'un écosystème de fournisseurs de services qui entrent en concurrence » (Brody, 2019[62]).

Brody compare les blockchains publiques à Internet, une infrastructure partagée qui n'est pas contrôlée par une seule entreprise, mais qui est source de valeur pour toutes les entreprises. La comparaison est tout à fait pertinente. Aux premiers jours d'Internet, de nombreuses entreprises et gouvernements ont insisté pour disposer de leurs propres « intranets » - des réseaux privés auxquels on ne pouvait accéder qu'en interne. Avec le temps, cependant, seuls les intranets les plus sensibles ont été conservés, tandis que la plupart des processus commerciaux numériques ont été transférés sur le World Wide Web. Une tendance similaire se dessine aujourd'hui dans le monde de la blockchain, avec de nombreuses entreprises qui mettent l'accent sur les blockchains privées en pensant qu'elles sont plus sûres et plus efficaces, pour se rendre compte après des investissements considérables qu'elles ont réduit la valeur du réseau en limitant son accès.

L'affirmation de Brody selon laquelle les blockchains publiques ont considérablement évolué en matière de protection de la vie privée gagnerait à être replacée dans son contexte. Dès le début, les blockchains publiques ont limité le type de données pouvant être placées sur la chaîne. Il s'agissait de clés publiques, de hachages et, dans certains cas, de contrats intelligents. Cependant, il est possible pour les pirates de « piéger » les contrats intelligents publics - comme cela s'est produit lors du piratage de la DAO en 2016 - en exploitant des vulnérabilités. De la même manière, les clés publiques liées à des identifiants connus peuvent être utilisées pour effectuer une « analyse de réseau », en suivant les transactions d'un utilisateur sur une blockchain (Chainalysis, s.d.[63]). Cette capacité est utilisée par les forces de l'ordre pour suivre l'activité financière criminelle sur les blockchains (Weinstein, 2015[64]). Bien que les hachages soient pratiquement impossibles à reconstruire pour révéler des données de transaction, on se demande actuellement s'ils pourraient ou non constituer des informations permettant d'identifier des individus en cas d'utilisation malveillante (Mearian, 2018[65] ; Longstaff, 2018[66]).

Les preuves sans transmission d'informations (ZKP = zero-knowledge proofs) répondent à ces préoccupations en dissimulant toutes les données de transaction sur les blockchains publiques. Bien que ce système soit attrayant pour de nombreux utilisateurs de blockchains, certains gouvernements et organismes de contrôle judiciaire s'inquiètent de son utilisation en raison des limites que cela imposerait à leur capacité à enquêter sur les crimes financiers. Jusqu'à récemment, Zcash et Sovrin (un code de base également cédé à la Fondation Linux sous le nom d'Hyperledger Indy) ont été les principales blockchains publiques employant des preuves sans transmission d'information (Sharma, 2019[67] ; The Sovrin Foundation, 2018[68]). L'activation de cette fonctionnalité pour Bitcoin et Ethereum pourrait être particulièrement précieuse en raison de l'importance de ces réseaux Aujourd'hui, cependant, il existe une variété d'approches de limitation des données (restriction du type et de la quantité de données pouvant être vérifiées) utilisant les réseaux blockchain en plus des preuves sans transmission d'information.

Y a-t-il une place pour les blockchains privées à l'avenir ? Sans aucun doute, comme il y a un rôle pour certains intranets. Mais l'objectif de la technologie blockchain - faciliter les transactions, les accords et l'échange de données entre des acteurs non fiables à une très grande échelle - ne peut se réaliser à long terme que par l'interopérabilité. Cela ne signifie pas nécessairement qu'il n'y aura qu'une seule blockchain pour les gérer toutes, mais plutôt que les architectures blockchain qui facilitent l'échange et la validation des données à la plus grande échelle seront probablement les plus suivies et adoptées.

Normes ouvertes

Les blockchains ne garantissent pas à elles seules la portabilité des données ou l'interopérabilité des systèmes. Comme indiqué dans Encadré 11.1, les données ancrées dans une blockchain ne sont utiles que si elles peuvent être comprises et vérifiées de manière fiable. Étant donné que les blockchains publiques ne codent pas de données en clair dans la chaîne, et que les blockchains fermées et privées ont des normes très variables quant à ce qui est et n'est pas stocké dans la chaîne, la validation de l'identité, des transactions financières, des accords et de bien d'autres choses nécessite un moyen normalisé de partager, de vérifier et de lire les données ancrées dans la blockchain.

C'est là que les normes ouvertes entrent en jeu. Il ne s'agit pas d'applications, mais de moyens normalisés de formater, d'écrire, de partager, de récupérer et de vérifier des données. L'avènement de la technologie blockchain a suscité une innovation considérable en matière de normes ouvertes, car les entreprises, les gouvernements et les contributeurs individuels ont pris conscience de la nécessité d'une méthode commune pour vérifier l'authenticité/véracité des données. Les méthodes partagées réduisent la dépendance à l'égard des fournisseurs, ce qui permet aux organisations et aux particuliers d'éviter le type d'enfermement propriétaire qui résulte des méthodes de gestion des données dépendantes des plateformes.

L'organisation la plus importante qui développe aujourd'hui des normes ouvertes pour les données liées à la blockchain est sans doute le World Wide Web Consortium (W3C). Le W3C a été créé aux premiers jours d'Internet (1994) par Tim Berners-Lee, le MIT, le CERN, la DARPA et la Commission européenne pour codifier les normes ouvertes utilisées dans le but d'échanger des informations via l'infrastructure numérique mondiale du web (W3C, s.d.[69]). Le W3C est le principal organisme indépendant de normalisation de l'Internet dans le monde, qui s'appuie sur les contributions volontaires de nombreuses personnes et organisations.

Parmi les premières normes que le W3C développe pour les données ancrées dans la blockchain figurent les normes de vérification : comment vérifier la validité des informations fournies par une partie à une autre. Les plus importantes de ces normes sont les justificatifs vérifiables (Verifiable Credentials - VC -) (W3C, s.d.[70]) et les identifiants décentralisés (W3C, s.d.[71]). La norme ouverte des informations d'identification/justificatifs vérifiables est devenue une recommandation officielle du W3C en 2019. Elle est conçue pour fonctionner en tandem avec une nouvelle norme pour les identifiants numériques ancrés dans la blockchain, connue sous le nom d'identifiants décentralisés (DID), qui a été soumise pour recommandation en avril 2021.

La norme DID du W3C a pour objectif d'ajouter des fonctionnalités de confidentialité et de flexibilité à la cryptographie à clé publique qui est actuellement utilisée pour identifier les personnes et les organisations qui utilisent la technologie blockchain. Ensemble, les justificatifs vérifiables et les DID permettent l'évolution d'un écosystème indépendant de la blockchain, protégeant la vie privée et riche en fonctionnalités pour des justificatifs numériques sécurisés et inviolables. Pour ces raisons, le ministère américain de la Sécurité intérieure a accordé des subventions aux entreprises travaillant dans ce domaine pour accélérer le développement de ces nouvelles normes (US Department of Homeland Security, 2019[72] ; US Department of Homeland Security, 2017[73] ; US Department of Homeland Security, 2019[74]). Les gouvernements adoptent aussi les VC et les DIDs, notamment le Canada (VON, s.d.[75] ; Benay, 2019[76]), Singapour (OpenCerts, s.d.[77]), la Corée (Insights, 2020[78]), et la Commission européenne (Du Seuil et Pastor, 2019[79] ; EU Blockchain Observatory and Forum, 2019[80]).

Il est important de noter que les normes VC et DID sont neutres par rapport à la forme ou au contenu d'un document numérique. Elles fonctionnent de la même manière que les documents soient éducatifs, financiers, professionnels ou confidentiels. D'autres organismes de normalisation ont été créés pour répondre au besoin de normalisation du contenu et de la forme des enregistrements au sein de différents secteurs. Dans la mesure où ce chapitre se concentre sur les applications de la blockchain au secteur de l'éducation, nous nous concentrerons ici sur ces mises en œuvre spécifiques. Au W3C, cela inclut le groupe de travail Verifiable Credentials for Education (W3C, s.d.[81]) et le groupe communautaire Educational and Occupational Credentials in Schema.org (W3C, s.d.[82]). Parmi les autres normes de description des titres de compétence, citons le Common Microcredential Framework (CMF) lancé par le Consortium européen des MOOC (Konings, 2019[83]), le Credential Transparency Description Language développé par le Credential Engine (Credential Engine, s.d.[84]) et la Badge Alliance (Alliance, s.d.[85]), ainsi que les normes Comprehensive Learner Record (CLR) sous la responsabilité d'IMS Global (IMS Global, s.d.[86]). Le W3C travaille en étroite collaboration avec certaines de ces institutions - comme le Credential Engine et IMS Global - pour renforcer leurs efforts et mettre au point des définitions de dossiers interopérables au niveau mondial.

Le W3C n'est cependant pas la seule organisation à travailler sur l'interopérabilité des normes de vérification décentralisées. La vérification de titres de compétences n'est qu'une application des informations vérifiables dans le cadre plus large de l'identité numérique. Parmi les autres groupes travaillant sur la prochaine génération d'infrastructure d'identité basée sur le Web, citons Rebooting Web of Trust (RWoT) (Web of Trust, s.d.[87]), l'Internet Identity Workshop (IIW) (Internet Identity Workshop, s.d.[88]), le T3 Innovation Network de la Fondation de la Chambre de commerce des États-Unis (US Chamber of Commerce Foundation, s.d.[89]), le Digital Credentials Consortium (MIT Open Learning, 2020[90]), la Trust Over IP Foundation (hébergée par la Linux Foundation) (Trust Over IP

Foundation, s.d.[91]) (The Linux Foundation, 2020[92]) et la Decentralised Identity Foundation (DIF) (Decentralized Identity Foundation, s.d.[93]). Plus récemment, le Learning Technology Standards Committee (LTSC) de l'IEEE (IEEE, s.d.[94]) et la Learning Economy Foundation (Learning Economy Foundation, s.d.[95]) ont présenté un « Internet de l'éducation (IoE) » (Internet of Education, s.d.[96]) pour unifier ces consortiums et d'autres qui travaillent sur des normes techniques pour l'éducation et la vérification des titres et diplômes (Education, s.d.[97]).

Il existe un recoupement important entre les participants de ces groupes, bien que leurs membres cibles soient différents. La Trust Over IP Foundation et le DIF sont principalement des organisations d'entreprises ; le T3 Innovation Network est une organisation publique-privée ; la Learning Economy Foundation attire des membres ayant une expérience dans le domaine de la technologie et de la politique de l'éducation ; le Digital Credentials Consortium est une organisation universitaire ; et le RWoT et le IIW attirent des technologues bénévoles passionnés par la confidentialité et l'autonomie de l'Internet, quelle que soit leur école de pensée. Le W3C fonctionne comme une sorte de nœud visant à établir un consensus technique entre ces groupes et d'autres.

Identité autosouveraine

Les efforts visant à construire une architecture normalisée pour une identité décentralisée sur le web se recoupent fortement avec le mouvement de l'identité autosouveraine (SSI en anglais). Le concept d'« auto-souveraineté » fait encore débat, d'aucuns se demandent même si elle est souhaitable, mais ses partisans sont généralement motivés par leur volonté de donner aux utilisateurs individuels des technologies numériques un plus grand contrôle sur leurs données personnelles (Smolenski, 2016[98]). Cela signifie, entre autres choses, de libérer les utilisateurs de leur dépendance vis-à-vis des plateformes et des gouvernements en matière de gestion de données. En effet, la portabilité des données et l'indépendance vis-à-vis des plateformes peuvent être les deux caractéristiques les plus déterminantes de l'identité numérique autosouveraine, certains affirmant que ces caractéristiques sont plus parlantes en pratique que le terme « auto-souverain » (Renieris, 2020[99]).

On peut soutenir que la formulation la plus connue des principes de l'identité autosouveraine a été faite par l'informaticien Christopher Allen dans un billet de blog de 2016 largement diffusé (Allen, 2016[100]). Depuis lors, il y a eu beaucoup d'échanges sur la signification de chacun de ces principes et sur les déploiements technologiques qui y répondent le mieux. Les adeptes de diverses philosophies SSI ou proches de la SSI participent activement à l'élaboration de normes concernant l'identité numérique par le biais des organismes de normalisation susmentionnés, et leurs points de vue sont souvent très différents. En outre, l'élaboration des normes SSI doit tenir compte des réglementations juridiques en vigueur par rapport à l'utilisation de la cryptographie et de la protection des données. Cette situation se traduit par une augmentation d'implantations techniques qui concernent la définition des normes plutôt que leur consolidation au sens large. Néanmoins, on progresse vers des normes interopérables, centrées sur l'utilisateur, qui concernent les justificatifs vérifiables et l'identité numérique (T3 Innovation Network, 2020[101]).

Avantages de la blockchain pour la vérification des titres et diplômes

Les blockchains sont nées en proposant une infrastructure permettant de vérifier les transactions sur un réseau antagoniste, c'est-à-dire un réseau dont les parties ne se font pas confiance. Bien que la fonctionnalité de la blockchain puisse être étendue à l'exécution de processus commerciaux automatisés par le biais de contrats intelligents, sa valeur première reste de servir de source de vérité unique et partagée. La double fonctionnalité de vérification et de contrat intelligent de la blockchain a le potentiel d'automatiser les processus opérationnels liés à l'éducation, tels que le transfert de titres et diplômes, le transfert de dossiers universitaires, l'établissement d'équivalences de titres, et même le fonctionnement administratif des universités.

Les blockchains ne sont toutefois pas une condition préalable à l'automatisation des processus opérationnels. De nombreuses applications logicielles existantes le font, et celles qui utilisent des flux de travail, l'automatisation intelligente des processus et l'automatisation robotique des processus ont considérablement amélioré une grande partie de cette fonctionnalité. Quand l'utilisation de blockchains est-elle donc essentielle pour atteindre les objectifs d'automatisation ? Cela peut être le cas si ladite automatisation doit se produire dans un réseau d'acteurs antagonistes et non coordonnés. Si c'est le cas, la question qui se pose est de savoir si on peut obtenir des effets de réseau suffisants pour rentabiliser le coût élevé de la construction et de la maintenance d'un réseau de blockchains.

Prenons un exemple concret souvent utilisé pour illustrer les avantages de la blockchain dans l'éducation : l'automatisation de l'établissement des équivalences de crédits lorsque les étudiants passent d'un établissement scolaire à un autre. Si certains affirment que les blockchains résoudront ce problème (et certains fournisseurs ont construit des réseaux de blockchains spécifiquement en ce sens), les systèmes de suivi des candidats et les bases de données existantes pourraient également déterminer automatiquement les équivalences de crédits en utilisant des définitions largement acceptées de ce que signifient les crédits et des normes largement acceptées pour le transfert de données éducatives. En d'autres termes, le principal obstacle aux transferts de crédits automatisés n'est pas, à ce jour, d'ordre technologique, mais social : chaque entité juridique (jusqu'à l'université ou l'établissement scolaire) a souvent ses propres définitions de crédits et peut être réticente à les rendre transférables en utilisant des définitions établies ailleurs. Cet exemple illustre le fait que, parfois, la « blockchain » peut être présentée comme une solution à des problèmes qui, en réalité, nécessitent des formes de consensus social en dehors de la chaîne. Dans certaines régions, cela peut être plus facile au niveau de l'enseignement supérieur, car des définitions et des normes communes pour les crédits ont été établies et approuvées. C'est, par exemple, le cas dans l'Union européenne, avec le système européen de transfert de crédits.

Peut-être que la blockchain pourrait être la pièce manquante qui permet à une application de coordonner une action entre plusieurs parties qui, autrement, auraient besoin d'un tiers fiable pour agir en tant que médiateur. Nous évoquons ci-dessous l'exemple très concret d'un prestataire d'offres éducatives qui a adopté l'approche de la blockchain. Cet exemple illustre l'argument avancé ci-dessus : la blockchain ne fournit peut-être pas encore un niveau de valeur d'automatisation qui justifie son utilisation. L'Université Woolf, initialement présentée comme une « université blockchain » dans les médias mondiaux (Young, 2018[102] ; Vander Ark, 2018[103]), a été initialement construite sur une plateforme de registre distribué (Parisi, 2018[104]). Comme l'explique Joshua Broggi, fondateur de Woolf, « nous utilisons une blockchain pour créer des gains d'efficacité en gérant les frais de scolarité des étudiants, en appliquant les normes réglementaires en matière de certification et en automatisant un certain nombre de processus » (Vander Ark, 2018[103]). L'Université Woolf a expérimenté différents modèles de blockchain au cours de ses premières années d'activité, mais s'est ensuite éloignée de la technologie blockchain. Au lieu de cela, Woolf présente désormais son offre comme une plateforme de type logiciel en tant que service (software as a service - SaaS -) hébergée dans le cloud destinée aux organisations et étudiants, offrant une mission sociale d'accès à une éducation de qualité de n'importe quel endroit dans le monde. L'Université Woolf se présente désormais comme « l'université sans frontières » et est effectivement fréquentée par des professeurs et des étudiants du monde entier (Woolf University, s.d.[105]). Des applications web ont permis de rationaliser le fonctionnement administratif de l'université sans blockchain.

En revanche, d'autres entreprises qui mettent au point des plateformes éducatives basées sur la blockchain revendiquent leur utilisation de la blockchain. Il s'agit notamment d'ODEM (Maaghul, 2019[106]) et de BitDegree (BitDegree, 2017[107]), qui utilisent toutes deux la blockchain publique Ethereum et disposent de leurs propres jetons ERC20. Aux États-Unis, la Learning Economy Foundation (Learning Economy Foundation, s.d.[95]) a présenté une vision d'un « écosystème » basé sur la blockchain qui unit les autorités de délivrance des titres, les étudiants, les employeurs et les entreprises de technologie de l'éducation dans un marché partagé où les résultats éducatifs sont valorisés par la monétisation (« récompenses »). Les cofondateurs de la Learning Economy Foundation, Chris Purifoy et Jacksón Smith, décrivent leur vision comme suit dans un article du *G20 Summit Magazine* : « En quantifiant la véritable valeur de l'éducation, il est possible de construire toute une économie autour d'elle afin de payer les étudiants pour qu'ils apprennent, les professionnels de l'éducation pour qu'ils créent des cours sérieux et les gestionnaires pour qu'ils aident la Learning Economy à se développer. La blockchain fournit un moyen décentralisé à tous ceux qui ajoutent de la valeur à l'éducation mondiale pour qu'ils se coordonnent autour du patrimoine commun sans les frictions propres aux partenariats isolés. » (Purifoy et Smith, 2018[108]).

Les fondateurs de la Learning Economy prévoient que la construction de leur plateforme blockchain créera une « ruée vers l'apprentissage » (le titre de leur plan de mise en œuvre) (Learning Economy Foundation, s.d.[109]) où tout le monde sera incité à enseigner, apprendre et recruter grâce à des récompenses financières administrées par le réseau.

