

Discours de réception de Madame Marion Créhange



Instruire par la pratique. L'apprentissage, des premiers hommes à l'apprentissage des ordinateurs

Apprendre est notre envie à tous, et cela ne date pas d'hier ! Ce qui m'intéresse aujourd'hui, c'est une certaine façon d'instruire. Le mot capital ici, très en vogue en ce moment, est « apprentissage ». Il est quelquefois employé pour désigner le fait même d'instruire, mais ce n'est pas mon sujet aujourd'hui. Je ne vais considérer ici et désigner par « apprentissage » que le fait d'instruire par la pratique, par l'expérience. Il s'applique tout naturellement à l'artisanat, les métiers techniques et les métiers d'art. Mais son champ d'intérêt est beaucoup plus large. Un exemple d'apprentissage nous est donné par la superbe action *La main à la pâte*, créée par le prix Nobel Georges Charpak, Pierre Léna et Yves Quéré en 1995 et qui se prolonge, en particulier par l'Espace Pierre-Gilles de Gennes à Paris. Et chacun est conscient de l'importance croissante de formes d'enseignement variées, comme la formation en alternance, la formation tout au long de la vie, la formation pour tous, y compris les personnes souffrant d'un handicap. L'apprentissage y joue un rôle majeur.

Dès le IV^e siècle avant notre ère, Aristote, dans *Éthique à Nicomaque*^[1], avait une vision très lucide : « ... les choses qu'il faut avoir apprises pour les faire, c'est en les faisant que nous les apprenons : par exemple, c'est en construisant qu'on devient constructeur, et en jouant de la cithare qu'on devient cithariste [...] ».

Vaste sujet que l'apprentissage. Je vais mettre en évidence la nature et les buts de ce processus et certains mécanismes cognitifs mis en œuvre. Cette évocation, débutant à l'aube de l'humanité, me conduira naturellement à parler de l'apprentissage aidé par les ordinateurs puis de l'apprentissage des ordinateurs : l'ordinateur dans une situation d'apprenti.

Les premiers hommes n'avaient pas le choix !

C'est en ayant faim qu'ils ont appris à se nourrir, c'est en étant en concurrence qu'ils ont appris à être forts et à combattre. Pour se nourrir, ils ont appris à pêcher, à chasser, et pour cela ont appris à se fabriquer des outils, puis des outils meilleurs et des moyens de les fabriquer, ... d'où une spirale ascendante, les créations d'outils amenant à perfectionner leur maniement mais aussi la connaissance. Très vite naît le besoin de partager et conserver ces connaissances, ce qui pousse à la naissance d'un moyen d'expression. L'art pariétal en fut sans doute un préambule.

Dans son beau mémoire, *Les pédagogues qui nous ont tracé la voie*^[2], Margot Phaneuf donne un panorama des noms prestigieux qui jalonnent l'évolution de la pédagogie de l'apprentissage. En voici un tout petit échantillon, à la suite de Socrate. À la Renaissance, Rabelais, dresse un manifeste de l'apprentissage : Gargantua souhaite que l'éducation de son fils Pantagruel, soit un questionnement continu sur la nature des choses, à travers toutes sortes d'activités ludiques, artistiques, sportives. Montaigne, dans *Les essais*, prône pour sa part une manière d'interroger et de raconter le monde qui privilégie l'inachevé sur le méthodique et l'exhaustif. Dans le cadre de l'effervescence intellectuelle qui caractérise la pensée des Lumières, Rousseau, dans *l'Émile*, « expose une théorie de l'apprentissage, où il affirme que les enfants oublient aisément [...] ce qu'on leur a dit, mais non pas ce qu'ils ont fait [...], et surtout qu'il ne s'agit point de leur enseigner les sciences, mais de leur donner du goût pour les aimer et des méthodes pour les apprendre^[3] ». Au début du XX^e siècle, un pas important est franchi par Decroly, rapidement suivi par d'autres pédagogues comme Dewey, Freinet, Piaget. La littérature à ce sujet est riche...

La nature et les buts de l'apprentissage : le « pourquoi »

L'apprentissage d'une fonction ou d'un métier a comme but direct d'améliorer la compétence et l'autonomie. Mais très riches sont les buts indirects, comme améliorer la capacité de raisonnement, d'expression et de communication, encourager la créativité, améliorer l'aptitude au changement, l'adaptation à l'évolution du Monde, et aussi diminuer la timidité, l'isolement.