Le modèle de la Learning Economy a repoussé les perspectives de la blockchain encore plus loin, en supposant que les réseaux blockchain seront capables non seulement de coordonner l'action sociale, mais aussi de le faire d'une manière qui créera des récompenses financières suffisamment motivantes qui seront automatiquement administrées à toutes les parties prenantes d'un marché, réalisant ainsi l'objectif vaguement défini d'« améliorer

les résultats d'apprentissage » de manière ascendante. Cette vision semble noble et louable certes, mais elle frise l'utopie et est en décalage avec les capacités réelles de tout réseau blockchain. À long terme, ce sont les projets de vérification de titres basés sur des normes dans lesquels la Learning Economy est engagée qui connaîtront probablement le plus de succès (voir « déploiement dans le monde réel », ci-dessous).

À court terme, par conséquent, la valeur principale de la blockchain en éducation est probablement plus fondamentale : elle rend la vérification des titres de compétences plus rapide, moins chère et plus sûre. Lorsqu'elles sont utilisées en combinaison avec des normes ouvertes, les blockchains suppriment les dépendances actuelles vis-à-vis des institutions qui délivrent les titres, des fournisseurs de logiciels et des tiers pour vérifier les documents officiels. En outre, les blockchains permettent aux émetteurs et aux destinataires d'être directement propriétaires des justificatifs numériques.

On ne soulignera jamais assez que l'utilisation de *normes technologiques ouvertes* pour l'émission, le stockage, le partage et la vérification des justificatifs numériques est la condition préalable à la concrétisation de ces avantages de la technologie blockchain (Jagers, 2018[110]). Comme tout autre type de logiciel, une blockchain peut fonctionner en vase clos s'il n'existe aucun moyen de rendre les données qu'elle référence communicables à autrui. Il est donc logique que le développement de normes ouvertes partagées pour les justificatifs vérifiables soit l'un des domaines de la technologie blockchain qui évolue le plus rapidement.

Les normes W3C, qui concernent les justificatifs vérifiables et les identifiants décentralisés décrits dans la section précédente, enregistrent aujourd'hui certaines de leurs premières applications dans le secteur de l'éducation. Le travail de vérification des titres de compétences numériques effectué depuis des années par les établissements d'enseignement, les organisations à but non lucratif et les entreprises de technologie éducative a jeté les bases de la formulation des normes du W3C. Le MIT et la société Learning Machine ont développé une première version des titres de compétences vérifiables, Blockcerts (Blockcerts, s.d.[111]), spécifiquement pour les certificats d'études tels que les diplômes et les relevés de notes. Blockcerts est, lui, issu de la norme Open Badges pour les justificatifs numériques portables, qui a été lancée par la Fondation Mozilla en 2011 et est passée sous la tutelle d'IMS Global en 2017 (Wikipedia, s.d.[112]).

Blockcerts a apporté des améliorations notables à Open Badges en matière de sécurité et de portabilité, ce qui a permis son utilisation pour un plus large éventail de cas de certification à enjeu élevé, comme les diplômes et les relevés de notes (Federation of State Medical Boards, 2019[113]). Les bibliothèques de référence Blockcerts ont été publiées en 2016 sous une licence MIT de logiciel libre et en code source ouvert (Learning Machine Newsroom, 2016[114]). En 2017, Learning Machine a été la première entreprise à lancer une plateforme commerciale d'émission de Blockcerts, qu'elle a vendue à des établissements d'enseignement pour la délivrance de diplômes numériques et d'autres certificats éducatifs (Hyland Credentials, s.d.[115]). D'autres entreprises lui ont rapidement emboîté le pas, et certains établissements ont également développé leurs propres plateformes d'émission Blockcerts (McMaster University Office of the Registrar, s.d.[116] ; Universidad Carlos III de Madrid, 2018[117]). Dans un projet connexe, le gouvernement de Singapour a embranché le code de base de Blockcerts pour créer ses propres normes ouvertes pour les justificatifs numériques, OpenCerts (OpenCerts, s.d.[118]). En 2020, Learning Machine a été racheté par la société de services de contenu Hyland et rebaptisé Hyland Credentials.

Alors que la spécification W3C des justificatifs vérifiables est bien rodée, les dépositaires de Blockcerts et d'Open Badges (ainsi que d'OpenCerts) se sont engagés à mettre à jour les normes pour qu'elles soient conformes à cette spécification. C'est possible, car la spécification VC est suffisamment souple pour s'adapter à de nombreux types de justificatifs différents. La standardisation de l'utilisation des VC dans le secteur de l'éducation permettra d'améliorer considérablement l'échange de justificatifs et l'interopérabilité entre les plateformes logicielles (T3 Innovation Network, 2020[101]). En outre, le travail effectué pour normaliser les définitions des titres et certificats éducatifs facilitera considérablement le traitement et l'échange des dossiers scolaires entre les établissements et au-delà des frontières.

Les avantages de l'utilisation de la technologie blockchain en combinaison avec ces normes ouvertes émergentes pour les diplômes sont notamment les suivants : éliminer la fraude aux dossiers ; rationaliser et réduire le coût du partage et de la vérification des dossiers, et rendre aux individus le contrôle sur leurs données personnelles tout en réduisant le risque pour les établissements.

Éliminer la fraude aux diplômes

Situation actuelle

La fraude aux dossiers universitaires est omniprésente. Des études estiment que plus de 100 000 diplômes sont simplement achetés chaque année aux États-Unis (Accredited Online Colleges, s.d.[119]) ; ce chiffre concernerait plus de la moitié de tous les doctorats (Ezell et Bear, 2012[120]). En outre, la validation de l'authenticité d'un dossier est un processus distinct de la validation de l'authenticité d'un établissement : on peut acheter un « vrai » diplôme auprès d'un faux établissement, et également de faux diplômes qui semblent provenir de vrais établissements. En 2012, on comptait plus de 3 300 universités non reconnues dans le monde, dont beaucoup n'étaient que des usines à diplômes (Ezell et Bear, 2012[120]) ; aujourd'hui, ce nombre est probablement beaucoup plus élevé. En outre, des étudiants cherchant à augmenter leurs chances d'être admis dans certains emplois ou programmes d'études peuvent modifier des dossiers universitaires dans de véritables établissements. Ce problème est si aigu dans certaines régions que certains établissements secondaires ont tout simplement cessé de délivrer des relevés de notes (Smolenski, 2018[121]).

Les licences professionnelles sont tout autant falsifiées que les dossiers universitaires. Rien qu'aux États-Unis, une étude de l'Université d'État de l'Ohio a estimé que jusqu'à 2 millions de praticiens dans les soins de santé exerceraient avec des diplômes falsifiés ou des licences frauduleuses (Gibson, 2017[122]). Des reportages font régulièrement surface dans des pays du monde entier sur des praticiens exerçant sans licence ou avec des licences falsifiées (Gibson, 2017[122]) (CNN, 2020[123]). Pour les raisons susmentionnées, un écosystème d'organisations de vérification des titres a vu le jour pour valider l'authenticité des établissements et des dossiers ; toutefois, leur efficacité reste limitée.

Le problème de la fraude aux dossiers universitaires et des établissements d'enseignement supérieur non accrédités délivrant des diplômes sans valeur a limité les avantages de l'internationalisation de l'enseignement supérieur (OECD, 2004[124]). En 2005, l'UNESCO et l'OCDE ont publié des « Lignes directrices pour des prestations de qualité dans l'enseignement supérieur transfrontalier », qui ont été suivies par la mise en place d'une base de données des établissements accrédités qui est maintenue par l'UNESCO (OECD, 2005[125]). Il est, toutefois, difficile d'exploiter cette base de données et de la mettre à jour.

Blockchain et normes ouvertes

La blockchain fournit une infrastructure de vérification décentralisée et transnationale permettant d'éviter la fraude, de faciliter la mobilité internationale des étudiants et de protéger le public contre les praticiens possédant de faux titres partout dans le monde. Les technologies blockchain, utilisées en combinaison avec des normes ouvertes de premier plan comme Blockcerts et Verifiable Credentials, font appel à une cryptographie avancée en association avec des signatures numériques pour valider à la fois la provenance d'un titre (l'institution qui l'a délivré) et le destinataire officiel (à qui il a été délivré). Les signatures numériques et les données hachées, combinées à un registre immuable de la blockchain, garantissent qu'un justificatif n'a pas été falsifié. La vérification décentralisée permet à n'importe quel tiers (employeur, gouvernement, établissement ou individu) de vérifier si un justificatif a réellement été délivré par l'organisation concernée à la personne concernée et si des modifications ont été apportées au justificatif depuis sa délivrance. L'annulation et l'expiration des justificatifs peuvent également être validées instantanément avec un niveau de confiance maximal. De même que ces normes techniques peuvent être utilisées pour valider les titres délivrés aux personnes, elles peuvent également servir à valider l'origine institutionnelle de ces titres, y compris des éléments tels que le statut de certification.

Rationaliser et réduire le coût du partage et de la vérification des documents

Situation actuelle

Aujourd'hui, une personne qui postule un emploi ou veut poursuivre ses études doit demander son dossier scolaire officiel à l'établissement où elle a étudié, souvent moyennant des frais, selon le pays ou l'établissement. Elle doit également demander que son dossier soit envoyé à l'établissement dans lequel elle postule. C'est l'établissement initial ou un fournisseur de logiciels avec lequel l'établissement est sous contrat qui s'acquitte de cette tâche. L'établissement destinataire valide ensuite le justificatif en vérifiant son authenticité à l'aide de la solution du fournisseur de logiciels, en contactant l'établissement ou en vérifiant auprès d'un organisme tiers de vérification des justificatifs. Ce processus prend du temps et est souvent coûteux.

Il s'agit là du scénario idéal, dans lequel l'institution émettrice existe toujours et est en mesure de localiser, de valider ou d'envoyer les documents à l'institution destinataire (partie utilisatrice). Cependant, dans de nombreux cas, notamment dans les pays où des troubles politiques ou des catastrophes naturelles ont eu lieu, les documents ont été détruits et les institutions émettrices peuvent ne plus opérer. De nombreux détenteurs de documents (les titulaires des documents) se verront alors refuser des occasions d'emploi, de résidence, de naturalisation ou de poursuite d'études parce que leurs qualifications ou même leurs identités ne peuvent être validées.

Lorsque les documents qui doivent être vérifiés ont été délivrés dans un pays étranger, un processus encore plus complexe appelé apostille doit être mis en œuvre. En 1961, un groupe de pays a signé un traité supprimant l'obligation de légaliser les actes publics étrangers (Hague Convention, 1961[126]). Les pays signataires de la Convention Apostille ont recours à un processus d'apostille pour authentifier les documents émis par les autorités compétentes. Les pays qui ne sont pas signataires de ladite Convention exigent un certificat d'authentification des autorités fédérales du pays émetteur pour valider l'authenticité d'un acte public étranger (US Department of State, Bureau of Consular Affairs, s.d.[127]). Le processus d'authentification consiste à transmettre le document physique original, souvent accompagné d'un formulaire de demande et d'une taxe, à une institution gouvernementale habilitée à délivrer l'apostille ou le certificat d'authentification. Cette institution appose ensuite un cachet sur le document ou produit un certificat et renvoie le(s) document(s) par courrier au destinataire, qui doit ensuite les transmettre aux autorités du pays étranger dans lequel il a l'intention de vivre, de travailler ou d'étudier. Cette procédure prend en moyenne plusieurs mois et entraîne un coût financier pour le bénéficiaire. Si les documents ne peuvent pas être authentifiés, le bénéficiaire perd des occasions de voyage, d'emploi ou d'études.

Blockchain et normes ouvertes

La combinaison de la blockchain et des normes ouvertes permet aux établissements émetteurs de ne délivrer les dossiers aux destinataires qu'une seule fois. Ensuite, les destinataires peuvent prouver de manière cryptographique que celui-ci leur a été délivré et par quel établissement. Les destinataires peuvent partager leurs dossiers à leur gré, et même choisir les données à divulguer. Les dossiers peuvent être vérifiés par toute personne à qui le destinataire en accorde l'accès, instantanément et gratuitement. Cela simplifie non seulement la validation des titres universitaires, comme les diplômes et les relevés de notes, mais aussi de tout document devant être apostillé (ainsi que le certificat d'apostille lui-même). En 2020, les sociétés Hyland et Hedera Hashgraph ont annoncé une preuve de concept pour ancrer les apostilles électroniques dans une blockchain en partenariat avec le Secrétaire d'État du Texas (Texas Blockchain Council, 2021[128]). Cette preuve de concept s'appuie à la fois sur des justificatifs vérifiables et sur le hachage de fichiers PDF, ainsi que sur une gestion du flux de travail basée sur des applications pour rationaliser et automatiser une grande partie du processus d'émission et de vérification des apostilles.

Grâce à l'authentification par blockchain selon des normes ouvertes, même si une institution émettrice cesse d'opérer, si des dossiers sont perdus ou si le fournisseur de logiciels dont le produit a été utilisé pour émettre de telles authentifications numériques n'existe plus, le destinataire possède toujours des versions vérifiables de ses dossiers et peut les partager et les vérifier à sa guise. Comme les justificatifs vérifiables sont aussi lisibles de manière automatique, les établissements qui vérifient les dossiers entrants peuvent les présélectionner en fonction des qualifications des candidats pour des programmes d'études particuliers. Cette approche réduit considérablement les frais généraux de l'établissement d'accueil liés à la validation des dossiers, tout en éliminant les frustrations pour les bénéficiaires qui cherchent des possibilités d'apprentissage supplémentaires.

Lorsque des normes de vérification des titres de compétences sont utilisées, il importe peu que l'organisation devant vérifier un titre soit située dans le même pays ou dans un pays différent de celui dans lequel il a été délivré. Toute autorité d'un pays étranger peut valider les documents d'identité et les qualifications d'un individu en vérifiant l'authenticité du document, les identifiants cryptographiques de l'émetteur et du destinataire, et le statut du dossier. En bref, l'utilisation de la blockchain combinée à des normes ouvertes pourrait, au fil du temps, réduire considérablement, voire éliminer, la nécessité d'un processus international d'apostille ou de certificats d'authentification.

Les normes ouvertes pour la certification basée sur la blockchain sont donc susceptibles d'accroître la confiance dans le processus d'immigration et les voyages internationaux en général. C'est la raison pour laquelle des organismes gouvernementaux comme le ministère américain de la Sécurité intérieure ont investi dans le développement de justificatifs vérifiables et d'identifiants décentralisés : ils les considèrent comme des normes

technologiques anti-contrefaçon à utiliser par des agences fédérales comme les douanes (Customs and Border Protection) et la sécurité dans les transports (Transportation Security Administration).

En fin de compte, l'utilisation de dossiers numériques vérifiables, rendue possible par la technologie blockchain et les normes ouvertes, réduira considérablement les frais généraux humains et technologiques actuellement associés à la validation des dossiers émis à la fois sur papier et sur formats numériques classiques.

Rendre aux individus le contrôle de leurs données tout en réduisant le risque pour les établissements

Situation actuelle

Aujourd'hui, les personnes peuvent avoir en leur possession des copies ou même des originaux de leurs dossiers officiels, mais elles ne peuvent généralement pas les faire valider par un tiers sans demander au préalable aux institutions qui ont délivré ces dossiers de les authentifier à nouveau ou de renvoyer des versions authentifiées de ces dossiers. Cela rend souvent les dossiers officiels en possession de l'individu sans valeur fonctionnelle. Cette situation prive le titulaire des dossiers de sa capacité à les partager et à les vérifier, et il se retrouve à dépendre des institutions émettrices et des organismes de vérification tiers. En quelque sorte, les individus ne sont pas réellement propriétaires de leurs dossiers, même si ces derniers sont en leur possession.

La situation actuelle accroît également la responsabilité des institutions, qui sont chargées de conserver et de valider à vie les dossiers officiels pour le compte de leurs bénéficiaires. Non seulement ces institutions doivent conserver et sauvegarder des masses croissantes de données personnelles, mais comme ce sont elles qui communiquent les documents au nom des individus, elles doivent se conformer à des réglementations onéreuses pour protéger la vie privée des personnes concernées. Les amendes pour mauvaise gestion des données peuvent être particulièrement élevées, en particulier dans le cadre d'une nouvelle législation telle que le Règlement général sur la protection des données (RGPD) de l'UE.

Blockchain et normes ouvertes

Une fois qu'un justificatif ancré dans la blockchain est délivré à un individu à l'aide de normes ouvertes, celui-ci est en possession d'un fichier numérique qui atteste de la provenance et de l'intégrité du justificatif, ainsi que de sa détention. Les individus disposent désormais d'un dossier utilisable qu'ils peuvent communiquer instantanément, sans frais, à qui ils veulent. Les dossiers numériques de la blockchain peuvent être réutilisés indéfiniment sans qu'il soit nécessaire de les réémettre ou d'obtenir une validation supplémentaire de la part de l'autorité émettrice ou de toute autre partie.

Puisque le lieu de propriété et de partage des dossiers se déplace vers l'individu, tandis que la vérification est décentralisée, les institutions émettrices n'ont plus besoin de communiquer les dossiers pour le compte de leurs bénéficiaires et peuvent réduire considérablement les frais de maintenance des dossiers internes. Il n'est donc plus nécessaire de stocker de grandes quantités de données à caractère personnel pendant de longues périodes et la gestion des données institutionnelles s'en trouve simplifiée, car les circonstances dans lesquelles une institution doit partager les données à caractère personnel d'un bénéficiaire sont considérablement réduites.

Résumé

Les avantages de la technologie blockchain en combinaison avec des normes ouvertes pour la vérification de titres de compétences et diplômes - comme les justificatifs vérifiables W3C et les identifiants décentralisés, entre autres - constituent une liste impressionnante qui peut être regroupée en trois grandes catégories :

1. *Sécurité*. Les normes ouvertes pour la vérification par blockchain empêchent la fraude, atténuent les risques pour les institutions qui émettent et valident les documents officiels : elles protègent les titulaires de qualifications ainsi que la réputation des prestataires de services éducatifs. À mesure que l'adoption de justificatifs vérifiables augmentera, leur utilisation dans la vérification de titres et diplômes, la sélection et l'embauche deviendra probablement une bonne pratique dans le secteur, voire une obligation légale.

2. *Bien public*. Les dossiers blockchain qui utilisent des normes ouvertes lèvent les obstacles qui gênent l'accès aux débouchés et facilitent le développement économique en augmentant la confiance dans les institutions et dans les qualifications de la main-d'œuvre tout en atténuant les effets dévastateurs des conflits politiques

et des catastrophes naturelles. Lorsque les individus contrôlent leurs propres dossiers, ils sont libres de continuer à les utiliser n'importe où dans le monde, tandis que les parties utilisatrices peuvent avoir une confiance absolue dans les titres de compétences délivrés n'importe où.

3. *Efficacité.* Les dossiers blockchain qui utilisent des normes ouvertes augmentent considérablement l'efficacité et la facilité de la gestion des dossiers : la nécessité de réémettre ou de vérifier manuellement les documents diminue drastiquement ; la nécessité d'utiliser d'autres formats de dossiers disparaît au fil du temps et la communication et la vérification des dossiers sont instantanées et gratuites. Des processus tels que les transferts de crédits, qui sont notoirement complexes et longs pour les établissements d'enseignement, peuvent être automatisés avec l'arrivée de contenus de cours vérifiés et lisibles par machine.

Ces avantages font l'objet d'un consensus croissant. Un récent rapport du T3 Innovation Network de la Fondation de la Chambre de commerce des États-Unis sur les avantages de l'adoption d'approches autosouveraines pour les dossiers des apprenants les résume comme suit :

- « Les apprenants décident des personnes qui peuvent accéder à leur(s) dossier(s), y compris de certains aspects de leur dossier, et à quel moment ces personnes sont autorisées à y accéder.
- L'authentification est sécurisée par cryptographie, le plus souvent sur des registres distribués, ce qui rend les justificatifs vérifiables et accessibles, quel que soit l'état de l'organisme émetteur au moment de la vérification.
- La vérification en ligne des apprenants et des émetteurs peut être sécurisée et rationalisée.
- Les justificatifs vérifiables peuvent prendre en charge la vérification de formations non traditionnelles et tiennent compte de différentes formes d'apprentissage dans divers contextes. » (T3 Innovation Network, 2020[101]).

Les avantages de la vérification des titres et diplômes qui s'appuie à la fois sur la technologie blockchain et sur des normes ouvertes en font un élément précieux des projets de numérisation pour toute institution qui émet ou valide des documents officiels. Il s'agit là de la condition préalable à la création d'un écosystème mondial véritablement interopérable pour les titres et certificats numériques dans lequel n'importe qui peut échanger des dossiers académiques avec n'importe qui d'autre et les examiner et les vérifier instantanément sans crainte de fraude. En raison de leurs investissements massifs dans ces technologies, les prestataires de services éducatifs ont été parmi les premiers à mettre en œuvre des programmes de vérification de titres par blockchain. La section suivante passe en revue plusieurs exemples d'établissements d'enseignement qui se sont engagés dans cette voie.

Déploiement dans la vie réelle

Toute situation dans laquelle la fraude doit être évitée justifie l'utilisation potentielle de la blockchain. En effet, comme les sections précédentes l'ont expliqué, la blockchain est avant tout une infrastructure de vérification des informations. Pour cette raison, la blockchain est appelée à révolutionner toutes les « industries qui reposent sur la confiance », de la banque à l'assurance en passant par le maintien de l'ordre, les soins de santé et la gestion de la chaîne d'approvisionnement (McCauley, 2019[129]). C'est toutefois le secteur de l'éducation qui a été à l'avant-garde de l'adoption de la technologie blockchain, car la vérification des titres universitaires continue d'être un besoin permanent et pressant (Grech et Camilleri, 2017[130]).

Mais la vérification des qualifications est un besoin qui va bien au-delà du secteur de l'éducation ; les employeurs du monde entier ont un intérêt évident à recevoir des titres de compétences dans lesquels ils peuvent avoir le plus haut degré de confiance. Des institutions multilatérales comme la Banque interaméricaine de développement ont compris que la vérification du capital humain d'une manière efficace est l'un des moyens les plus faciles de créer la confiance dans une économie mondiale (Cabrol, 2018[131]). Dans cette perspective, l'American Council on Education observe que « la blockchain, en particulier, est prometteuse pour la création de connexions plus efficaces et durables entre le secteur de l'éducation et le monde du travail. Elle peut fournir le tissu technologique permettant aux travailleurs déplacés de traduire leurs compétences en vue de nouvelles occasions d'éducation ou d'emploi, et peut avoir une valeur particulière pour ceux qui sont actuellement mal desservis par le paradigme éducation-emploi actuel. » (Lemoie et Souares, 2020[44]). En particulier, l'évolution vers un modèle d'apprentissage tout au long de la vie et la mobilité toujours plus grande des apprenants et des travailleurs font des titres de compétences vérifiables une condition préalable à l'essor économique au XXIe siècle. Le terme « écosystème » est fréquemment utilisé par les technologues de la blockchain, les employeurs et les établissements d'enseignement pour décrire l'état idéal de l'échange et de la vérification des titres de compétences.

La section qui suit présente plusieurs exemples de mises en œuvre réelles de la vérification de titres de compétences basée sur la blockchain, provenant de pays du monde entier. Il faut noter que tous les projets qui ont été mis au point à ce jour n'ont pas encore de véritables utilisateurs (ou clients, s'ils sont commerciaux). Certains de ces projets ont été annoncés, mais peu d'informations publiques sont disponibles sur leur mise en œuvre ou leur adoption. Cette liste doit être considérée comme un instantané du marché de la vérification des titres par blockchain dans les premières années de son développement, étant entendu que ce paysage continuera à évoluer rapidement.

États-Unis

On peut considérer que c'est au MIT que sont nées les normes techniques ouvertes pour les titres numériques vérifiables. En 2015, la division Learning Initiative du MIT Media Lab a commencé à travailler sur un projet visant à ancrer les titres universitaires dans la blockchain (MIT Media Lab, s.d.[132]). Peu après, la société Learning Machine (depuis 2020, Hyland Credentials) s'est associée à cette équipe pour mener à bien le projet (MIT Media Lab, s.d.[133]). En 2016, Blockcerts, la norme ouverte pour les justificatifs numériques, a été publiée sous une licence MIT Free and Open Source Software (FOSS) sur blockcerts.org (Blockcerts, s.d.[111]). En 2017, les bibliothèques de références Blockcerts ont permis à quiconque de créer ses propres applications logicielles pour émettre, stocker, partager et vérifier des justificatifs numériques sécurisés. La technologie des justificatifs vérifiables a été intentionnellement publiée en code source ouvert afin d'éviter l'enfermement propriétaire des fournisseurs et de créer un écosystème ouvert pour les applications de vérification. Blockcerts est également neutre par rapport aux blockchains, ce qui signifie qu'il prend en charge l'ancrage dans la plupart des types de réseaux de blockchains. Les implantations actuelles incluent Bitcoin, Ethereum (Learning Machine, 2018[134]), et Hyperledger Fabric (Castro-Iragorri, 2018[135]). En 2017, Learning Machine a lancé un système commercial de vérification de titres de compétences. En 2019, elle a annoncé qu'elle mettrait à jour Blockcerts pour qu'il devienne un justificatif vérifiable basé sur le W3C (Jagers, s.d.[136]).

Un certain nombre d'universités américaines et d'établissements, de la maternelle à la terminale, ont délivré des titres de compétences à l'aide de Blockcerts à leurs étudiants et diplômés (Hargrave et Karnoupakis, 2020[137]). Il s'agit notamment du MIT (Durant, 2017[138]), de la SNHU (Kelly, 2018[139]), des écoles publiques de l'Union à Tulsa, en Oklahoma (Friedman, 2019[140]), de l'Université ECPI (Southside Daily Staff, 2018[141]), de l'Université Maryville (Learning Machine Company Newsroom, 2019[142]) et du Central New Mexico Community College (Salas, 2018[143]). En 2020, la première mise en œuvre à l'échelle d'un État de la vérification de titres de compétences par blockchain aux États-Unis a été lancée par le département de l'enseignement supérieur du Nouveau-Mexique (Hyland Newsroom, 2020[144]).

En février 2020, un consortium d'institutions de recherche du monde entier a annoncé l'arrivée de bloxberg, un embranchement de Blockcerts conçu pour ancrer la preuve de la recherche scientifique dans un réseau blockchain privé (Bloxberg, 2020[145]).

Une multitude de nouveaux projets voient également le jour. En février 2020, le Digital Credentials Consortium (DCC) a publié un livre blanc sur l'infrastructure d'authentification numérique de l'avenir, conforme au modèle Verifiable Credential du W3C et au règlement général sur la protection des données de l'UE (Digital Credentials Consortium, 2020[146]). En 2018, le MIT et onze autres universités internationales d'Allemagne, du Canada, des États-Unis, d'Italie, du Mexique et des Pays-Bas ont fondé le Digital Credentials Consortium afin de développer une infrastructure permettant de délivrer, de partager communiquer et de vérifier les justificatifs numériques des résultats universitaires dans l'enseignement supérieur. Un rapport publié par le Conseil américain de l'éducation et le Bureau des technologies éducatives du ministère américain de l'Éducation fournit un aperçu utile des initiatives de vérification de titres par blockchain aux États-Unis (Lemoie et Souares, 2020[44]) :

- Workday Credentials est une plateforme de vérification de dossiers ancrés dans la blockchain utilisant la norme W3C Verifiable Credentials (Workday Credentials, s.d.[147]). Elle utilise la version privée d'une implantation de Hyperledger Fabric pour ancrer les dossiers (Ledger Insights, 2020[148] ; Meetup, 2020[149]).
- Pistis.io fournit des portefeuilles web et mobiles permettant aux destinataires de télécharger des documents et de les hacher dans une blockchain développée avec Hyperledger Fabric (Pistis.io, s.d.[150]).
- Greenlight fournit un réseau blockchain actuellement utilisé par cinq districts scolaires indépendants du nord du Texas pour échanger des dossiers scolaires et permettre aux élèves à faible revenu de soumettre leur

candidature dans plusieurs universités en même temps. Le réseau est une implantation privée de Hyperledger Fabric (Lemoie et Souares, 2020[44]).

- Salesforce a lancé le Trusted Learner Network, un réseau blockchain privé fonctionnant avec Hyperledger Sawtooth.
- L'Université d'État de l'Arizona utilise actuellement le Trusted Learning Network de Salesforce pour envoyer les dossiers de cours validés aux établissements de deux ans d'où proviennent les étudiants (Lemoie et Souares, 2020[44]).
- ODEM et BitDegree incluent également la vérification de titres de compétences parmi les fonctionnalités de leurs plateformes éducatives hébergées sur Ethereum.
- La Faculté d'Information de l'Université d'État de San Jose a introduit une demande de subvention pour utiliser un résolveur universel SSI afin de « permettre aux personnes possédant des titres numériques vérifiables d'avoir accès aux ressources de toutes les bibliothèques participantes. » (Lemoie et Souares, 2020[44]).
- La Learning Economy Foundation participe à la mise en œuvre du Trusted Learner Network de l'Université d'État de l'Arizona (Arizona State University, s.d.[151]). Elle dirige également des projets de vérification par blockchain au Colorado (Learning Economy Foundation, s.d.[152]), au Dakota du Nord (le ND ILR Co-Lab) ((s.a.), s.d.[153]), en Floride (le Broward County OpenCLR Lab) (Learning Economy Foundation, s.d.[154]), et dans la région Asie-Pacifique (Asia-Pacific AP Lab) (Learning Economy Foundation, s.d.[155]).

Canada

Il semblerait que le gouvernement du Canada ait pris la tête au niveau international en termes d'applications de vérification autosouveraines. En 2018, le Bureau de l'identité numérique du Secrétariat du Conseil du Trésor du Canada a publié « La vision de l'identité numérique digne de confiance du Canada », un court métrage présentant un avenir dans lequel les citoyens peuvent demander et gérer une variété de services et de prestations gouvernementaux en ligne en utilisant des formes d'authentification privées et sécurisées (Treasury Board of Canada Secretariat, 2018[156]). La province de la Colombie-Britannique a été parmi les premières à mettre en œuvre un projet de validation numérique en direct à l'aide de SSI : l'OrgBook, qui utilise Hyperledger Indy pour gérer des justificatifs vérifiables pour plus d'un million d'entreprises actives dans la province (Lemoie et Souares, 2020[44]).

En 2019, l'initiative Nuage de Talents du gouvernement du Canada a commencé à certifier les travailleurs du secteur public « agents libres » en utilisant Blockcerts (Benay, 2019[76] ; Talent Cloud | Nuage de talents, 2018[157]). Nuage de talents est un marché de talents du secteur public qui réimagine un écosystème de reconnaissance des compétences et des titres de compétences pour la fonction publique du Canada (Government of Canada Talent Cloud, s.d.[158] ; Greenspoon, 2018[159] ; World Government Summit et al., 2018[160]). Les travailleurs du secteur public peuvent gérer leur profil dans le Nuage de Talents. Celui-ci comprend les qualifications et l'expérience validées, qui servent de preuve de compétence lorsqu'ils postulent tout emploi dans le secteur public.

L'Université McMaster à Hamilton, en Ontario, a également construit son propre système de délivrance de Blockcerts, qui est utilisé pour délivrer des diplômes numériques aux étudiants diplômés aujourd'hui (McMaster University Office of the Registrar, s.d.[116]).

Plus récemment, l'Association des registraires des universités et collèges du Canada (ARUCC) a annoncé un partenariat avec Digitary pour créer un réseau national de validation pour les établissements d'enseignement supérieur canadiens (Hamdani, 2020[161]). Digitary s'est, à son tour, associé à Evernym pour mettre en œuvre une solution de validation basée sur la blockchain (Crace, 2019[162]). Les solutions d'Evernym mettent en œuvre les titres de compétences vérifiables du W3C en s'appuyant sur les réseaux blockchain Sovrin et Hyperledger Indy.

Union européenne et Royaume-Uni

Au sein de l'Union européenne, Malte a été le pays le plus prompt dans l'application de la blockchain pour la délivrance et la validation de titres scolaires. Depuis 2017, Malte se fait appeler « l'île de la blockchain » en raison de la décision du Premier ministre Joseph Muscat de se lancer dans le « risque calculé » d'investir dans la technologie blockchain pour lutter contre la corruption, réduire la bureaucratie et diversifier le secteur technologique en plein essor du pays (Al Ali et van der Walt, 2018[163]). En janvier 2017, le ministère de l'Éducation et de l'Emploi (MEDE)

de Malte a commencé à mettre en œuvre le premier projet pilote national au monde de délivrance de titres universitaires sur une blockchain (Sixtin, 2017[164] ; Cocks, 2017[165]). Depuis lors, la portée du projet s'est élargie pour inclure tous les établissements d'enseignement de Malte (Sansone, 2019[166]).

En Espagne, le réseau blockchain Alastria a été conçu et construit par un consortium de plus de 500 entreprises, institutions gouvernementales et universités dans le but de faciliter les services numériques, y compris la certification de diplômes universitaires (Alastria, s.d.[49]). SmartDegrees a également vu le jour, utilisant la blockchain Quorum basée sur Ethereum pour ancrer les titres de compétences numériques (SmartDegrees, s.d.[167]). Vottun est une autre entreprise espagnole de certification par blockchain, qui utilise la blockchain publique Ethereum (Vottun, s.d.[168]).

En Europe centrale, SAP a lancé sa plateforme de certification TrueRec en utilisant Ethereum ; ce projet a été mené avec l'aide de l'Université KU Leuven (Jonkers, 2018[169]). La société slovène 0xcert a créé sa propre norme ouverte pour la tokénisation et le transfert de propriété des titres numériques ainsi que d'autres actifs numériques (0xcert, s.d.[170]).

Au Royaume-Uni, GradBase propose un système de certification par blockchain utilisant la blockchain Bitcoin (GradBase, s.d.[171]). PwC UK a lancé « SmartCredentials », une plateforme de certification de titres de compétences construite sur une version fermée d'Ethereum (PwC UK, s.d.[172]). L'initiative Open Blockchain de l'Open University (The Open University, s.d.[173]) propose un certain nombre d'applications de certification par blockchain, principalement à l'aide d'Ethereum : les Open Badges et les Blockcerts ancrés dans la blockchain. Parmi ces applications, citons QualiChain (The Open University, s.d.[174]), plateforme de mise en relation des employeurs et des demandeurs d'emploi, et PeerMiles (The Open University, s.d.[174]), une initiative visant à reconnaître les dossiers professionnels des chercheurs. Il s'agit dans les deux cas de projets de recherche plutôt que d'applications logicielles commerciales.

Toutes ces initiatives devront tenir compte de la normalisation introduite non seulement par le W3C, l'IEEE et l'ISO, mais aussi par l'infrastructure européenne de services blockchain (EBSI), un ensemble de réseaux blockchain en cours de développement par la Commission européenne et l'European Blockchain Partnership, une coalition d'États membres de l'UE qui se consacre à la recherche en matière d'applications de la technologie blockchain dans le secteur public. L'EBSI est financée par la Connecting Europe Facility, qui est chargée de soutenir le mandat pour un marché unique numérique dans toute l'UE (CEF Digital, s.d.[40]). L'EBSI doit servir d'infrastructure pour les services numériques transfrontaliers. En ce sens, sa portée est similaire à celle du réseau espagnol Alastria, mais avec un mandat paneuropéen. Un certain nombre de participants au projet Alastria coordonnent actuellement la mise en place de l'EBSI.

L'EBSI utilise actuellement Hyperledger Besu (une implémentation fermée du code de base Ethereum) et Hyperledger Fabric, mais son intention est de devenir neutre en matière de blockchain. La documentation technique de ce projet en code source ouvert est à la disposition du public (CEF Digital, s.d.[175]). Les quatre utilisations initiales visées par l'EBSI sont les suivants :

1. La notarisation de documents à des fins d'audit ;
2. La certification de diplômes ;
3. Le cadre européen d'identité autosouveraine (ESSIF) ; et
4. Le partage de données de confiance (Allen, 2016[100] ; CEF Digital, s.d.[176]).

La version 1.0 de l'EBSI a été lancée en février 2020, et les futures versions devraient s'échelonner chaque année (Smolenski, s.d.[177]). Des consultations de marché publiques ont été lancées dans le but de déterminer les futures subventions de développement destinées aux entreprises privées qui ont l'intention de créer des services sur le réseau.

L'EBSI est distinct du projet Europass, une autre initiative de certification numérique à l'échelle de l'UE. L'Europass est supervisé par la direction générale de l'éducation et de la culture de la Commission et vise à rendre les compétences portables et reconnaissables dans toute l'Europe. Depuis 2012, le portail web Europass permet aux individus de créer un portefeuille électronique de leurs titres universitaires et autres qualifications, leur « passeport européen de compétences ». Ces cinq documents standard ne sont pas ancrés dans une blockchain,

mais sont stockés au format XML et peuvent être signés numériquement par l'institution émettrice à l'aide de clés de signature fournies par des autorités officielles dans le cadre du règlement eIDAS pour l'identification et les signatures électroniques. Grâce à l'initiative européenne sur les compétences, les qualifications et les professions (ESCO), les détenteurs de profils Europass peuvent également être dirigés vers des offres d'emploi via la classification ESCO (European Commission, s.d.[178]).

En 2018, un ensemble d'exigences relatives aux documents Europass signés numériquement a été élaboré, en s'inspirant largement du cadre de confiance eIDAS. Cet ensemble d'exigences est désigné sous le nom d'infrastructure européenne des titres de compétences numériques (EDCI) (Everis (European Commission), s.d.[179]). Distincte de l'EBSI, l'EDCI n'utilise pas de blockchains pour la certification, à l'exception du statut accrédité des autorités de délivrance. Ces dernières doivent être ancrées dans une blockchain, qui sera vraisemblablement l'EBSI à terme. L'EDCI est en fait une norme ouverte pour l'émission, la réception, le stockage, le partage et la vérification de documents signés numériquement, un peu comme les blockchains et les Verifiable Credentials. Toutefois, comme l'EDCI n'a pas été élaborée en partenariat avec le W3C, elle diverge de la spécification Verifiable Credentials à plusieurs égards, notamment en exigeant l'utilisation de XML plutôt que de JSON. Ces divergences sont actuellement en cours de traitement au sein du groupe de la communauté des justificatifs vérifiables du W3C.