Instruire par la pratique peut s'exercer à tout âge, dès la naissance et même *in utero* ! La voie de l'apprentissage peut être choisie pour son efficacité mais aussi comme moyen de développer des aptitudes nouvelles de jeunes en situation d'échec ou de handicap, et comme vecteur de promotion sociale. Donnons quelques exemples d'initiatives nationales et locales.

Avec l'accroissement du chômage et particulièrement celui des jeunes, l'État a mené des actions en faveur de l'apprentissage : amélioration du financement et de

l'information, renforcement de l'enseignement théorique d'accompagnement. On peut citer l'apparition des CFA (centres de formation d'apprentis) en 1961 et l'accord cadre national pour le développement de l'apprentissage signé par Jean-Louis Borloo et Laurent Hénart en 2005, précisant entre autres le rôle des Régions (qui sont très attachées au maintien d'un réseau de centres de formation des apprentis « de proximité » en lien avec les petites et moyennes entreprises). Depuis septembre 2018, des lois et décrets assouplissent les limites temporelles et géographiques de l'apprentissage.

Cette promotion de l'apprentissage, que ce soit pour l'obtention d'un diplôme (aux niveaux CAP, bac pro, BTS, ingénieur) ou d'une qualification, est en pleine effervescence. On peut citer autour de nous plusieurs centres de formation d'apprentis : le CFA « Métiers des Arts de la scène », attaché à l'Opéra National de Lorraine, le CFA des Arts Verriers abrité par le CERFAV à Vannes-le-Châtel, le lycée Jean Prouvé des métiers de la gestion de l'énergie et des process. De plus en plus d'écoles d'ingénieurs, en particulier l'ENSEM, Polytech Nancy offrent la possibilité de préparer la dernière année en alternance, tandis que TELECOM Nancy offre une filière en apprentissage sur les trois années du cycle « ingénieur ». Des Masters, comme le Master MIAGE, peuvent aussi se suivre en alternance.

Actuellement, l'UIIMM, Union de Industries Métallurgiques et Minières, effectue une campagne active d'encouragement à l'apprentissage. Autre exemple, le réseau « entreprendre pour apprendre^[4] », dont existe une branche « Grand Est », a pour objectif de développer l'esprit d'entreprise et les compétences entrepreneuriales des jeunes par la création de leur propre mini-entreprise, accompagnés de professionnels. Je voudrais mentionner ici la clairvoyance de Bertrand Schwartz, ancien directeur de l'École des Mines de Nancy et du CUCES qui, tout au long de sa carrière a prôné l'expérience professionnelle dans les écoles d'ingénieurs, révolutionné la conception de l'alternance, et créé les Missions locales pour l'insertion professionnelle et sociale des jeunes. J'espère que toutes les initiatives actuelles feront que l'apprentissage et la formation en alternance prennent, comme en Allemagne, leurs lettres de noblesse dans l'esprit des Français!

Les aspects cognitifs de l'apprentissage : le « comment »

Nous pouvons nous faire une idée du « comment » par ce qu'écrivait le grand éducateur du XVII^e siècle Comenius^[5] : « rien ne peut être compris à moins d'être perçu d'abord par les sens ». Le processus d'apprentissage peut être vu schématiquement, et à diverses échelles, comme un cycle de quatre phases, début, prédiction, action, évaluation, qui se succèdent ou se superposent plus ou moins, et revêtent des importances variables selon les circonstances.

La phase 1. Le début d'un cycle (présentation et mise en situation) est en général assuré par un maître, au moins au démarrage d'un apprentissage; mais ensuite, il est fréquent que ce soit l'apprenti qui se mette lui-même au début d'un nouveau cycle.

La phase 2, de prédiction, de diagnostic, réclame un engagement actif de l'apprenti. Il réfléchit, élabore des concepts, prend des décisions sur la conduite à adopter. Cette phase est souvent de nature heuristique, l'intérêt étant d'apprendre à découvrir. Elle comprend souvent rédaction ou mise en parole.

La phase 3, d'action, de mise en œuvre de techniques, d'exercice, est souvent la plus longue et celle où l'apprenti est le plus engagé. L'apprenti est dans le concret, il utilise du matériel, son instrument de musique par exemple, il calcule, il travaille sur ordinateur, il se documente, il réalise des expériences, il tâtonne, il découvre.