Moyen-Orient et Afrique du Nord

La région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord a montré un enthousiasme considérable pour la technologie blockchain, notamment depuis l'annonce de la « stratégie blockchain 2021 » des Émirats arabes unis en 2018 (The United Arab Emirates' Government portal, s.d.[180]). Cette initiative vise à transférer 50 % des transactions gouvernementales vers une blockchain d'ici 2021 et a été étroitement associée à l'initiative Smart Dubai 2021 (Smart Dubai 2021, s.d.[181]). Dans le cadre de sa stratégie en faveur de la blockchain, le gouvernement des Émirats arabes unis a parrainé de nombreux concours de création de start-up afin d'identifier les fournisseurs locaux susceptibles de fournir des services aux secteurs public et privé.

Educhain est un fournisseur situé aux Émirats arabes unis dans le domaine de la certification universitaire. Après avoir remporté le concours de création d'entreprise Techstars, Educhain a mis en œuvre plusieurs projets pilotes de certification par blockchain avec des établissements d'enseignement des Émirats arabes unis dans l'enseignement supérieur ainsi que de la maternelle à la terminale. Il s'agit notamment de l'Université des Émirats arabes unis (UAEU, 2019[182]), de l'Université de Dubaï (EAU) (CNN, s.d.[183]), et de l'AMSI (AMSI, s.d.[184]).

En 2020, l'entreprise Shahada a été mise sur pied (Smartworld, 2020[185]). Elle commercialise une plateforme SaaS, également appelée Shahada, pour créer et délivrer des justificatifs numériques ancrés dans la blockchain. Son site web indique que « Shahada s'appuie sur les normes ouvertes développées par le MIT » (Shahada, s.d.[186]). Shahada est une coentreprise entre Smartworld, un important intégrateur de systèmes des Émirats arabes unis, et Grape Technology, une start-up basée aux Émirats arabes unis et spécialisée dans la technologie blockchain (Shahada, s.d.[186]). L'entreprise a réussi à délivrer des titres de compétences ancrés dans la blockchain pour le compte de l'Université de Dubaï (Zawya, 2020[187]). Elle a également intégré sa plateforme à UAE Pass, qui assure la vérification de l'identité des bénéficiaires pour les services gouvernementaux et commerciaux dans tout le pays (Smartworld, 2020[185]).

En Égypte, la Zewail City of Science and Technology a signé un protocole d'accord avec la start-up Intelli Coders pour construire « BlockCred », (Abdou, 2019[188]), un système de certification blockchain pour les programmes d'éducation et de formation professionnelle de la ville de Zewail (BlockCred, s.d.[189]). BlockCred est une DApp construite sur la plateforme blockchain Blockstack.

La première université du Moyen-Orient à délivrer des titres universitaires ancrés dans la blockchain a été l'Université des sciences et technologies King Abdullah (KAUST) en Arabie saoudite (Company Newsroom of Learning Machine, 2018[190]). En 2018, elle a fait appel à Learning Machine (désormais Hyland Credentials) pour délivrer ses premiers diplômes numériques conformes à la blockchain. L'Université de Bahreïn lui a rapidement emboîté le pas (Global Blockchain Business Council, s.d.[191]). Depuis novembre 2020, les deux universités poursuivent leurs initiatives en matière de délivrance de titres numériques.

Amérique latine et les Caraïbes

Un nombre croissant d'initiatives de délivrance de titres de compétences par blockchain ont vu le jour en Amérique latine au cours des dernières années. Les projets en cours de mise en œuvre ont généralement employé la norme ouverte Blockcerts pour la délivrance de titres de compétences numériques. Il s'agit notamment de la délivrance de diplômes numériques par Tecnológico de Monterrey, la première université de recherche technologique du Mexique (Longino Torres, 2019[192]). L'Universidad Autónoma de Nuevo León a mis en œuvre un projet de délivrance de titres de compétences Blockcerts en partenariat avec Learning Machine via un partenaire local, SYSARTEC (SYSARTEC, 2020[193]). Le ministère du Travail des Bahamas et le Caribbean Examinations Council ont également fourni des pilotes Blockcerts pour la formation de la main-d'œuvre, les certificats de fin d'études et les résultats d'examen (Munro, 2018[194] ; Jamaica Observer, 2019[195]).

Un autre fournisseur de solutions proposant un système de certification Blockcerts dans la région est Xertify, une entreprise de certification numérique située en Colombie (Xertify, s.d.[196]). La Dirección Estatal de Profesiones de l'État de Querétaro au Mexique utilise Xertify pour délivrer une Cédula Profesional (licence professionnelle) numérique à de nombreux types de praticiens (La Fuente Querétaro, 2020[197] ; @profesionesqro, 2020[198]). Xertify travaille également avec des universités de la région, notamment l'Universidad ECCI (@xertifyco, 18 June 2020[199]) et l'Universidad Quindío (@xertifyco, 12 June 2020[200]) pour délivrer des diplômes numériques.

Prince Consulting, une société de services logiciels située en Argentine, a également mis en œuvre des projets de délivrance de titres de compétences Blockcerts pour des établissements d'enseignement par l'intermédiaire de sa filiale OSCity (Prince Consulting, s.d.[201]).

Un important projet régional, parrainé par la Banque interaméricaine de développement, s'inspire d'Alastria : LACChain. Sous la houlette d'un consortium d'organisations publiques et privées, le projet vise à construire une blockchain pour la prestation de services commerciaux et publics dans la région (ConsenSys, 2020[50]).

Asie et Pacifique

À Singapour, la délivrance de titres de compétences par blockchain a connu un rapide engouement. Quelques start-ups éminentes ont créé des plateformes de délivrance de titres de compétences ancrées dans le réseau Ethereum : Attores, une entreprise de développement de blockchain propose des « contrats intelligents en tant que service », et Indorse, une plateforme réputée a été conçue pour mettre en relation les candidats et les offres d'emploi. En 2017, Attores a testé des diplômes en blockchain avec l'Université technique de Ngee Ann (McSpadden, 2017[202]). Depuis leur lancement initial, Attores et Indorse ont fusionné, préservant la marque Indorse. Celle-ci propose désormais un outil de développement professionnel pour les ingénieurs logiciels (Indorse, s.d.[203]). Dans le même laps de temps, le gouvernement de Singapour a développé OpenCerts, une norme ouverte pour la délivrance de titres de compétences numériques ancrés dans la blockchain, construite en embranchant et en modifiant le code de base Blockcerts (OpenCerts, s.d.[118]). Il a depuis fortement encouragé les universités à utiliser OpenCerts en établissant des partenariats avec des entreprises locales de développement de logiciels qui peuvent construire des applications de délivrance de titres en utilisant les bibliothèques de référence en code source ouvert d'OpenCerts (OpenCerts, s.d.[77]).

En 2018, le ministère de l'Éducation de Malaisie a annoncé un projet de délivrance de titres universitaires sur la blockchain NEM, mis au point par le Conseil des doyens des TIC des universités malaisiennes (Asia Blockchain Review, 2018[204]).

En 2019, Pallavan Learning Systems (PLS) est devenu la première institution de la maternelle à la terminale en Inde - et potentiellement dans le monde - à délivrer des Blockcerts à ses élèves. La Pallavan School de Jhalawar, au Rajasthan, et la Vasant Valley School de New Delhi ont délivré plusieurs types de justificatifs : certificats de fin d'études, certificats de connaissances linguistiques, certificats de bonne conduite, lettres de recommandation et fiches de notation dans cinq domaines de développement (Company Newsroom of Learning Machine, 2020[205]).

En 2019, l'Université des sciences et de la technologie de Hong Kong (HKUST) a commencé à délivrer des certificats de réussite sous forme de Blockcerts en utilisant un système qu'elle a construit en interne (HKUST Academic Registry, s.d.[206]). L'Université en question continue de faire évoluer le système pour délivrer des diplômes et des relevés de notes.

Promouvoir le changement

L'adoption de nouvelles technologies présente immanquablement des opportunités et des défis pour les institutions qui cherchent à adapter les pratiques et les flux de travail actuels. Ces défis se répartissent en deux catégories : les défis idéologiques et logistiques.

Les défis au niveau des idées comprennent :

1. La nécessité de penser autrement.
2. L'acceptation de nouveaux compromis : les nouvelles idées présentent des avantages et des inconvénients par rapport au passé.
3. La difficulté à imaginer à quoi ressemblera le changement.
4. Le changement au niveau des rôles et des responsabilités dans lesquels les gens peuvent se sentir à l'aise.
5. La difficulté à imaginer à quoi ressemblera le succès.
6. La distinction à établir entre les moyens utilisés et les finalités poursuivies. On peut mieux arriver à ces fins (c'est-à-dire la sécurité, la responsabilisation, la confiance, l'atténuation des risques) en utilisant des moyens différents de ceux employés aujourd'hui.

Les défis logistiques comprennent :

1. Comment mettre en œuvre une nouvelle technologie et les processus qui y sont associés ?
2. Qu'advient-il de nos investissements dans les technologies existantes ?
3. Quel en sera le coût ?
4. Qui sera là pour nous guider et nous accompagner dans les changements à venir ?
5. Comment pouvons-nous utiliser nos ressources internes le plus efficacement possible ?
6. Pourrons-nous faire marche arrière et revenir aux anciennes méthodes si les changements ne fonctionnent pas comme prévu ?
7. Existe-t-il des pièges ou des trucs cachés dont nous ne sommes pas conscients ?

Ces défis peuvent être relevés par un leadership éclairé au sein des organisations, qui encadre les équipes chargées de la mise en œuvre des nouvelles technologies et les aide à comprendre à la fois le pourquoi (les idées) et le comment (la logistique) du changement. Autrement dit, il faut promouvoir le changement à la fois de manière enthousiaste par rapport aux avantages et de manière réaliste par rapport aux efforts à mettre en place pour que l'aventure soit un succès.

Dans le cadre de la transition vers des titres de compétences vérifiables, deux grands groupes de parties prenantes ont une influence considérable sur la manière dont le changement s'opère : les décideurs politiques et les établissements d'enseignement. La section qui suit présente quelques suggestions sur la manière dont ces groupes peuvent aborder la transformation technologique.

Que peuvent faire les décideurs politiques ?

Nombreux sont ceux qui se tournent vers les décideurs politiques pour savoir si ce qu'ils font est conforme aux valeurs et aux lois de leur communauté ; on les sollicite également souvent pour des conseils normatifs : que devrait-on faire ? De par leurs fonctions, ils devraient se concentrer sur les objectifs qu'ils ont en tête pour les citoyens et se demander si une nouvelle technologie peut contribuer à atteindre ces objectifs.

Dans le cas des titres de compétences vérifiables, les avantages sont assez clairs : ils augmentent la confiance de tous, accélèrent les transactions économiques, simplifient le processus de candidature aux écoles et aux emplois, facilitent la mobilité transfrontalière et responsabilisent les titulaires de diplômes en leur procurant des documents vérifiables portant sur l'apprentissage tout au long de la vie. Dans le domaine de l'éducation, il semble évident que la mise en œuvre de solutions de certification basées sur la blockchain profite aux établissements d'enseignement, aux étudiants, aux employeurs et, par conséquent, à tout le tissu économique.

Quand on examine les lois et politiques en vigueur, il est bon de se demander si une réglementation destinée à atteindre un objectif particulier (par exemple, valider qu'un titre a été délivré par l'autorité compétente) ne dépend pas en fait d'une mise en œuvre technique trop pointue. Une législation qui impose des mises en œuvre techniques

particulières peut finir par étouffer l'innovation, car la technologie évolue à un rythme rapide qu'il est souvent impossible d'anticiper. En règle générale, une politique efficace fournit *un cadre de référence* pour déterminer la solution à un problème, plutôt que d'être trop prescriptive quant à la solution elle-même. Cette approche permet aux individus de faire preuve d'ingéniosité tout en fixant des lignes directrices claires par rapport à ce qui est légalement acceptable.

De par leurs fonctions politiques, les décideurs peuvent également déterminer comment les fonds sont alloués aux projets basés sur les nouvelles technologies. Il peut s'agir de dépenses pour des initiatives de R-D, d'un fonds d'investissement public fournissant des capitaux aux jeunes entreprises/start-ups, d'un investissement dans l'éducation et la formation au sein des communautés délaissées ou d'un soutien à des projets pilotes basées sur les nouvelles technologies ou à la mise en œuvre de programmes déjà au point.

Certains gouvernements peuvent choisir de financer la mise en place de leurs propres réseaux blockchain ou de leurs propres normes technologiques. Toutefois, il faut garder à l'esprit que la valeur des titres numériques vérifiables se fonde sur deux éléments importants : 1) la portabilité internationale et 2) l'indépendance de la plateforme. Toute infrastructure technologique, qu'elle soit élaborée par le secteur public ou le secteur privé, qui crée un enfermement propriétaire ou limite l'utilité au-delà des frontières, créera des difficultés d'adoption et d'évolutivité. Elle engendrera également des tracasseries bureaucratiques supplémentaires, ce qui va à l'encontre des avantages potentiels des titres de compétences vérifiables. En conséquence de quoi, les projets technologiques menés par les gouvernements devraient suivre de près les travaux des organismes de normalisation mondiaux tels que le W3C, l'IEEE, l'ISO et d'autres, afin de garantir que ce qui est développé à destination de leurs citoyens soit utilisable au niveau international et sur toutes les plateformes logicielles.

Il faut également investir dans le temps et les efforts à déployer. Les décideurs politiques qui prennent le temps de comprendre les motivations et les préoccupations des technologues qui travaillent sur de nouvelles solutions peuvent contribuer grandement à accélérer le rythme de l'innovation à l'échelle locale. Grâce à cette attitude constructive, les responsables politiques ouvrent également la porte aux technologues afin que ceux-ci comprennent également les préoccupations et les idées des premiers. Lorsque les décideurs et les technologues se regardent en chiens de faïence, la coopération stagne et la méfiance peut polariser toute une société. Le temps passé à construire quelque chose ensemble, par-delà les différences d'opinion et de métier, est sans aucun doute du temps bien employé.

Que peuvent faire les établissements d'enseignement ?

Lorsqu'on aborde l'utilisation des titres vérifiables ancrés dans la blockchain, l'une des premières choses que les établissements d'enseignement peuvent faire est de reconnaître que le paysage technologique est en train de changer. L'économie du XXIe siècle aura besoin de justificatifs numériques portables et vérifiables, et les étudiants les demanderont de plus en plus aux établissements qu'ils fréquentent. La pandémie de COVID-19, en particulier, a mis en évidence la nécessité pour les établissements de délivrer des documents portables et sécurisés qui peuvent être reçus, partagés et vérifiés à distance en toute sécurité. L'utilisation de la technologie blockchain ne fait peut-être pas partie des priorités des établissements d'enseignement, mais il est possible de s'informer sur les solutions disponibles et de réfléchir aux meilleures pratiques de mise en œuvre dès aujourd'hui.

Quant à la question de savoir comment mettre en œuvre la technologie, il existe de nombreuses approches. Plusieurs solutions s'offrent aux établissements pour délivrer et vérifier les titres de compétences basés sur la blockchain. Ceux qui optent pour des solutions basées sur des normes ouvertes, comme W3C Verifiable Credentials et Blockcerts, ont deux possibilités : soit ils créent leurs propres applications pour la délivrance de titres en utilisant les bibliothèques de référence en code source ouvert, soit ils prennent une licence pour un produit ou un service fourni par une société privée et délivrent des enregistrements conformes aux normes. Ceux qui choisissent des solutions qui ne s'appuient pas sur des normes ouvertes limitent leurs options aux services fournis par les prestataires privés ou à des solutions idiosyncrasiques construites et gérées en interne. Notons que ces solutions peuvent rencontrer à terme des problèmes de portabilité des données et d'interopérabilité.

Quelle que soit la voie qu'elle choisisse, toute institution qui envisage de délivrer ses documents officiels à l'aide de la blockchain peut s'inspirer des brèves recommandations suivantes.

1. *Identifiez les possibilités d'utilisation.* La blockchain est la structure de vérification la plus sûre disponible pour les titres de compétences ; elle est donc la mieux adaptée aux documents qui doivent être vérifiés avec un haut degré de fiabilité. Dans le domaine de l'éducation, ces documents comprennent, entre autres, les diplômes et les titres de compétences, les relevés de notes, les certificats de fin d'études, les dossiers complets des apprenants, les identifiants des étudiants et les résultats des examens. Pour les professionnels de l'éducation, les brevets ou accréditations d'enseignement ou les certificats de formation professionnelle continue sont des points de départ prometteurs. La blockchain est moins utile pour les titres de compétences plus éphémères qui ne nécessitent qu'une validation temporaire. Toutefois, ces derniers peuvent venir « s'empiler » sur des titres de niveau supérieur ancrés dans une blockchain.

2. *Inscrivez vos initiatives dans une perspective d'avenir en vous engageant dans des normes ouvertes.* De nombreux fournisseurs dans le secteur de la blockchain ont créé des solutions personnalisées dans lesquelles les titres ne s'affichent et ne se vérifient que dans leur système logiciel ou leur réseau de blockchain. L'accès, le partage et la vérification des informations d'identification sont donc liés à ce fournisseur en particulier. Plutôt que de rendre l'utilisation des documents officiels de votre organisation dépendante d'un fournisseur de logiciels et de courir le risque de devoir « refaire » une mise en œuvre de certification numérique si vous changez de service, choisissez des architectures ouvertes pour inscrire votre solution de certification dans la durée. Insistez sur l'utilisation de normes ouvertes (Blockcerts, justificatifs vérifiables) et de blockchains qui sont soit publiques (comme Bitcoin ou Ethereum), soit fermées et privées, gérées par des institutions ayant un mandat public, comme les gouvernements ou des consortiums d'organisations bien établies (p. ex., l'EBSI). Cela augmente la probabilité que ces organisations disposent des ressources et de la stabilité nécessaires pour gérer à terme un réseau de blockchain privé ou fermé qui coûte cher.

Si vous choisissez de passer un contrat avec un prestataire pour qu'il vous fournisse une solution de vérification blockchain plutôt que d'en développer une vous-même, vous trouverez ci-dessous une série de recommandations utiles.

1. *Choisissez un fournisseur de logiciels expérimenté dans la fourniture de solutions de certification basées sur des normes ouvertes.* Le marché des titres de compétences numériques est en pleine croissance, et de plus en plus de fournisseurs proposent aujourd'hui des solutions. Certains d'entre eux s'engagent à utiliser des normes ouvertes, et un plus petit nombre a de l'expérience dans la mise en œuvre de projets de certification numérique. Un fournisseur expérimenté devrait être en mesure de présenter des études de cas dans lesquelles son logiciel a été utilisé pour mener à bien un projet de délivrance de titres numériques à enjeu élevé. Il devrait ensuite pouvoir expliquer comment son processus pourrait être adapté aux besoins de votre établissement.

2. *Sélectionnez un fournisseur qui vous aidera à mettre au point et à exécuter un plan de mise en œuvre.* La délivrance de titres de compétences via la technologie blockchain est un domaine relativement nouveau. Dans cette perspective, ne perdez pas de vue que la gestion du changement sera un élément important dans le plan de mise en œuvre. Demandez aux fournisseurs potentiels d'évoquer leur processus d'intégration et de mise en œuvre. Demandez également comment ils vous aideront à introduire cette nouvelle initiative de certification parallèlement à vos pratiques de certification actuelles. Comment allez-vous définir les objectifs ? Comment allez-vous évaluer la réussite de votre projet ? Un partenaire solide doit être en mesure de vous aider à répondre à ces questions.

3. *Prévoyez un budget pour votre projet de certification par blockchain.* La certification par blockchain est un domaine passionnant qui s'appuie sur une nouvelle technologie de pointe pour offrir une facilité d'utilisation et une fiabilité inégalées en matière de dossiers numériques. Il s'agit toutefois d'une technologie avancée, et non d'un produit de base. Votre institution doit être prête à réserver un budget annuel pour couvrir les coûts de l'initiative ; de la même manière que vous prévoyez un budget pour la délivrance de documents électroniques sur format papier ou PDF. À terme, vous pourrez mettre en veilleuse les anciennes méthodes de délivrance de titres et potentiellement réaliser des économies en passant entièrement à un modèle de titres numériques vérifiables. Le retour financier sur investissement variera en fonction des pratiques actuelles de votre institution en matière de certification de titres et diplômes, de la sélection de votre fournisseur de titres par blockchain et du modèle de mise en œuvre. Vous pouvez demander aux candidats

fournisseurs une analyse du retour sur investissement avant de choisir votre ou vos fournisseurs, mais sachez que vous devrez pour cela révéler les coûts actuels (en temps, en personnel et en argent) de vos pratiques actuelles de certification.

Bien qu'il y ait toujours un coût associé à l'adoption de nouvelles technologies, il est temps pour les établissements d'enseignement de commencer la transition vers des titres vérifiables ancrés dans la blockchain. Non seulement la prolifération de la fraude universitaire et professionnelle doit être fermement éradiquée, mais la croissance continue de la mobilité mondiale des apprenants et des travailleurs, ainsi que les déplacements massifs dus aux conflits, aux catastrophes naturelles (y compris le changement climatique) et, plus récemment, à la pandémie, font des titres vérifiables une condition préalable essentielle non seulement pour rationaliser le mouvement des apprenants entre les établissements d'enseignement et des diplômés vers l'emploi, mais aussi pour préserver la sécurité publique alors que les gens vivent et travaillent dans des régions très variées (Jagers, s.d.[207]). Les établissements d'enseignement ayant été contraints de déplacer leurs opérations en ligne et de s'internationaliser de manière inédite en raison de la pandémie de COVID-19, le passage à des justificatifs numériques vérifiables fait désormais partie intégrante de la stratégie globale de numérisation de tout établissement.

Conclusion

Le paysage mondial de l'éducation est en train d'évoluer rapidement. D'ici à 2030, plus de 7 millions d'étudiants devraient se rendre à l'étranger pour faire des études supérieures (Holon IQ, 2018[208]). La croissance rapide des économies en développement en Asie et en Afrique devrait mettre sur le marché mondial plus de 350 millions de diplômés de l'enseignement postsecondaire et 800 millions de diplômés de l'enseignement secondaire (Holon IQ, 2018[209]). La capacité d'enseignement dans le monde est déjà mise à rude épreuve, mais plus de 100 millions de nouveaux enseignants seront nécessaires pour répondre aux besoins prévus (Holon IQ, 2018[209]).

Cela représente une opportunité majeure pour les nouvelles technologies, y compris l'intelligence artificielle, l'automatisation des processus, les marchés numériques de l'éducation et la blockchain, dans le but de faire évoluer l'infrastructure éducative mondiale. Le rôle vital de la technologie pour répondre aux besoins de cette génération d'étudiants devrait faire exploser le marché mondial des technologies de l'éducation à 10 000 milliards USD d'ici 2030 (Holon IQ, 2018[209]). Dans toutes les économies, la nécessité de nouvelles compétences et qualification axées sur la technologie est vivement ressentie.

La pandémie de COVID-19 a quelque peu ralenti les inscriptions dans l'enseignement supérieur, mais pas de manière uniforme ni permanente (Hess, 2020[210] ; Miller, 2020[211]). Ce ralentissement est une conséquence d'un mode d'enseignement de type encore fort traditionnel. Aussi précieux que soit ce modèle, il éprouve des difficultés à répondre à une pandémie de maladie transmissible et à adapter son mode de fonctionnement à un enseignement virtuel. En outre, de nombreux établissements d'enseignement supérieur de type traditionnel sont déficitaires et dépendent des dons et des subventions pour parvenir à l'équilibre financier. Nombre d'entre eux étaient déjà en situation financière précaire avant que le COVID-19 ne frappe, et la pandémie a accéléré l'insolvabilité de certains (Thys, 2020[212]).

Cependant, à mesure que les institutions s'adaptent, nous verrons probablement les inscriptions augmenter en raison de la croissance démographique prévue. Les établissements d'enseignement s'appuieront de plus en plus sur des technologies permettant de gagner du temps et de réduire les coûts pour rationaliser les opérations administratives, fournir des contenus éducatifs, effectuer des évaluations, délivrer des diplômes aux étudiants et les informer des offres d'emploi.

Quelles sont les implications pour la certification des titres de compétences ? Les compétences les plus facilement sanctionnées par des titres et des diplômes - et les titres les plus précieux sur le marché du travail - continueront probablement d'être associées aux compétences techniques, ou aux compétences qui peuvent être le plus facilement quantifiées et testées (Trilling et Fadel, 2009[213]). Les emplois et les professions nécessitant des titres de compétences resteront très probablement dans les domaines techniques et analytiques. Cela ne signifie pas, bien sûr, que les compétences non techniques ne sont pas essentielles à la réussite professionnelle (Beheshti, 2020[214]), mais seulement qu'elles sont moins faciles à quantifier, à tester et à certifier. Malgré la tendance visant à certifier un éventail plus large d'expériences d'apprentissage (Parrish, Fryer et Parks, 2017[215]), de compétences et d'aptitudes (Reed, 2016[216]), les employeurs continueront vraisemblablement à s'appuyer sur des recommandations

personnelles, des attestations d'anciens employeurs et la réputation pour évaluer les compétences non techniques des candidats potentiels.

Néanmoins, lorsque des justificatifs sont requis ou souhaités, la possibilité de les communiquer, de les recevoir et de les vérifier instantanément dans un format numérique portable et interopérable deviendra rapidement une nécessité incontournable. La blockchain est une technologie idéale pour ce faire, puisqu'elle agit comme une infrastructure de vérification numérique distribuée qui traite les enregistrements et les éléments mis en avant par les individus. Face à la volonté croissante des technologues et des décideurs de rendre aux utilisateurs le contrôle de leurs données personnelles, un mouvement international de normalisation a vu le jour pour garantir que les informations d'identification liées à la blockchain sont émises, stockées, partagées et vérifiées d'une manière qui protège la vie privée des utilisateurs et qui est indépendante de toute infrastructure d'un prestataire externe.

Le présent document a décrit la manière dont ces normes technologiques internationales pour les titres de compétences vérifiables sont appliquées dans la sphère de l'éducation. Dans la mesure où ce domaine évolue rapidement, l'environnement commercial évoqué ici sera probablement très différent dans quelques mois. En revanche, les normes décrites ici resteront probablement le tissu essentiel d'un écosystème mondial d'échange de titres de compétences qui se développe à pas de géant. Les établissements qui souhaitent mettre en œuvre un programme de vérification des titres de compétences devraient s'inspirer de ces normes pour s'assurer que leurs projets protègent la vie privée, responsabilisent les utilisateurs et garantissent la mobilité des titres de compétences pour tous.

L'adoption précoce de titres vérifiables par certains établissements a placé le secteur de l'éducation à l'avant-garde de l'une des innovations technologiques les plus importantes depuis l'avènement d'Internet : une nouvelle « couche de confiance » concernant les assertions qui peut être largement utilisée dans de nombreux secteurs et cas de figure différents. Tout comme la technologie blockchain ressemble à la version distribuée et infalsifiable d'un registre comptable, les normes relatives aux titres de compétences vérifiables sont des mécanismes permettant de détecter les falsifications et de valider la provenance et le destinataire d'un titre de compétence de manière décentralisée. Cette technologie connaîtra probablement une diffusion fulgurante dans les années à venir, les établissements cherchant à prévenir la fraude, à rationaliser le traitement et la vérification des demandes et à rendre aux utilisateurs finaux le contrôle de leurs données personnelles. Le résultat final est un écosystème qui permet aux individus de conserver leur dossier tout au long de la vie et de changer d'établissement de manière transparente, de voyager d'un pays à un autre pour y vivre, travailler et étudier.

Le monde de l'apprentissage et du travail devenant de plus en plus mobile et interconnecté, les gens ont besoin d'un niveau de confiance numérique plus élevé pour vivre, apprendre et faire des affaires ensemble. Favoriser cette confiance, c'est la perspective de la technologie blockchain et c'est là que réside toute sa valeur.

Annexe 11.A
Glossaire technique

Blockchain (chaîne de blocs) : Un type de registre distribué qui enregistre une base de données immuable de transactions. À l'origine, les blockchains avaient pour but de tenir un registre des propriétaires de devises numériques, empêchant ainsi la reproduction et la falsification des actifs numériques. La même technologie peut servir à vérifier l'intégrité et la propriété de tout actif numérique, y compris les titres et diplômes universitaires.

Cryptographie : « Écriture secrète ». Une façon de protéger les informations en utilisant des codes afin que seuls les destinataires prévus puissent lire les messages ou utiliser les informations.

Identifiant décentralisé : Un identifiant unique au niveau mondial qui ne nécessite pas l'intervention d'une autorité d'enregistrement centralisée puisqu'il est enregistré grâce à la technologie du registre distribué ou une autre forme de réseau décentralisé.

Technologie des registres distribués (DLT en anglais) : Une base de données qui est partagée et synchronisée de manière consensuelle entre plusieurs sites. Chaque site du réseau DLT gère une partie de son infrastructure et peut écrire ou accéder aux entrées partagées sur ce réseau en fonction des autorisations octroyées. Tout changement ou ajout apporté au registre est reproduit sur tous les sites. Une blockchain est un type de registre distribué, généralement assorti d'une cryptomonnaie.

Identité autosouveraine : Un ensemble de normes techniques et de principes promulgués par la communauté d'utilisateurs qui cherchent à faciliter l'évolution vers un contrôle plus individuel des identités numériques et des données personnelles.[1]

Justificatif vérifiable (VC en anglais) : Un justificatif numérique qui est inviolable et dont la provenance (l'auteur) peut être vérifiée par cryptographie.

Remarque

1. T3 Innovation Network. « Applying Self-Sovereign Identity Principles to Interoperable Learning Records: Principes, Les difficultés, and Community Guidance. » *US Chamber of Commerce Foundation*. June 2020. p. 2; https://www.uschamberfoundation.org/sites/default/files/media-uploads/Applying%20SSI%20Principles%20to%20ILRs%20Report.pdf

Références

(s.a.) (s.d.), *ND Integrated Learner Record: Phase II Project Charter*, https://docs.google.com/document/d/1hiKCNepcPQkCDHy7yFT9x613RWjK7Mjk/edit (consulté le 5 février 2021). [153]

@profesionesqro (2020), *Twitter*, https://twitter.com/profesionesqro/status/1256225566631567360. [198]

@xertifyco (le 12 juin 2020), *Twitter*, https://twitter.com/xertifyco/status/1271571738044792832. [200]

@xertifyco (le 18 juin 2020), *Twitter*, https://twitter.com/xertifyco/status/1273813449311760390. [199]

0xcert (s.d.), *Blockchain API gateway*, https://0xcert.org/ (consulté le 16 novembre 2020). [170]

Abdou, M. (2019), *MOU between Zewail City and Intelli Coders, LLC to use blockcred.io for academic credentials issuing*, Medium, https://medium.com/blockcred/mou-between-zewail-city-and-intelli-coders-llc-to-use-blockcred-io-a3124bafe143 (consulté le 26 juin 2020). [188]

Accredited Online Colleges (s.d.), *Fake Schools, Fake Degrees: Avoiding Diploma Mills*, https://www.accredited-online-college.org/avoiding-diploma-mills/ (consulté le 16 novembre 2020). [119]

Al Ali, N. et E. van der Walt (2018), *Blockchain Island Dream Is 'Calculated Risk' Says Malta Leader*, Bloomberg, https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-09-10/blockchain-island-dream-is-calculated-risk-says-malta-leader (consulté le 16 novembre 2020). [163]

Alastria (s.d.), *Alastria*, https://alastria.io/en/la-red/ (consulté le 13 novembre 2020). [49]

Alden, L. (2021), *A Century of Fiscal and Monetary Policy: Inflation vs Deflation, LynAlden.com.*, https://www.lynalden.com/fiscal-and-monetary-policy/. [15]

Ali, A. (2021), *Bitcoin is the Fastest Asset to Reach a $1 Trillion Market Cap*, Visual Capitalist, https://www.visualcapitalist.com/bitcoin-is-the-fastest-asset-to-reach-a-1-trillion-market-cap/. [19]

Allen, C. (2016), *The Path to Self-Sovereign Identity, Life with Alacrity*, http://www.lifewithalacrity.com/2016/04/the-path-to-self-soverereign-identity.html (consulté le 17 novembre 2020). [100]

Alliance, B. (s.d.), *Badge Alliance*, https://www.badgealliance.org (consulté le 28 juin 2020). [85]

Amazon (s.d.), *Blockchain on AWS*, https://aws.amazon.com/blockchain/ (consulté le 13 novembre 2020). [45]

American Chemical Society (2019), *Estimating the environmental impact of Bitcoin mining*, Science Daily, https://www.sciencedaily.com/releases/2019/11/191120080246.htm. [11]

AMSI (s.d.), *Our Schools | First in the World to Implement Blockchain-based Digital Academic Credentials for Students*, https://amsi.ae/amsi-news/183-our-schools-first-in-the-world-to-implement-blockchain-based-digital-academic-credentials-for-students (consulté le 17 novembre 2020). [184]

Arizona State University (s.d.), *Trusted Learner Network*, https://trust.asu.edu/ (consulté le 16 novembre 2020). [151]

Ark Invest (2021), *SolarBatteryBitcoin.*, Github, https://github.com/ARKInvest/SolarBatteryBitcoin (consulté le 4 mai 2021). [12]

Asia Blockchain Review (2018), *Malaysian Ministry of Education Applies Blockchain Technology as a Certificate Verification against Degree Fraud*, https://www.asiablockchainreview.com/malaysian-ministry-of-education-apply-blockchain-technology-as-a-certificate-verification-against-degree-fraud/ (consulté le 17 novembre 2020). [204]

Baydakova, A. (2019), *Bitcoin Mining Farms Are Flourishing on the Ruins of Soviet Industry in Siberia*, CoinDesk, https://www.coindesk.com/bitcoin-mining-farms-are-flourishing-on-the-ruins-of-soviet-industry-in-siberia (consulté le 17 novembre 2020). [7]

Beheshti, N. (2020), *5 Of The Most In-Demand Soft Skills Companies Are Looking For This Year*, Forbes, https://www.forbes.com/sites/nazbeheshti/2020/01/28/5-of-the-most-in-demand-soft-skills-companies-are-looking-for-this-year/?sh=5393bb2e56c7 (consulté le 17 novembre 2020). [214]

Benay, A. (2019), *Securing the future of talent mobility in the Government of Canada*, https://tbs-blog.canada.ca/en/securing-future-talent-mobility-government-canada (consulté le 13 novembre 2020). [76]

Bernard, Z. (2018), *Everything you need to know about Bitcoin, its mysterious origins, and the many alleged identities of its creator*, Business Insider, https://www.businessinsider.com/bitcoin-history-cryptocurrency-satoshi-nakamoto-2017-12?IR=T (consulté le 17 novembre 2020). [28]

Bhatia, N. (2021), *Layered Money: From Gold and Dollars to Bitcoin and Central Bank Digital Currencies.*, Nikhil Bhatia. [14]

Binance Academy (n.d.), *Byzantine Fault Tolerance Explained*, Binance Academy, https://academy.binance.com/blockchain/byzantine-fault-tolerance-explained (consulté le 25 June 2020). [4]

BitDegree (2017), *Revolutionizing Global Education with Blockchain - White Paper*, https://www.bitdegree.org/bitdegree-vision.pdf (consulté le 17 novembre 2020). [107]

Blockcerts (s.d.), *Blockcerts*, https://www.blockcerts.org (consulté le 16 novembre 2020). [111]

BlockCred (s.d.), *BlockCred*, https://www.blockcred.io/ (consulté le 17 novembre 2020). [189]

Bloxberg (2020), « *bloxberg: The Trusted Research Infrastructure* », https://bloxberg.org/wp-content/uploads/2020/02/bloxberg_whitepaper_1.1.pdf (consulté le 5 février 2021). [145]

Brody, P. (2019), *How public blockchains are making private blockchains obsolete*, Ernst & Young, https://www.ey.com/en_us/innovation/how-public-blockchains-are-making-private-blockchains-obsolete (consulté le 17 novembre 2020). [62]

Buterin, V. (2016), *Let's talk about the projected coin supply over the coming years*, Reddit, https://www.reddit.com/r/ethereum/comments/5izcf5/lets_talk_about_the_projected_coin_supply_over/dbc66rd/ (consulté le 17 novembre 2020). [60]

Cabrol, M. (2018), *Technology is Creating a Human-Centric Economy, and It's Based on Trust, Inter-American Development Bank*, https://blogs.iadb.org/caribbean-dev-trends/en/technology-is-creating-a-human-centric-economy-and-its-based-on-trust/ (consulté le 16 novembre 2020). [131]

Castillo, M. (2019), *Hyperledger Unanimously Approves First Ethereum Codebase For Enterprises*, Forbes, https://www.forbes.com/sites/michaeldelcastillo/2019/08/29/hyperledger-unanimously-approves-first-ethereum-codebase-for-enterprises/#838c037794cc (consulté le 17 novembre 2020). [43]

Castro-Iragorri, C. (2018), *Hyperledger Supporting Blockcerts Compliant Digital Diplomas across Colombian Universities*, Hyperledger Global Forum, https://hgf18.sched.com/event/G8rr/hyperledger-supporting-blockcerts-compliant-digital-diplomas-across-colombian-universities-carlos-castro-iragorri-universidad-del-rosario (consulté le 16 novembre 2020). [135]

CEF Digital (s.d.), *EBSI Documentation home*, https://ec.europa.eu/cefdigital/wiki/display/CEFDIGITALEBSI/EBSI+Documentation+home (consulté le 17 novembre 2020). [175]

CEF Digital (s.d.), *European Blockchain Services Infrastructure*, European Commission, https://ec.europa.eu/cefdigital/wiki/display/CEFDIGITAL/EBSI (consulté le 13 novembre 2020). [40]

CEF Digital (s.d.), *Use Cases and Functional Documentation*, https://ec.europa.eu/cefdigital/wiki/display/CEFDIGITALEBSI/Use+Cases+and+Functional+Documentation (consulté le 17 novembre 2020). [176]

Chainalysis (s.d.), *Chainalysis*, https://www.chainalysis.com/ (consulté le 13 novembre 2020). [63]

CNN (2020), *Almost 1 in 3 pilots in Pakistan have fake licenses, aviation minister says*, https://edition.cnn.com/2020/06/25/business/pakistan-fake-pilot-intl-hnk/index.html (consulté le 16 novembre 2020). [123]