La phase 4, d'évaluation, d'analyse et de remise en cause, est celle qui est la plus spécifique à l'apprentissage et a souvent l'effet le plus riche. Cette phase de *feedback*, ou rétroaction, ou bouclage de pertinence, souvent par "essai-erreur", est déterminante dans le processus; elle est également importante psychologiquement car c'est elle qui donne de la satisfaction à l'apprenti ou au contraire le motive pour s'améliorer.

Apprendre par apprentissage, ce n'est donc pas seulement acquérir une connaissance, c'est donner une valeur à cette connaissance. La situation d'erreur dans l'apprentissage doit être considérée comme normale et porteuse de progrès. Parmi les nombreuses citations à ce propos, citons Nelson Mandela: « Je ne perds jamais. Soit je gagne, soit j'apprends » et Pablo Picasso: « J'essaie toujours de faire ce que je ne sais pas faire, c'est ainsi que j'espère apprendre à le faire ».

La mise en œuvre de l'apprentissage

Les styles de mise en œuvre du processus d'apprentissage sont divers, se déclinant en fonction des cadres, des âges, des objets de l'apprentissage, du contexte administratif, etc. Citons-en quelques-uns:

- *l'apprentissage par le jeu*. Ainsi, les jeux et jouets d'enfants, les jeux d'entreprise, les « jeux sérieux » (ou « Serious games »), les écoles du cirque, les ateliers théâtre.
- *l'apprentissage par imprégnation*, caractérisé par le fait que l'apprenti apprend sans savoir qu'il apprend. Il met en action observation et imitation et reçoit punition ou récompense. On peut en voir des exemples chez les bébés ou très jeunes enfants ou chez les animaux que l'on dresse.

- *l'apprentissage implicite*, voisin de l'apprentissage par imprégnation, mis en évidence par Emmanuel Bigand et Charles Delbé^[6] à propos de la pratique d'un instrument de musique. Ils notent que « ce type d'apprentissage permet d'acquérir des informations [...] qui sont trop complexes pour être appréhendées par la pensée consciente ». Et, ce qui est essentiel : « les connaissances ainsi acquises sont beaucoup plus stables en mémoire, et même elles résistent à des atteintes cognitives et neurologiques sévères ».
- *l'apprentissage collectif*, à l'exemple d'une colonie de fourmis^[7], chacune n'ayant qu'une minuscule intelligence. Quand une des fourmis trouve une source de nourriture, elle en rapporte une petite quantité au nid, en laissant derrière elle une traînée de phéromones, pour marquer son chemin. Petit à petit, en passant plus nombreuses sur ce chemin, les fourmis laissent plus de phéromones, ce qui crée un effet « d'auto-renforcement ». Ce mécanisme est si efficace que des informaticiens ont écrit, sur ce modèle, des algorithmes de gestion de flux, en particulier pour la circulation automobile ou la gestion de l'information sur Internet.

Tout ceci permet de mettre en évidence les nombreux apports de l'apprentissage, à toutes les échelles d'objet et de temps. En particulier, la phase d'essai-erreur apprend à l'apprenti à s'évaluer, donne souvent naissance à des découvertes imprévues, des questionnements, fait naître et mûrir des associations d'idées. Petit à petit, l'expérience est transformée en savoir. En appui à cela, doivent être prévues des phases de synthèse, de point d'orgue, pour fixer et intégrer les progrès. Yves Lichtenberger, ancien chef du programme « Technologie - emploi - travail » au ministère de la Recherche^[8] insiste : « Pas de transmission ni de partage de savoir sans capitalisation d'expérience, il faut donc en assurer le retour en l'analysant et le mettre en forme en l'inscrivant dans un savoir structuré ». Tout au long du cycle, le rôle du maître est évidemment essentiel, comme modèle, comme conseiller, comme médiateur, mais aussi pour stimuler l'envie, encourager et rassurer.

À long terme, en plus de l'amélioration espérée des compétences techniques, l'apprentissage apprend à travailler en équipe, à écouter autrui, à s'exprimer, améliore la réactivité, accroît le sens des responsabilités et l'esprit d'initiative. Un autre but important est d'apprendre à apprendre et, selon ma fille, d'installer, dans l'esprit, des petits crochets bien placés où ensuite chaque miette de connaissance viendra s'accrocher dès qu'on la saisira.