CNN (s.d.), *University blockchain experiment aims for top marks*, https://edition.cnn.com/videos/tv/2018/06/28/blockhain-university-dubai-global-gateway.cnn (consulté le 17 novembre 2020). [183]

Cocks, P. (2017), *Malta first to launch education blockchain certification*, Malta Today, https://www.maltatoday.com.mt/news/national/80704/government_launches_first_blockhain_initiative_in_education (consulté le 16 novembre 2020). [165]

Coin Telegraph (s.d.), *What Is Lightning Network And How It Works*, Cointelegraph, https://cointelegraph.com/lightning-network-101/what-is-lightning-network-and-how-it-works (consulté le 27 juin 2020). [33]

CoinMarketCap (s.d.), *CoinMarketCap*, https://coinmarketcap.com/ (consulté le 25 juin 2020). [20]

CoinTelegraph (s.d.), *What Are Smart Contracts? Guide For Beginners*, https://cointelegraph.com/ethereum-for-beginners/what-are-smart-contracts-guide-for-beginners (consulté le 27 juillet 2020). [25]

Company Newsroom of Learning Machine (2020), *First Blockcerts Issued in India: Pallavan School and Vasant Valley School, Facilitated by Pallavan Learning Systems and Learning Machine, Issue Blockchain Credentials*, https://learningmachine.newswire.com/news/first-blockcerts-issued-in-india-pallavan-school-and-vasant-valley-21072917 (consulté le 17 novembre 2020). [205]

Company Newsroom of Learning Machine (2018), *Press Release: KAUST Set to Be First University in Middle East to Issue Blockchain Credentials Using Blockcerts Open Standard*, https://learningmachine.newswire.com/news/kaust-set-to-be-first-university-in-middle-east-to-issue-blockchain-20703496 (consulté le 17 novembre 2020). [190]

ConsenSys (2020), *Latin American and Carribean Citizens Are Coordinating COVID-19 Deconfinement With This New Ethereum Application*, ConsenSys, https://consensys.net/blog/news/latin-american-and-carribean-citizens-are-coordinating-covid-19-deconfinement-with-this-new-ethereum-application/ (consulté le 17 novembre 2020). [50]

ConsenSys (2019), *The Thirdening: What You Need To Know*, ConsenSys, https://media.consensys.net/the-thirdening-what-you-need-to-know-df96599ad857 (consulté le 17 novembre 2020). [58]

ConsenSys (s.d.), *About*, https://consensys.net/about/ (consulté le 26 juin 2020). [37]

Crace, A. (2019), *Digitary & Evernym Collaborate*, The PIE News, https://thepienews.com/news/digitary-evernym-collaborate-boost-credentialing/ (consulté le 16 novembre 2020). [162]

Credential Engine (s.d.), *Credential Transparency Description Language (CTDL) Handbook*, https://credreg.net/ctdl/handbook (consulté le 13 novembre 2020). [84]

Cuthbertson, A. (2017), *Bitcoin Mining on Track to Consume All of the World's Energy by 2020, Newsweek*, https://www.newsweek.com/bitcoin-mining-track-consume-worlds-energy-2020-744036 (consulté le 17 novembre 2020). [10]

Dagger, M. (2020), *A Comprehensive Guide to Decentralized Stablecoins*, Hackernoon, https://hackernoon.com/a-comprehensive-guide-to-decentralized-stablecoins-22f66553c807 (consulté le 17 novembre 2020). [55]

Decentralized Identity Foundation (s.d.), *Decentralized Identity Foundation*, https://identity.foundation/ (consulté le 13 novembre 2020). [93]

DiChristopher, T. (2017), *No, bitcoin isn't likely to consume all the world's electricity in 2020.*, CNBC, https://www.cnbc.com/2017/12/21/no-bitcoin-is-likely-not-going-to-consume-all-the-worlds-energy-in-2020.html (consulté le 17 novembre 2020). [9]

Digital Credentials Consortium (2020), *Building the digital credential infrastructure for the future*, https://digitalcredentials.mit.edu/wp-content/uploads/2020/02/white-paper-building-digital-credential-infrastructure-future.pdf. [146]

Dinkins, D. (2017), *SegWit Locked-in, But Questions Remain About Bitcoin's Level of Decentralization*, CoinTelegraph, https://cointelegraph.com/news/Bitcoin-is-decentralized-but-not-distributed-and-that-fact-likely-contributed-to-Bitcoins-civil-war (consulté le 17 novembre 2020). [36]

Du Seuil, D. et C. Pastor (2019), *Understanding the European Self-Sovereign Identity Framework (ESSIF)*, https://ssimeetup.org/understanding-european-self-sovereign-identity-framework-essif-daniel-du-seuil-carlos-pastor-webinar-32/ (consulté le 13 novembre 2020). [79]

Durant, E. (2017), *Digital Diploma debuts at MIT*, MIT News, https://news.mit.edu/2017/mit-debuts-secure-digital-diploma-using-bitcoin-blockchain-technology-1017 (consulté le 16 novembre 2020). [138]

Education, T. (s.d.), *The Internet of Education*, https://docs.google.com/document/d/1tWiaiU95OvS_ktVDbSjQlwl6CZVUzgikWuTunTde8U0/edit (consulté le 13 novembre 2020). [97]

Enterprise Ethereum Alliance (n.d.), *Entethalliance*, https://entethalliance.org/ (consulté le 13 novembre 2020). [38]

EthHub (s.d.), *Monetary Policy*, https://docs.ethhub.io/ethereum-basics/monetary-policy/ (consulté le 13 novembre 2020). [57]

EU Blockchain Observatory and Forum (2019), *EU Blockchain Observatory and Forum: Workshop Report, e-Identity, Brussels, November 7 2019*, https://www.eublockchainforum.eu/sites/default/files/reports/workshop_5_report_-_e-identity.pdf. [80]

European Commission (s.d.), *ESCO and the new Europass: occupations and skills for lifelong career management*, https://ec.europa.eu/esco/portal/news/fd542061-178a-4a04-81ae-b3b0eccb3edd (consulté le 17 novembre 2020). [178]

Everis (European Commission) (s.d.), *Europass framework for digitally-signed credentials*, https://ec.europa.eu/futurium/en/system/files/ged/europass_background-info_framework-digitally-signed-credentials.pdf (consulté le 17 novembre 2020). [179]

Ezell, A. et J. Bear (2012), *Degree Mills: The Billion-dollar Industry That Has Sold Over A Million Fake Diplomas*, Prometheus Books. [120]

Federation of State Medical Boards (2019), *Healthcare and Digital Credentials: Technical, Legal, and Regulatory Considerations*, https://www.fsmb.org/digitalcredentials/ (consulté le 16 novembre 2020). [113]

Fitzpatrick, L. (2020), *Expect A Huge Backlash If Stablecoins Are Banned*, Forbes, https://www.forbes.com/sites/lukefitzpatrick/2020/04/27/expect-a-huge-backlash-if-stablecoins-are- banned/#634415c261d2. [56]

Foxley, W. (2020), *Vitalik Buterin Clarifies Remarks on Expected Launch Date of Eth 2.0.*, CoinDesk, https://www.coindesk.com/vitalik-buterin-clarifies-remarks-on-expected-launch-date-of-eth-2-0. [29]

Friedman, S. (2019), *Union Public Schools Launches Blockchain-Based Credentials*, https://thejournal.com/articles/2019/04/30/union-public-schools-launches-blockchain-based-credentials.aspx. [140]

Gibson, K. (2017), *Your MD may have a phony degree*, CBS News, https://www.cbsnews.com/news/your-md-may-have-a-phony-degree/ (consulté le 16 novembre 2020). [122]

Global Blockchain Business Council (s.d.), *Chain Reaction: Blockchain Enters the Mainstream - 2020 annual report*, https://www.lw.com/thoughtLeadership/gbbc-report-blockchain-enters-mainstream (consulté le 17 novembre 2020). [191]

Government of Canada Talent Cloud (s.d.), *Talent Cloud*, https://talent.canada.ca/en (consulté le 16 novembre 2020). [158]

GradBase (s.d.), *GradBase*, https://www.gradba.se/en/ (consulté le 16 novembre 2020). [171]

Grech, A. et A. Camilleri (2017), *Blockchain in Education*, European Commission Joint Research Centre | Edited by Andreia Inamorato dos Santos, https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC108255/jrc108255_blockchain_in_education(1).pdf. [130]

Greenspoon, A. (2018), *The value of 'free agents' inside the public service*, Policy Options, https://policyoptions.irpp.org/magazines/november-2018/the-value-of-free-agents-inside-the-public-service/ (consulté le 16 novembre 2020). [159]

Hague Convention (1961), *Convention Abolishing the Requirement of Legalisation for Foreign Public Documents*, https://www.hcch.net/en/instruments/conventions/full-text/?cid=41. [126]

Hamdani, Z. (2020), *ARUCC teams up with Digitary to build Made for Canada network*, Global Education Times, https://www.globaleducationtimes.org/news/north-america/arucc-teams-up-with-digitary-to-build-made-for-canada-network/1690/?fbclid=IwAR271A6g9UK3yjtND-Uclm3ymmD3h8hBToEsPa_MG4hUdjAjzvODMD81I0E (consulté le 16 novembre 2020). [161]

Hargrave, S. et E. Karnoupakis (2020), *Blockchain Success Stories: Case Studies from the Leading Edge of Business*, O'Reilly Media. [137]

Hess, A. (2020), *College enrollment is down because of the pandemic—and community colleges have been hit the hardest*, CNBC, https://www.cnbc.com/2020/10/01/how-the-coronavirus-pandemic-has-impacted-college-enrollment.html (consulté le 17 novembre 2020). [210]

HKUST Academic Registry (s.d.), *Electronic Documents Verification Program*, https://registry.ust.hk/verify/info (consulté le 17 novembre 2020). [206]

Holon IQ (2018), *Education in 2030: The $10 Trillion dollar question*, https://www.holoniq.com/2030/ (consulté le 17 novembre 2020). [209]

Holon IQ (2018), *Global Student Flows*, https://www.holoniq.com/global-student-flows (consulté le 17 novembre 2020). [208]

Hyland Credentials (s.d.), *Customer Stories*, https://www.hylandcredentials.com/customer-stories (consulté le 16 novembre 2020). [115]

Hyland Newsroom (2020), New Mexico Higher Education Department selects Hyland Credentials for Higher Education, https://news.hyland.com/new-mexico-higher-education-department-selects-hyland-credentials-for-higher-education/ (consulté le 16 novembre 2020). [144]

IBM (s.d.), *IBM Blockchain Services. Blockchain consulting that turns strategy into business outcomes.*, https://www.ibm.com/blockchain/services/ (consulté le 13 novembre 2020). [46]

IEEE (s.d.), *Learning Technology Standards Committee (LTSC)*, https://sagroups.ieee.org/ltsc/ (consulté le 13 novembre 2020). [94]

IMS Global (s.d.), *Comprehensive Learner Record*, https://www.imsglobal.org/activity/comprehensive-learner-record (consulté le 13 novembre 2020). [86]

Indorse (s.d.), *Indorse*, https://indorse.io/metamorph (consulté le 17 novembre 2020). [203]

Insights, L. (2020), *South Korea has global ambitions for decentralized identity systems*, https://www.ledgerinsights.com/south-korea-decentralized-identity-ambitions/ (consulté le 13 novembre 2020). [78]

Internet Identity Workshop (s.d.), *Internet Identity Workshop*, https://internetidentityworkshop.com/ (consulté le 28 juin 2020). [88]

Internet of Education (s.d.), *Internet of Education*, https://www.internetofeducation.org/ (consulté le 13 novembre 2020). [96]

Jagers, C. (2018), *The Blockchain in Education*, Learning Machine Blog, https://medium.com/learning-machine-blog/the-blockchain-in-education-5a322fe9fe86. [110]

Jagers, C. (s.d.), *A Passport to Greater Opportunity*, Learning Machine Blog, https://www.learningmachine.com/passport-greater-opportunity/ (consulté le 17 novembre 2020). [207]

Jagers, C. (s.d.), *Future Proof*, Learning Machine Blog, https://www.learningmachine.com/future-proof (consulté le 16 novembre 2020). [136]

Jamaica Observer (2019), *CXC to provide students with e-certificates after successful trial*, http://www.jamaicaobserver.com/latestnews/CXC_to_provide_students_with_e-certificates_after_successful_trial?profile=1228 (consulté le 17 novembre 2020). [195]

Jessel, B. (2020), *Ethereum, Fabric, Corda, And Multichain. Only One Is Government Ready - New Report*, Forbes, https://www.forbes.com/sites/benjessel/2020/04/21/ethereum-fabric-corda-and-multichain-only-one-is-government-readynew-report/#4f0443ae263b. [53]

Jonkers, R. (2018), *SAP Blockchain for Higher Education*, https://www.slideshare.net/RobJonkers/sap-blockchain-for-higher-education (consulté le 16 novembre 2020). [169]

Kar, I. (2016), *The developers behind Ethereum are hacking the hacker that hacked it*, QZ, https://qz.com/713078/the-developers-behind-ethereum-are-hacking-the-hacker-that-hacked-it/ (consulté le 24 novembre 2020). [34]

Kelly, R. (2018), *Southern New Hampshire U Issues Blockchain Credentials to College for America Grads*, https://campustechnology.com/articles/2018/06/11/southern-new-hampshire-u-issues-blockchain-credentials-to-college-for-america-grads.aspx (consulté le 16 novembre 2020). [139]

Kenobit, O. (2018), *Hyperbitcoinization: Winner Takes All*, Medium, https://medium.com/coinmonks/hyperbitcoinization-winner-takes-all-69ab59f9695f (consulté le 24 novembre 2020). [17]

Konings, L. (2019), *Electronic Platform for Adult Learning in Europe (EPALE): EMC launches Common Microcredential Framework*, https://epale.ec.europa.eu/en/content/emc-launches-common-microcredential-framework (consulté le 24 novembre 2020). [83]

Krawisz, D. (2014), *Hyperbitcoinization, Satoshi Nakamoto Institute*, Satoshi Nakamoto Institute, https://nakamotoinstitute.org/mempool/hyperbitcoinization/ (consulté le 24 novembre 2020). [16]

La Fuente Querétaro (2020), *Profesionistas podrán tramitar cédula en línea*, https://periodicolafuente.com/profesionistas-tramitar-cedula-en-linea/ (consulté le 17 novembre 2020). [197]

Learning Economy Foundation (s.d.), *Broward OpenCLR Lab*, https://www.learningeconomy.io/browardlab (consulté le 16 novembre 2020). [154]

Learning Economy Foundation (s.d.), *C-Lab: A Learning Economy Co-Lab*, https://www.learningeconomy.io/clab (consulté le 16 novembre 2020). [152]

Learning Economy Foundation (s.d.), *Learning Economy Foundation*, https://www.learningeconomy.io/ (consulté le 13 novembre 2020). [95]

Learning Economy Foundation (s.d.), *Memo: AP-Lab Co-Lab Learning Ecosystems for the Asia-Pacific Region*, https://docs.google.com/document/d/1pzdcZdus734OF2olk1ZZjFY6vdjZY3G8-IVPZlqf4cA/edit#heading=h.9tijzbwkqbxf (consulté le 24 novembre 2020). [155]

Learning Economy Foundation (s.d.), *Roadmap*, https://www.learningeconomy.io/#Roadmap (consulté le 16 novembre 2020). [109]

Learning Machine (2018), *Blockcerts Enables Multi-Chain Issuing and Verification of Official Documents*, https://learningmachine.newswire.com/news/blockcerts-enables-multi-chain-issuing-and-verification-of-official-20680828 (consulté le 16 novembre 2020). [134]

Learning Machine Company Newsroom (2019), *Press Release: Maryville University Partners With Learning Machine to Issue Digital Diplomas Using Blockcerts*, https://learningmachine.newswire.com/news/maryville-university-partners-with-learning-machine-to-issue-digital-21036653 (consulté le 24 novembre 2020). [142]

Learning Machine Newsroom (2016), *Learning Machine and MIT Media Lab Release Blockchain Technology for Educational Credentials*, https://learningmachine.newswire.com/news/learning-machine-and-mit-media-lab-release-blockchain-technology-for-11633933 (consulté le 16 novembre 2020). [114]

Ledger Insights (2020), *Workday sees blockchain as key to employee credentialing*, https://www.ledgerinsights.com/workday-blockchain-employee-credentialing/ (consulté le 16 novembre 2020). [148]

Leising, M. et O. Kharif (2020), *Ethereum Races Clock to Collect Enough Coins for Big Upgrade*, Bloomberg, https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-11-23/ethereum-races-clock-to-collect-enough-coins-for-huge-upgrade. [27]

Lemoie, K. et L. Souares (2020), *Connected Impact: Unlocking Education and Workforce Opportunity through Blockchain*, American Council on Education, https://www.acenet.edu/Documents/ACE-Education-Blockchain-Initiative-Connected-Impact-June2020.pdf (consulté le 24 novembre 2020). [44]

Longino Torres, J. (2019), *¡Hola, futuro! Inicia Tec era de títulos universitarios en blockchain*, Tecnologico de Monterrey, https://tec.mx/es/noticias/nacional/educacion/hola-futuro-inicia-tec-era-de-titulos-universitarios-en-blockchain?&utm_source=twitter&utm_medium=social-media&utm_campaign=addtoany (consulté le 17 novembre 2020). [192]

Longstaff, B. (2018), *Why hashed Personally identifiable information (PII) on the blockchain can be safe*, Medium, https://medium.com/meeco/why-hashed-personally-identifiable-information-pii-on-the-blockchain-can-be-safe-b842357b9663 (consulté le 24 novembre 2020). [66]

Maaghul, R. (2019), *Why ODEM is building on the Ethereum blockchain*, ODEM Blog, https://blogs.odem.io/why-odem-is-building-on-the-ethereum-blockchain (consulté le 24 novembre 2020). [106]

Malone, K. (2020), *Blockchain Saving HHS $30M on First Accelerate Contract*, MeriTalk, https://www.meritalk.com/articles/blockchain-saving-hhs-30m-on-first-accelerate-contract/ (consulté le 24 novembre 2020). [54]

McCauley, A. (2019), *Unblocked: How Blockchain will Change Your Business (and What to Do About It)*, O'Reilly. [129]

McMaster University Office of the Registrar (s.d.), *Digital diplomas*, https://registrar.mcmaster.ca/digitaldiplomas/#:~:text=McMaster%20University%20issues%20graduates%20a,protect%20and%20verify%20the%20diploma (consulté le 16 novembre 2020). [116]

McSpadden, K. (2017), *Ngee Ann Polytechnic to pilot blockchain diplomas*, partners Attores, e27, https://e27.co/ngee-ann-polytechnic-to-pilot-blockchain-diplomas-partners-attores-20170526/ (consulté le 17 novembre 2020). [202]

McWhinney, J. (2019), *Why Governments Are Afraid of Bitcoin.*, Investopedia, https://www.investopedia.com/articles/forex/042015/why-governments-are-afraid-bitcoin.asp (consulté le 24 novembre 2020). [21]

Mearian, L. (2018), *Will Blockchain Run Afoul of GDPR? (Yes and no)*, Computerworld, https://www.computerworld.com/article/3269750/will-blockchain-run-afoul-of-gdpr-yes-and-no.html (consulté le 24 novembre 2020). [65]