Mais il a aussi un intérêt patrimonial : c'est un moyen de transmission du savoir-faire ouvrier, du talent des grands artistes et de l'expertise professionnelle. Il est un vecteur de transfert de technologie.

L'apprentissage est un terrain de jeu des cogniticiens

Je n'ai pas le temps ni les compétences pour aborder un sujet passionnant : les effets réciproques entre apprentissage et cerveau. J'en donne seulement quelques bribes.

Un point essentiel concerne les zones du cerveau impactées par telle ou telle phase d'un apprentissage. On peut maintenant « voir » dans le cerveau des effets d'un apprentissage, pendant et après celui-ci. En effet, « l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle cérébrale (ou IRMf) est une technique mesurant in vivo l'activité des aires du cerveau en détectant les changements locaux de flux sanguin » .

Stanislas Dehaene^[10], psychologue et cogniticien, est un éminent théoricien de l'apprentissage ; l'imagerie cérébrale en psychologie cognitive est le sujet de son premier cours au Collège de France^[11]. Une de ses thèses concerne le rôle du sommeil : « il fait partie intégrante de notre algorithme d'apprentissage, intervient dans la consolidation (améliore la mémorisation, la généralisation, la découverte de régularités) ».

Comme préambule au chapitre suivant, je dois préciser que l'unité fonctionnelle de base du système nerveux est une cellule, le neurone, dont la fonction est d'assurer le traitement et la transmission de flux d'informations, de nature électrique ou chimique, pour contrôler les fonctions du corps. Fondamentale dans l'apprentissage, la « neuroplasticité » est le fait qu'en permanence de nouveaux neurones sont engendrés, les neurones reconfigurant sans cesse leurs circuits^[21]. Ce qui est encourageant, c'est ce que dit Stanislas Dehaene^[13] : « la plasticité cérébrale est mobilisable tout au long de la vie » !

La recherche dans ces domaines est très active. À Nancy se déroule tous les ans, par exemple, la *semaine du cerveau*^[14].

Apprentissage et ordinateur

J'aborde enfin le sujet qui me touche de plus près : apprentissage et ordinateur. Les rapports de parenté qui existent entre informatique et apprentissage sont nombreux et profonds. Précisons maintenant leurs liens respectifs.

L'ordinateur peut être un outil dans l'apprentissage d'un métier ou d'une fonction. Bien sûr, l'ordinateur rend des services devenus courants pour éditer, mémoriser, interroger des bases de données, communiquer, etc. Mais son rôle le plus spécifique est la simulation. Les exemples sont innombrables : pilotage d'un avion ou d'une automobile, utilisation d'un outil, diagnostic médical, etc. Se développe actuellement l'apprentissage par simulation des gestes chirurgicaux pour que se réalise la devise : « Jamais la première fois sur le patient ».

L'entraînement sur simulateur est un moyen très efficace, encore amélioré par des avancées techniques comme la réalité augmentée, ... mais on ne peut pas omettre la confrontation au réel : dans le réel, on se brûle les doigts, on est blessé dans un accident, on ressent des odeurs, ... mais aussi, en raison de ces risques, existe un stress, absent en simulation mais utile dans la formation. Par dessus le marché, on peut souvent apporter une aide conceptuelle à l'apprenti en explicitant le modèle sur lequel repose la simulation.

L'ordinateur peut aussi être l'apprenti. Les programmes qui effectuent les traitements informatiques comportent de plus en plus souvent une fonction supplémentaire, consistant à évaluer la qualité des résultats trouvés et à se modifier eux-mêmes pour tenter de s'améliorer. Ces programmes suivent ainsi un cycle d'apprentissage, et ceci à diverses échelles de temps et de généralité. Cet apprentissage machine est maintenant au programme de toutes les formations supérieures en informatique... et le sera sans doute très prochainement dans les nouvelles formations dans le secondaire. Quelques exemples.