Meetup (2020), *[Hyperledger SF] Workday and AWS discuss Hyperledger Fabric [Mon, Feb 24]*, https://www.meetup.com/Hyperledger-SF/events/267518767/ (consulté le 16 novembre 2020). [149]

Messari (2019), *Timechains*, https://messari.io/article/timechains (consulté le 24 novembre 2020). [13]

Messari.io. (2019), *On-chain Governance*, https://messari.io/article/on-chain-governance (consulté le 24 novembre 2020). [32]

Miller, L. (2020), *Four Bright Spots in a Year That's Irreversibly Changed Higher Ed Admissions*, Liaison International for Inside Higher Ed, https://narratives.insidehighered.com/bright-spots-year-changed-admissions/index.html (consulté le 17 novembre 2020). [211]

MIT Media Lab (s.d.), *Digital Certificates Project*, https://certificates.media.mit.edu/ (consulté le 16 novembre 2020). [133]

MIT Media Lab (s.d.), *Project: Digital Academic Credentials*, https://www.media.mit.edu/projects/media-lab-digital-certificates/overview/ (consulté le 16 novembre 2020). [132]

MIT Open Learning (2020), *University-led Digital Credentials Consortium explores technology for digital academic credentials*, https://openlearning.mit.edu/news/university-led-digital-credentials-consortium-explores-technology-digital-academic-credentials (consulté le 24 novembre 2020). [90]

Morris, C. (2018), *Bitcoin Mining Uses More Energy Than Homes Do in Iceland*, Fortune, https://fortune.com/2018/02/13/iceland-bitcoin-mining-electricity/ (consulté le 24 novembre 2020). [8]

Moskov, A. (2018), *What is the Byzantine Generals Problem?*, CoinCentral, https://coincentral.com/byzantine-generals-problem/ (consulté le 9 novembre 2020). [2]

Munro, A. (2018), *Good clean use case: Bahamian students graduate on the blockchain*, finder, https://www.finder.com.au/good-clean-use-case-bahamian-students-graduate-on-the-blockchain (consulté le 17 novembre 2020). [194]

Muzzy, E. (2020), *What Is Proof of Stake?*, Consensys Blog, https://consensys.net/blog/blockchain-explained/what-is-proof-of-stake/ (consulté le 24 novembre 2020). [30]

Nakamoto, S. (2008), *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*, http://www.bitcoin.org (consulté le 24 novembre 2020). [1]

Nuzzi, L. (2019), *Schnorr Signatures & The Inevitability of Privacy in Bitcoin*, Medium, https://medium.com/digitalassetresearch/schnorr-signatures-the-inevitability-of-privacy-in-bitcoin-b2f45a1f7287 (consulté le 24 novembre 2020). [18]

OECD (2005), *Guidelines for quality provision in cross-border higher education*, http://www.oecd.org/education/innovation-education/35779480.pdf. [125]

OECD (2004), *Internationalisation and Trade in Higher Education*, OECD, http://dx.doi.org/10.1787/9789264015067-en. [124]

OpenCerts (s.d.), *Collaborate*, https://opencerts.io/collaborate (consulté le 13 novembre 2020). [77]

OpenCerts (s.d.), *OpenCerts*, https://opencerts.io/ (consulté le 16 novembre 2020). [118]

Oracle (s.d.), *Oracle Blockchain Enterprise Edition*, https://www.oracle.com/database/technologies/blockchain-platform-enterprise-edition.html (consulté le 13 novembre 2020). [47]

Parisi, B. (2018), *Woolf University: Will Blockchain Make College Affordable?*, In the Mesh, https://inthemesh.com/archive/woolf-university-will-the-blockchain-make-college-more-affordable/ (consulté le 24 novembre 2020). [104]

Parrish, J., J. Fryer et R. Parks (2017), *Expanding the Academic Record: Revolutionizing Credentials*, NACE, https://www.naceweb.org/job-market/trends-and-predictions/expanding-the-academic-record-revolutionizing-credentials/ (consulté le 17 novembre 2020). [215]

Pisani, B. (2018), *Bitcoin and ether are not securities, but some initial coin offerings may be*, SEC official says, CNBC, https://www.cnbc.com/2018/06/14/bitcoin-and-ethereum-are-not-securities-but-some-cryptocurrencies-may-be-sec-official-says.html#close (consulté le 24 novembre 2020). [24]

Pistis.io (s.d.), *Pistis.io*, https://pistis.io/welcome/ (consulté le 16 novembre 2020). [150]

Prince Consulting (s.d.), *Prince Consulting*, http://princeconsulting.biz/ (consulté le 17 novembre 2020). [201]

Purifoy, C. et J. Smith (2018), *G20: Of Currency, New Gold Standards & Rocket Fuel to Coordinate Global Impact*, G20 Leaders Summit Magazine, https://www.learningeconomy.io/post/g20-cover-story-of-currency-new-gold-standards-and-rocket-fuel-to-coordinate-global-impact (consulté le 24 novembre 2020). [108]

PwC UK (s.d.), *Smart Credentials*, https://www.pwc.co.uk/blockchain/smart-credentials.html (consulté le 16 novembre 2020). [172]

Quorum (s.d.), *Quorum*, https://www.goquorum.com/ (consulté le 13 novembre 2020). [41]

Reed, M. (2016), *Co-Curricular Transcripts? Questions about a potentially good idea*, Inside Higher Ed., https://www.insidehighered.com/blogs/confessions-community-college-dean/co-curricular-transcripts (consulté le 17 novembre 2020). [216]

Renieris, E. (2020), *SSI? What we really need is full data portability*, Women in Identity Blog, https://womeninidentity.org/2020/03/31/data-portability/ (consulté le 24 novembre 2020). [99]

Salas, R. (2018), *CNM named 'Innovator of the Year' for their use of blockchain tech*, KOB4, https://www.kob.com/albuquerque-news/cnm-named-innovator-of-the-year-for-their-use-of-blockchain-tech-/5189370/ (consulté le 16 novembre 2020). [143]

Sansone, K. (2019), *Malta is first country to put education certificates on blockchain*, Malta Today, https://www.maltatoday.com.mt/news/national/93148/malta_is_first_country_to_put_education_certificates_on_blockchain#.XG67xpNKg0o (consulté le 16 novembre 2020). [166]

SAP (s.d.), *Intelligent Technologies*, https://www.sap.com/products/intelligent-technologies/blockchain.html (consulté le 13 novembre 2020). [48]

Shahada (s.d.), *Shahada*, https://www.shahada.ae/ (consulté le 2 novembre 2020). [186]

Sharma, R. (2019), *What is the Enterprise Ethereum Alliance?*, Investopedia, https://www.investopedia.com/tech/what-enterprise-ethereum-alliance/ (consulté le 24 novembre 2020). [39]

Sharma, R. (2019), *Why Is Ethereum Co-founder Proposing a Hard Cap?*, Investopedia, https://www.investopedia.com/news/why-ethereum-cofounder-proposing-hard-cap/ (consulté le 24 novembre 2020). [59]

Sharma, R. (2019), *Zero Knowledge Proofs' Could Boost Blockchain Adoption on Wall Street*, Investopedia, https://www.investopedia.com/news/zero-knowledge-proofs-could-boost-blockchain-adoption-wall-street/ (consulté le 24 novembre 2020). [67]

Sharma, R. (2018), *SEC Official Declares Ether Is Not a Security*, Investopedia, https://www.investopedia.com/news/sec-officially-declares-ether-not-security/#:~:text=Ether%20is%20not%20a%20security%2C%20according%20to%20Bill%20Hinman%2C%20U.S.,Commission%20Director%20of%20Corporate%20Finance.&text=After%20Bitcoin%2C%20ether%20is%20th (consulté le 24 novembre 2020). [23]

Shin, A. (2020), *Hyperledger Fabric vs R3 Corda: A Business Perspective*, Medium, https://medium.com/@kaishinaw/hyperledger-fabric-vs-r3-corda-a-business-perspective-cf935824de9 (consulté le 24 novembre 2020). [52]

Siegel, D. (2016), *Understanding the DAO Attack*, CoinDesk, https://www.coindesk.com/understanding-dao-hack-journalists (consulté le 24 novembre 2020). [35]

Sixtin, E. (2017), *Malta Introduces First Blockcerts Pilot in Europe*, BTCManager, https://btcmanager.com/malta-introduces-first-blockcerts-pilot-in-europe/ (consulté le 16 novembre 2020). [164]

Smart Dubai 2021 (s.d.), *Smart Dubai 2021*, https://2021.smartdubai.ae/ (consulté le 24 novembre 2020). [181]

SmartDegrees (s.d.), *SmartDegrees*, https://www.smartdegrees.es/en/home-en/ (consulté le 16 novembre 2020). [167]

Smartworld (2020), *Press Release: Smartworld and Grape Technology announced the launch of Shahada, a digital certificate protocol built on blockchain technology*, https://www.smartworld.com/smartworld-and-grape-technology-announced-the-launch-of-shahada-a-digital-certificate-protocol-built-on-blockchain-technology/ (consulté le 17 novembre 2020). [185]

Smolenski, N. (dir. pub.) (s.d.), *Interview with Lluís Alfons Ariño Martín, Convenor of the Digital Diplomas Use Case for the EBSI.* [177]

Smolenski, N. (dir. pub.) (2018), *Conversation with a private tutor living and working in China.* [121]

Smolenski, N. (2016), *Identity and Digital Self-Sovereignty*, Medium, https://medium.com/learning-machine-blog/identity-and-digital-self-sovereignty-1f3faab7d9e3 (consulté le 24 novembre 2020). [98]

Southside Daily Staff (2018), *Here's a new way ECPI University is issuing its degrees*, Wydaily, https://wydaily.com/local-news/2018/11/05/heres-a-new-way-ecpi-university-is-issuing-its-degrees/ (consulté le 16 novembre 2020). [141]

Steenis, H. (2017), *Bitcoin's bite: why central banks should clamp down on cryptocurrencies*, Schroders, https://www.schroders.com/en/uk/private-investor/insights/markets/bitcoins-bite-why-central-banks-should-clamp-down-on-cryptocurrencies/ (consulté le 24 novembre 2020). [22]

SYSARTEC (2020), *LinkedIn*, https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:6745799560867700736/ (consulté le 4 mai 2020). [193]

T3 Innovation Network (2020), *Applying Self-Sovereign Identity Principles to Interoperable Learning Records: Principles, Challenges, and Community Guidance*, US Chamber of Commerce Foundation, https://www.uschamberfoundation.org/sites/default/files/media-uploads/Applying%20SSI%20Principles%20to%20ILRs%20Report.pdf (consulté le 24 novembre 2020). [101]

Talent Cloud | Nuage de talents (2018), *Twitter*, https://twitter.com/GC_Talent/status/1066820323490897921 (consulté le 24 novembre 2020). [157]

Temple, J. (2019), *Bitcoin mining may be pumping out as much CO2 per year as Kansas City.*, MIT Technology Review, https://www.technologyreview.com/2019/06/12/873/bitcoin-mining-may-be-pumping-out-as-much-cosub2-sub-per-year-as-kansas-city/ (consulté le 24 novembre 2020). [6]

Texas Blockchain Council (2021), *Hyland and Hedera Hashgraph Present Blockchain Proof of Concept for Records Verification to Texas Secretary of State*, https://www.prnewswire.com/news-releases/hyland-and-hedera-hashgraph-present-blockchain-proof-of-concept-for-records-verification-to-texas-secretary-of-state-301204696.html?tc=eml_cleartime. [128]

The Linux Foundation (2020), *Cross-Industry Coalition Advances Digital Trust Standards*, https://www.linuxfoundation.org/press-release/2020/05/cross-industry-coalition-advances-digital-trust-standards/ (consulté le 13 novembre 2020). [92]

The Open University (s.d.), *Open Blockchain*, https://blockchain.open.ac.uk/ (consulté le 16 novembre 2020). [173]

The Open University (s.d.), *QualiChain*, https://qualichain-project.eu/ (consulté le 16 novembre 2020). [174]

The Sovrin Foundation (2018), *The Sovrin Network and Zero Knowledge Proofs*, The Sovrin Foundation, https://sovrin.org/the-sovrin-network-and-zero-knowledge-proofs/ (consulté le 13 novembre 2020). [68]

The United Arab Emirates' Government portal (s.d.), *Emirates Blockchain Strategy 2021*, https://u.ae/en/about-the-uae/strategies-initiatives-and-awards/federal-governments-strategies-and-plans/emirates-blockchain-strategy-2021 (consulté le 17 novembre 2020). [180]

Thys, F. (2020), *One Third Of Private 4-Year Colleges Are At High Risk Financially, Model Predicts*, WBUR, https://www.wbur.org/edify/2020/05/08/higher-education-financial-crisis (consulté le 17 novembre 2020). [212]

Treasury Board of Canada Secretariat (2018), *Canada's trusted digital identity vision*, https://www.canada.ca/en/treasury-board-secretariat/corporate/news/canada-trusted-digital-identity-vision.html (consulté le 16 novembre 2020). [156]

Trilling, B. et C. Fadel (2009), *21st Century Skills: Learning for Life in Our Times*, John Wiley And Sons, Inc. [213]

Trust Over IP Foundation (n.d.), *Trust Over IP Foundation*, https://trustoverip.org/ (consulté le 13 novembre 2020). [91]

UAEU (2019), *United Arab Emirates University Launches UAEU Passport, University-Wide Blockchain Applications to Streamline Student Services*, https://www.uaeu.ac.ae/en/news/2019/feb/uaeu_passport.shtml (consulté le 17 novembre 2020). [182]

Universidad Carlos III de Madrid (2018), A*creditaciones de Competencias Utilizando la Tecnología Blockchain en Cursos Spocs*, https://www.uc3m.es/sdic/articulos/2018/acreditaciones-utilizando-blockchain (consulté le 16 novembre 2020). [117]

US Chamber of Commerce Foundation (s.d.), *The T3 Innovation Network*, https://www.uschamberfoundation.org/t3-innovation (consulté le 13 novembre 2020). [89]

US Department of Homeland Security (2019), *News Release: DHS Awards $199K for Blockchain Credential Lifecycle Management*, https://www.dhs.gov/science-and-technology/news/2019/11/14/news-release-dhs-awards-199k-blockchain-tech (consulté le 13 novembre 2020). [74]

US Department of Homeland Security (2019), *News Release: DHS Awards 159K for Infrastructure to Prevent Credential Fraud*, https://www.dhs.gov/science-and-technology/news/2019/11/12/news-release-dhs-awards-159k-prevent-credential-fraud (consulté le 13 novembre 2020). [72]

US Department of Homeland Security (2017), *News Release: DHS S&T Awards $750K to Virginia Tech Company for Blockchain Identity Management Research and Development*, https://www.dhs.gov/science-and-technology/news/2017/09/25/news-release-dhs-st-awards-750k-virginia-tech-company (consulté le 13 novembre 2020). [73]

US Department of State, Bureau of Consular Affairs (s.d.), *Apostille Requirements*, https://travel.state.gov/content/travel/en/records-and-authentications/authenticate-your-document/apostille-requirements.html (consulté le 16 novembre 2020). [127]

Vander Ark, T. (2018), *Imagining a Blockchain University*, Forbes, https://www.forbes.com/sites/tomvanderark/2018/06/13/woolf-building-the-first-blockchain-university/?sh=41e45cff5ae5. [103]

Varshney, N. (2018), *Ethereum's supply has crossed 100M, here's what that means*, TheNextWeb, https://thenextweb.com/hardfork/2018/06/11/ethereums-total-supply/ (consulté le 24 novembre 2020). [61]

VON (s.d.), *Verifiable Organizations Network: Global Digital Trust for Organizations*, https://vonx.io/ (consulté le 13 novembre 2020). [75]

Vottun (s.d.), *Vottun*, http://vottun.com (consulté le 16 novembre 2020). [168]

W3C (s.d.), *Decentralized Identifiers (DIDs) v1.0*, https://w3c.github.io/did-core/ (consulté le 28 June 2020). [71]

W3C (s.d.), *Educational and Occupational Credentials in Schema.org Community Group*, https://www.w3.org/community/eocred-schema/ (consulté le 25 June 2020). [82]

W3C (s.d.), *Facts about W3C*, https://www.w3.org/Consortium/facts.html (consulté le 13 novembre 2020). [69]

W3C (s.d.), *Verifiable Credentials Data Model 1.0*, https://www.w3.org/TR/vc-data-model/ (consulté le 24 novembre 2020). [70]

W3C (s.d.), *Verifiable Credentials for Education Task Force*, https://w3c-ccg.github.io/vc-ed/ (consulté le 13 novembre 2020). [81]

Watkins, R. (2020), *Power and Seigniorage in Proof of Stake*, Messari.io, https://messari.io/article/power-and-seigniorage-in-proof-of-stake (consulté le 24 novembre 2020). [31]

Web of Trust (s.d.), *Rebooting Web of Trust*, https://www.weboftrust.info/ (consulté le 13 novembre 2020). [87]

Weinstein, J. (2015), *How can law enforcement leverage the blockchain in investigations?*, Coin Center, https://coincenter.org/entry/how-can-law-enforcement-leverage-the-blockchain-in-investigations (consulté le 24 novembre 2020). [64]

Wikipedia (s.d.), *Byzantine fault*, https://en.wikipedia.org/wiki/Byzantine_fault (consulté le 25 June 2020). [3]

Wikipedia (s.d.), *Decentralized applications*, https://en.wikipedia.org/wiki/Decentralized_application#:~:text=A%20decentralized%20application%20(DApp%2C%20dApp,referred%20to%20as%20smart%20contracts (consulté le 27 juillet 2020). [26]

Wikipedia (s.d.), *Hyperledger*, https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperledger (consulté le 28 June 2020). [42]

Wikipedia (s.d.), *Mozilla Open Badges*, https://en.wikipedia.org/wiki/Mozilla_Open_Badges (consulté le 26 June 2020). [112]

Wikipedia (s.d.), *Proof of work*, https://en.wikipedia.org/wiki/Proof_of_work (consulté le 25 June 2020). [5]

Wikipedia (s.d.), *R3 (company)*, https://en.wikipedia.org/wiki/R3_(company) (consulté le 28 June 2020). [51]

Woolf University (s.d.), *Woolf University*, https://woolf.university/ (consulté le 26 June 2020). [105]

Workday Credentials (s.d.), *Workday Credentials & WayTo™ By Workday*, https://credentials.workday.com/docs/overview/ (consulté le 16 novembre 2020). [147]

World Government Summit et al. (2018), *Case Study: Free Agents and GC Talent Cloud – Canada, Embracing Innovation in Government*, https://www.oecd.org/gov/innovative-government/Canada-case-study-UAE-report-2018.pdf (consulté le 24 novembre 2020). [160]

Xertify (s.d.), *Xertify*, https://xertify.co/ (consulté le 17 novembre 2020). [196]

Young, J. (2018), *Academics Propose a 'Blockchain University,' Where Faculty (and Algorithms) Rule*, EdSurge, https://www.edsurge.com/news/2018-10-25-academics-propose-a-blockchain-university-where-faculty-and-algorithms-rule. [102]

Zawya (2020), *Press Release: University of Dubai successfully publish e-Credentials of graduates on blockchain platform*, https://www.zawya.com/mena/en/press-releases/story/University_of_Dubai_successfully_publish_eCredentials_of_graduates_on_blockchain_platform-ZAWYA20200901071849/ (consulté le 17 novembre 2020). [187]

Les auteurs

Ryan Baker

Ryan Baker est professeur associé à l'Université de Pennsylvanie et directeur du Penn Center for Learning Analytics. Son laboratoire mène des recherches sur l'implication et l'apprentissage robuste dans des environnements d'apprentissage en ligne et mixte, dans le but d'identifier des indicateurs qui peuvent être exploités aujourd'hui et qui permettent de prédire les résultats futurs des apprenants. M. Baker a développé des modèles permettant de détecter automatiquement l'implication des apprenants dans plus d'une douzaine d'environnements d'apprentissage en ligne. Il a dirigé le développement d'un protocole d'observation et d'une application pour observer l'implication des apprenants sur le terrain. Ces deux outils ont été utilisés par plus de 160 chercheurs dans 7 pays. Les modèles d'analyse prédictive qu'il a contribué à développer ont été utilisés au bénéfice de plus d'un million d'apprenants, plus de cent mille personnes ont suivi les MOOC qu'il a organisés. Il a également coordonné des études longitudinales sur plus d'une décennie. Il a été le président fondateur de l'International Educational Data Mining Society, est actuellement rédacteur en chef de la revue *Computer-Based Learning* in Context et rédacteur en chef adjoint de deux revues. Il a été le premier directeur technique du DataShop du Pittsburgh Science of Learning Center et est actuellement codirecteur du MOOC Replication Framework (MORF). M. Baker a coécrit des articles avec plus de 300 collègues.