Mon équipe de recherche au laboratoire LORIA, EXPRIM, travaillait sur la recherche exploratoire d'images dans une base d'images. Il s'agissait par exemple d'aider un journaliste à illustrer un article. Ce journaliste posait une première requête et le système lui proposait un ensemble d'images. Dans la phase de bouclage de pertinence, essentielle, le journaliste indiquait au système quelles étaient les images pertinentes et celles ne l'étant pas du tout. Et le système en déduisait une meilleure connaissance du besoin du journaliste. Et ainsi de suite, ce cycle étant manifestement un cycle d'apprentissage du système. Et d'ailleurs, conjointement, ... du journaliste. Cet apprentissage, à court terme, tendait la perche à un apprentissage à plus long terme : connaître de mieux en mieux, au fil des sessions, les goûts de ce journaliste et, plus généralement, les stratégies de recherche.

Dès la fin des années 1960, Jean-Paul Haton, alors dans le cadre du Laboratoire d'Électricité et d'Automatique dirigé par Alfred Frühling, travaillait déjà sur l'apprentissage machine. Puis à la naissance du laboratoire CRIN qui est devenu le LORIA, il a fondé une équipe d'Intelligence artificielle qui a développé l'apprentissage comme l'un de ses thèmes, de plus en plus présent dans le laboratoire. Depuis longtemps et encore actuellement, Monique Grandbastien effectue de nombreuses missions rectorales et nationales sur l'Éducation, et travaille sur le rôle que peut y jouer l'intelligence artificielle, et tout particulièrement l'apprentissage automatique.

Les procédés d'apprentissage machine

Les procédés d'apprentissage machine employés sont de natures diverses, chacun reposant sur une méthode de construction de connaissance et tous comportant un moyen d'évaluation de la performance. Deux grandes familles se distinguent : l'apprentissage symbolique, qui repose sur la logique et des règles formelles, utilisant des modèles mathématiques de la connaissance (chaînes de Markov, modèles bayésiens,...) et l'apprentissage connexionniste qui prend modèle sur le fonctionnement du cerveau pour construire et gérer des réseaux de neurones artificiels, un champ immense de recherche, avec des volontés diverses d'imitation du vivant.

L'apprentissage profond ou *deep learning*, en développement explosif, repose sur la combinaison de deux familles d'algorithmes, la gestion de réseaux de neurones artificiels multicouches et les classifications, ainsi que sur l'existence de bases de données massives et de machines assez puissantes pour les traiter. Elle exploite, dit Yann Le Cun, responsable scientifique en IA à Facebook, professeur à New York University et Prix Turing 2019, «la capacité d'un ordinateur à reconnaître des représentations (images, textes, vidéos, sons) à force de les lui montrer de très nombreuses fois». Citons en exemple le programme ALPHAGO, jeu de GO qui bat les meilleurs joueurs mondiaux, et dont l'algorithme est basé sur un réseau de neurones profond et sur l'apprentissage par renforcement : il s'est entraîné à jouer des millions de parties contre d'autres instances de lui-même.

Un des domaines où les recherches sur l'apprentissage profond s'appliquent de plus en plus est celui de la médecine, pour lequel existe une masse absolument considérable de données, la plupart étant des données sur les malades, qui ont été anonymisées. À l'Université de Lorraine, les équipes Orpailleur et Capsid du LORIA, avec en particulier mon ancienne doctorante Malika Smail-Tabbone, travaillent sur ce sujet. Ailleurs, des start-up voient le jour et connaissent une croissance forte, comme la société franco-américaine Owkin, créée par un cancérologue et un professeur en intelligence artificielle, dans le but de rendre des services immédiats, mais aussi à long terme d'isoler des paramètres à l'origine des maladies.

Souvent, l'apprentissage des machines est un apprentissage mutuel, qui ne vise pas à faire travailler l'ordinateur de façon complètement automatique et «sèche» et cherche à laisser à l'homme la richesse et les imperfections de sa pensée, et à les mettre à profit.

Notons enfin qu'il existe un bienfait inverse de l'appel de la recherche en informatique aux modèles biologiques : les modélisations pratiquées par les

informaticiens ont fait progresser la connaissance du fonctionnement du système nerveux.

En conclusion

- La recherche scientifique sur l'apprentissage des ordinateurs est foisonnante. Alan Turing^[15] avait d'ailleurs déjà envisagé en 1948 des *learning machines* susceptibles de construire elles-mêmes leurs propres programmes.
- L'apprentissage des ordinateurs, c'est fort intéressant et générateur de progrès... Mais ce n'est pas sans inconvénients et même sans dangers! Lorsque nous émettons une opinion ou effectuons une commande, l'ordinateur peut les retenir et apprendre nos opinions et nos goûts. Or nous savons bien que les informations qui circulent ne peuvent pas être complètement protégées, même si dans le principe elles le sont. Le but de cet apprentissage peut être commercial... ce qui fait que nous recevons beaucoup d'annonces ciblées. Mais il peut aussi être «dictatorial», terroriste ou racial...
- Bien sûr, on est aussi amené à se poser des questions sur les limites des capacités et du pouvoir des machines apprenantes...

Mais cela n'enlève en rien l'intérêt et l'importance croissante de l'apprentissage humain comme mode de formation, qu'il soit inclus dans le système d'enseignement ou qu'il vienne en complément ou en substitution. L'OCDE affirme d'ailleurs, à propos des risques de fracture sociale : « Renforcer l'apprentissage tout au long de la vie est la clé pour tous les travailleurs et citoyens, afin de s'adapter aux changements du monde du travail et de la société ».

Nous pouvons enfin remarquer qu'apprendre en pratiquant c'est souvent la démarche de la recherche scientifique. D'une façon générale, d'ailleurs, à l'inverse de l'apprentissage de gestes automatiques lié au taylorisme, qui est facteur d'aliénation, instruire par la pratique n'est fécond que si la connaissance augmente.



Notes

- [1] Aristote, *Éthique à Nicomaque*, traduction (1959), J. Tricot (1893-1963, Éditions Les Échos du Maquis, v. : 1,0, janvier 2014.=) <https://philosophie.cegepr.qc.ca/wp-content/documents/%C3%89thique-%C3%A0-Nicomaque.pdf>.
- [2] Phaneuf, M : « Les pédagogues qui nous ont tracé la voie », *Psycho-Ressources*, 2012 (https://www.psycho-ressources.com/doc/1205Les_pedagogues_qui_nous_ont_tr.pdf)

- [3] Mvogo, D. (1990). « Théorie de l'apprentissage chez Jean-Jacques Rousseau », *Revue des sciences de l'éducation*, 16(3), 451-460. <https://doi.org/10.7202/900679ar>
- [4] www.entreprendre-pour-apprendre.fr
- [5] « La Pédagogie de Comenius », *Les dossiers du PCF* (mlm), 2015 (<http://lesmaterialistes.com/fichiers/pdf/dossiers/pcf-mlm-comenius.pdf>).
- [6] Bigand, E et Delbé C: *L'apprentissage implicite de la musique occidentale*, LEAD CNRS, UMR 5022 et Institut Universitaire de France, Université de Bourgogne.
- [7] Héronnière, L de la, *Les fourmis cherchent la nourriture...* (www.slate.fr/life/87795/fourmis-nourriture-algorithme-google).
- [8] Lichtenberger, Y: *Travail formateur!*, ancien chef du programme *Technologie - emploi - travail* au ministère de la Recherche (<http://www.observatoiredescadres.fr/travail-formateur-par-yves-lichtenberger/>).
- [9] Andreelli, F et Mosbah, H, *IRM fonctionnelle cérébrale: les principes* ([https://doi.org/10.1016/S1957-2557\(14\)70677-7](https://doi.org/10.1016/S1957-2557(14)70677-7))
- [10] Dehaene, S, professeur au Collège de France, membre de l'Académie des sciences, préside le Conseil scientifique de l'Éducation nationale. Il dirige UNICOG.
- [11] Dehaene, S, Collège de France, Chaire de Psychologie cognitive expérimentale, premier cours: « Neuroimagerie cognitive: principes et limites » (https://www.college-de-france.fr/media/stanislav-dehaene/UPL1267245260781049365_Cours_1.pdf) 2006.
- [12] Gracci, F, d'après « Comment les neurones font-ils fonctionner notre cerveau? », *Science & Vie* QR n°22 « Le génie & ses mystères » décembre 2017 (www.science-et-vie.com/questions-reponses/comment-les-neurones-font-ils-fonctionner-notre-cerveau-10079).
- [13] Dehaene, S, *Apprendre! Les talents du cerveau, le défi des machines* (Odile Jacob, septembre 2018) (parisinnovationreview.com/article/les-quatre-piliers-de-lapprentissage-stanislav-dehaene).
- [14] Voir, pour 2019: <https://www.semaineducerveau.fr/manifestations/>
- [15] Turing A.M, « Computing Machinery and Intelligence », *Mind*, 1950, 49, 433-460.