Tony Belpaeme

Tony Belpaeme est professeur à l'Université de Gand et professeur en robotique et systèmes cognitifs à l'Université de Plymouth, au Royaume-Uni. Il a obtenu son doctorat en informatique à la Vrije Universiteit Brussel (VUB) et dirige actuellement une équipe qui étudie la robotique cognitive et l'interaction être humain-robot. Il a coordonné le projet H2020 L2TOR, qui étudie comment les robots peuvent aider les enfants à apprendre une deuxième langue, et a coordonné le projet FP7 ALIZ-E, qui a étudié l'interaction être humain-robot et son utilisation dans des applications pédiatriques. Il a travaillé sur le projet DREAM du 7e programme-cadre, qui étudie comment la thérapie assistée par robot peut être utilisée pour les troubles du spectre autistique. Partant du principe que l'intelligence est ancrée dans les interactions sociales, M. Belpaeme et son équipe de chercheurs tentent de faire progresser la science et la technologie qui sont à la base de l'intelligence artificielle et des interactions sociales être humain-robot. Il en résulte un éventail de résultats, allant de la compréhension théorique aux applications pratiques.

Alex J. Bowers

Alex J. Bowers est professeur associé de leadership éducatif au Teachers College de l'Université Columbia, où il s'efforce d'aider les chefs d'établissement à utiliser plus efficacement les données qu'ils recueillent dans leurs établissements afin d'orienter les ressources limitées des établissements et des districts scolaires vers les besoins spécifiques des élèves. Ses recherches se concentrent sur les interactions entre le leadership efficace des établissements et des districts scolaires, l'organisation et les ressources humaines, la prise de décision en fonction des données, les notes des élèves et leurs résultats aux tests, leur résilience et le décrochage scolaire. Il étudie également l'influence des finances, des installations et des technologies scolaires sur les résultats des élèves. Le Dr Bowers étudie ces domaines en s'appuyant sur la science des données et l'analyse des mégadonnées. Plus particulièrement, l'analyse de la visualisation des données, la modélisation multiniveau et les modèles de croissance à mélange de distribution, ainsi que l'analyse par classification des tableaux de bord de données. Il a obtenu son doctorat en administration de l'éducation à l'Université d'État du Michigan et, avant d'enseigner et de faire de la recherche sur l'éducation, a passé une décennie en tant que chercheur sur le cancer dans l'industrie biotechnologique. Il est titulaire d'une maîtrise en biochimie, microbiologie et biologie moléculaire et d'une licence en biochimie.

Jack Buckley

Jack Buckley est responsable de l'évaluation et des sciences de l'apprentissage chez Roblox, dont la mission est de réunir les gens par le jeu. Roblox permet à chacun d'imaginer, de créer et de s'amuser avec ses amis en explorant des millions d'expériences immersives en 3D, toutes mises au point par une communauté mondiale de développeurs. Avant d'occuper ce poste, il était président et responsable scientifique chez Imbellus, une start-up spécialisée dans les technologies d'évaluations par le jeu. Il était auparavant vice-président senior de l'American Institutes for Research (AIR), où il a dirigé le secteur de la recherche et de l'évaluation. Il en est toujours membre et collabore à plusieurs projets. Avant de rejoindre l'AIR, il a contribué à diriger la refonte du SAT (test d'aptitudes scolaires) au College Board, où il a occupé le poste de vice-président senior en charge de la recherche. Auparavant, il était commissaire du National Center for Education Statistics (NCES) du ministère américain de l'Éducation, où il était responsable de la mesure de tous les aspects de l'éducation aux États-Unis, notamment de l'évaluation nationale des progrès de l'éducation et de la coordination de la participation aux évaluations internationales. Au NCES, il était également conseiller technique principal auprès de la direction du ministère de l'Éducation et coprésident de l'équipe chargée de la stratégie en matière de données. En outre, Jack a été professeur associé de statistiques appliquées à l'Université de New York et professeur adjoint d'évaluation des apprentissages au Boston College. Il a également travaillé comme méthodologue analytique dans la communauté du renseignement, officier de la marine américaine et ingénieur spécialisé dans le génie nucléaire.

Laura Colosimo

Pierre Dillenbourg

Pierre Dillenbourg a d'abord été instituteur. Il a ensuite obtenu un diplôme en sciences de l'éducation (Université de Mons, Belgique). Il a commencé ses recherches sur les technologies d'apprentissage en 1984. En 1986, il a été l'un des premiers au monde à appliquer l'apprentissage automatique pour développer un système d'enseignement évolutif. Il a obtenu un doctorat en informatique à l'Université de Lancaster (Royaume-Uni), dans le domaine des applications de l'intelligence artificielle à fins éducatives. Il a été professeur assistant à l'Université de Genève. Il a rejoint l'École Polytechnique de Lausanne (EPFL) en 2002. Il a été directeur du Centre de recherche et de soutien sur l'apprentissage, puis directeur académique du Centre pour l'éducation numérique, qui met en œuvre la stratégie MOOC de l'EPFL (plus de 2 millions d'inscriptions). Il est professeur ordinaire en technologies d'apprentissage à la Faculté d'informatique et de communication, où il dirige le Laboratoire CHILI : « Computer-Human Interaction for Learning & Instruction ». Il est directeur de la leading house DUAL-T, qui développe des technologies pour les systèmes de formation professionnelle en alternance (charpentiers, fleuristes…). Avec des collègues de l'EPFL, il a lancé en 2017 le Swiss EdTech Collider, un incubateur regroupant 80 start-ups dans les technologies d'apprentissage. Il a cofondé 4 start-ups, exerce des missions de conseil dans le monde de l'entreprise et a rejoint le conseil d'administration de plusieurs entreprises ou institutions. En 2018, il a cofondé LEARN, le Centre des sciences de l'apprentissage de l'EPFL qui réunit les initiatives locales en matière d'innovation pédagogique. Il est membre de l'International Society for Learning Sciences. Il est actuellement le vice-président associé pour l'éducation à l'EPFL.

Sidney D'Mello

Sidney D'Mello (docteur en informatique) est professeur associé à l'Institut des sciences cognitives et au département d'informatique de l'Université du Colorado à Boulder. Il s'intéresse aux interactions dynamiques entre la cognition et l'émotion lorsque des individus et des groupes effectuent des tâches complexes dans le monde réel. Il applique les connaissances acquises dans le cadre de ce programme de recherche fondamentale pour développer des technologies intelligentes qui aident les gens à atteindre leur plein potentiel en coordonnant ce qu'ils pensent et ressentent avec ce qu'ils savent et font. Le Dr D'Mello a collaboré à la rédaction de sept livres et a publié près de 300 articles scientifiques, chapitres de livres et comptes rendus de conférences. Ses travaux ont été financés par de nombreuses subventions et il est actuellement rédacteur en chef adjoint de Discourse Processes et de PloS ONE. Sydney D'Mello est le chercheur principal du National Institute for Student-Agent Teaming de la National Science Foundation.

Judith Good

Judith Good est professeure d'Ergonomie et de l'Internet des objets à l'Université d'Amsterdam. Elle a rédigé son chapitre alors qu'elle était professeure de conception d'interactions et d'inclusion à l'Université du Sussex. Elle a une formation en psychologie et en intelligence artificielle. Elle a travaillé dans des universités en Europe et aux États Unis. Elle s'est attachée à mieux comprendre les processus d'apprentissage et comment le développement de technologies innovantes peut mieux soutenir l'apprentissage. Dans ce domaine, elle s'intéresse particulièrement à la meilleure façon d'aider les personnes handicapées, notamment les autistes. Elle vise à développer des méthodes efficaces pour impliquer les utilisateurs finaux de ces technologies dans la conception dès le départ.

Dirk Ifenthaler

Dirk Ifenthaler est professeur et titulaire de la chaire d'apprentissage, de conception et de technologie à l'Université de Mannheim, en Allemagne. Il est titulaire adjoint de la chaire UNESCO de science des données dans l'apprentissage et l'enseignement dans l'enseignement supérieur à l'Université Curtin, en Australie. Les recherches de Dirk portent sur les interactions entre la psychologie cognitive, la technologie éducative, l'analyse des données et l'apprentissage organisationnel. Il est rédacteur en chef de la revue *Technology, Knowledge and Learning,* rédacteur principal du *Journal of Applied Research in Higher Education* et rédacteur en chef adjoint de *l'International Journal of Learning Analytics and Artificial Intelligence for Education.*

Contact : dirk@ifenthaler.info

Rebecca Kantar

Rebecca est l'entrepreneuse en résidence de Roblox Corporation, une plateforme technologique qui réunit les gens par le jeu. Roblox a fait l'acquisition d'Imbellus, une société spécialisée dans les technologies d'évaluations par le jeu, fondée et dirigée par Rebecca. Elle a créé Imbellus avec la conviction que de meilleures évaluations éducatives permettraient d'améliorer la qualité des programmes de cours et de l'enseignement. Imbellus a mis au point des tests à enjeu élevé qui mesurent les compétences de réflexion profonde comme la résolution de problèmes, la pensée systémique et la prise de décision. Rebecca a permis à Imbellus de lever plus de 23 millions de dollars, de signer des contrats de développement de plusieurs millions de dollars avec des entreprises qui figurent parmi les 500 premières aux États-Unis. Imbellus commercialise des évaluations opérationnelles, équitables, fiables et valides.

Avant de lancer Imbellus, elle a fondé un réseau d'experts que Gerson Lehrman Group (GLG) a racheté en 2012. Rebecca a fréquenté l'école publique au Massachusetts et ensuite le Harvard College. Elle vit actuellement dans le Massachusetts.

Marty McCall

Marty McCall est une experte du Laboratoire des innovations basées sur le jeu chez McKinsey & Company. Ce laboratoire combine l'analyse scientifique avec la conception de jeux modernes pour créer des expériences numériques immersives qui engagent les utilisateurs et fournissent des informations significatives aux clients.

Avant de travailler chez McKinsey, elle était psychométricienne en chef chez Imbellus, une start-up qui développe des logiciels de jeu. Avant cela, elle était directrice de la psychométrie pour le Smarter Balanced Assessment Consortium, qui produisait des évaluations pour les écoles publiques dans plusieurs États américains. Elle a été directrice des évaluations opérationnelles à la Northwest Evaluation Association, une organisation qui produit des évaluations pour mesurer les progrès des élèves tout au long de l'année scolaire. Au début de sa carrière professionnelle, elle a travaillé comme psychométricienne pour les États de l'Oregon et de Washington.

Inge Molenaar

Inge Molenaar est professeure associée en sciences de l'éducation au Behavioural Science Institute de l'Université Radboud aux Pays-Bas. Elle a plus de 20 ans d'expérience dans le domaine de l'apprentissage amélioré par la technologie, tant dans le secteur privé que dans le monde universitaire.

Ses recherches au sein du laboratoire d'apprentissage adaptatif se concentrent sur les innovations technologiques et leurs utilisations pour optimiser l'apprentissage des apprenants. Elle étudie également l'application des données, de l'analyse de l'apprentissage et de l'intelligence artificielle pour comprendre comment l'apprentissage se déroule dans le temps. L'intelligence artificielle est un outil puissant qui permet de franchir de nouvelles étapes pour mesurer, comprendre et concevoir des scénarios d'apprentissage innovants. Le Dr Molenaar étudie les systèmes humains hybrides qui augmentent l'intelligence humaine grâce à l'intelligence artificielle afin de donner aux apprenants et aux enseignants des outils pour rendre l'éducation plus efficace, plus efficiente et plus réactive. Dans cette perspective, la collaboration entre les gouvernements, les établissements d'enseignement, la recherche et les entreprises est essentielle pour développer la prochaine génération de systèmes éducatifs. Le Dr Molenaar vient de recevoir une subvention de démarrage du Conseil européen de la recherche (CER) pour élaborer le premier *système de régulation hybride être humain-IA* afin de développer les compétences d'apprentissage autorégulé des jeunes apprenants à l'aide de l'IA. Elle est également devenue récemment boursière de la Fondation Jacobs.

Le Dr Molenaar est titulaire d'une maîtrise en psychologie cognitive et d'une maîtrise en études commerciales internationales (Université de Maastricht). Elle possède également un doctorat en sciences de l'éducation (Université d'Amsterdam).

Natalie Smolenski

Responsable du développement commercial, Hyland Credentials.

Natalie Smolenski dirige le développement commercial de Hyland Credentials, une entreprise qui propose des solutions pour émettre des titres numériques vérifiables ancrés dans la technologie blockchain. Hyland Credentials s'appelait auparavant Learning Machine, une entreprise de logiciels qu'elle a contribué à fonder et à développer. En tant qu'auteure et conférencière, Natalie se concentre sur les points d'intersection entre l'identité, la technologie et les pouvoirs publics. Son travail de doctorat a porté sur les dimensions économiques du développement humain et de la santé mentale. En inscrivant les technologies numériques distribuées et la transformation sociale dans une perspective scientifique, elle aide des publics de tous horizons à comprendre comment les individus se connectent pour former des communautés et construire les infrastructures du futur. Vous trouverez une liste des publications et des interventions publiques de Natalie sur www.nataliesmolenski.com. On peut consulter son dernier projet, VALUED, à l'adresse suivante : valued.nataliesmolenski.com.

Erica Snow

Erica Snow est la directrice de l'apprentissage et de la science des données chez Roblox, dont la mission est de réunir les gens par le jeu. Roblox permet à chacun d'imaginer, de créer et de s'amuser avec ses amis en explorant des millions d'expériences immersives en 3D, toutes mises au point par une communauté mondiale de développeurs.

Avant d'occuper ce poste, elle était directrice de l'apprentissage et de la science des données chez Imbellus, une start-up spécialisée dans les technologies d'évaluations par le jeu. Auparavant, elle était responsable scientifique de l'analyse de l'apprentissage chez SRI international, où elle dirigeait des travaux axés sur l'évaluation et la mise en œuvre de technologies éducatives dans la salle de classe. Erica compte à son actif plus de 60 publications revues par un comité de lecture dans les domaines de la science des données, de la science cognitive, de la technologie éducative et de la science de l'apprentissage. En outre, Erica est professeure adjointe à l'American University, où elle enseigne l'analyse prédictive à destination des entreprises.

Fumihide Tanaka

Fumihide Tanaka est professeur associé à la faculté d'ingénierie, d'information et de systèmes de l'Université de Tsukuba, au Japon. Après avoir obtenu son doctorat à l'Institut de technologie de Tokyo en 2003, il a rejoint Sony Corporation et a travaillé à la recherche et au développement de robots destinés au divertissement. Il s'est ensuite consacré à la recherche sur les interactions être humain-robot lors de son passage à l'Université de Californie à San Diego entre 2004 et 2007. Au cours de cette période, il a mené une longue étude de terrain, dans une école maternelle, que l'on a considérée, à l'époque, comme une étude classique des interactions enfant-robot. Cette étude a fait l'objet de reportages et d'articles (notamment sur CNN et dans les revues Nature et Science). M. Tanaka a débuté sa carrière universitaire en 2008 et, depuis, il travaille sur la robotique éducative à l'Université de Tokyo et à l'Université de Tsukuba. Il a supervisé le développement d'une application éducative pour le robot Pepper lorsqu'il travaillait pour SoftBank Corp. en tant que consultant. Il est actuellement directeur des affaires extérieures à la Robotics Society of Japan.

Stéphan Vincent-Lancrin

Stéphan Vincent-Lancrin est analyste principal et chef de division adjoint à l'Organisation de coopération et de développement économiques (Direction de l'éducation et des compétences). Il dirige actuellement les travaux sur l'éducation à l'heure de la pandémie de COVID-19, mais aussi les travaux de l'OCDE sur la numérisation dans l'éducation, notamment le projet « Données intelligentes et technologie numérique dans l'éducation : IA, analyse des données de l'apprentissage et au-delà » - ce qui comprend une composante sur la blockchain. Il dirige également les travaux consacrés à l'innovation disciplinée et la gestion du changement, notamment les recherches sur la créativité et la pensée critique (« Fostering and Assessing Creativity and Critical Thinking in Education ») qui présentent le type de soutien, d'environnement et d'outils dont les enseignants pourraient tirer parti pour améliorer leurs pratiques pédagogiques et l'apprentissage des élèves et des étudiants. Il s'agit d'un exemple concret de développement des capacités par le biais de communautés internationales d'apprentissage professionnel. De manière plus générale, il travaille sur l'innovation, la recherche et étudie la manière dont les nouvelles tendances influencent l'avenir de l'apprentissage et des politiques éducatives, tant dans l'enseignement scolaire que dans l'enseignement supérieur.

Perspectives de l'OCDE sur l'éducation numérique 2021

REPOUSSER LES FRONTIÈRES AVEC L'IA, LA BLOCKCHAIN ET LES ROBOTS

De quelle manière les technologies numériques, et en particulier les technologies intelligentes utilisant l'intelligence artificielle (IA), l'analyse des données de l'apprentissage, la robotique et autres, peuvent-elles transformer l'éducation ? Ce livre explore cette question. Il se concentre sur la manière dont les technologies intelligentes modifient actuellement l'enseignement en classe et la gestion des organisations et systèmes éducatifs. Cette publication plonge au cœur des usages bénéfiques des technologies intelligentes telles que la personnalisation de l'apprentissage, le soutien aux élèves ayant des besoins spécifiques et l'accréditation des diplômes en blockchain. Elle s'intéresse également aux défis et aux domaines de recherche futurs. Les résultats offrent des pistes aux enseignants, aux décideurs publics et aux institutions d'enseignement pour numériser l'éducation tout en optimisant l'équité et l'inclusion.

IMPRIMÉ ISBN 978-92-64-96278-1
PDF ISBN 978-92-64-99864-3