

Stanislas Dehaene

Apprendre !

**Les talents du cerveau,
le défi des machines**



Odile
Jacob

Stanislas Dehaene

Apprendre !

Les talents du cerveau, le défi des machines

« Notre cerveau possède, dès la naissance, un talent que les meilleurs logiciels d'intelligence artificielle ne parviennent pas encore à imiter : la faculté d'apprendre.

Même le cerveau d'un bébé apprend déjà plus vite et plus profondément que la plus puissante des machines actuelles. Et cette remarquable capacité d'apprentissage, l'humanité a découvert qu'elle pouvait encore l'augmenter grâce à une institution : l'école.

Au cours des trente dernières années, d'importants progrès ont été réalisés dans la compréhension des principes fondamentaux de la plasticité cérébrale et de l'apprentissage.

Il est temps que chaque enfant, chaque adulte prenne la pleine mesure du potentiel énorme de son propre cerveau – et aussi, bien sûr, de ses limites.

Le fonctionnement de la mémoire, le rôle de l'attention, l'importance du sommeil sont autant de découvertes riches de conséquences pour chacun d'entre nous. Des idées très simples sur le jeu, le plaisir, la curiosité, la socialisation, la concentration ou le sommeil peuvent augmenter encore ce qui est déjà le plus grand talent de notre cerveau : apprendre ! » S. D.



Stanislas Dehaene est professeur au Collège de France, titulaire de la chaire de psychologie cognitive expérimentale, membre de l'Académie des sciences. Il préside le Conseil scientifique de l'Éducation nationale. Il a publié *Les Neurones de la lecture*, *La Bosse des maths* et *Le Code de la conscience*, qui ont rencontré un très grand succès.



9

782738 145420

22,90 €

4638729

ISBN : 978-2-7381-4542-0

En couverture : © Olesya Kazimira/Sarah Holmlund/Photo.

www.odilejacob.fr

Sommaire

INTRODUCTION

<i>Pourquoi l'apprentissage ?</i>	22
<i>Homo docens</i>	26
<i>Apprendre à apprendre</i>	27
<i>Le défi des machines</i>	29

PREMIÈRE PARTIE

Qu'est-ce qu'apprendre ?

CHAPITRE I

Comment un réseau de neurones apprend

<i>Apprendre, c'est ajuster les paramètres d'un modèle mental</i>	41
<i>Apprendre, c'est exploiter le potentiel de la combinatoire</i>	44
<i>Apprendre, c'est minimiser ses erreurs</i>	46
<i>Apprendre, c'est explorer l'espace des possibles</i>	53
<i>Apprendre, c'est optimiser une fonction de récompense</i>	55
<i>Apprendre, c'est restreindre l'espace de recherche</i>	60
<i>Apprendre, c'est projeter des hypothèses a priori</i>	62

CHAPITRE 2

Pourquoi notre cerveau apprend mieux que les machines

<i>Ce qui manque encore à l'intelligence artificielle</i>	68
<i>Apprendre, c'est inférer la grammaire d'un domaine</i>	76
<i>Apprendre, c'est raisonner en bon statisticien</i>	87

DEUXIÈME PARTIE

Comment notre cerveau apprend

CHAPITRE 3

Le savoir invisible : les étonnantes intuitions des bébés

<i>Le concept d'objet</i>	98
<i>Le sens du nombre</i>	102
<i>L'intuition des probabilités</i>	105
<i>La connaissance des animaux et des personnes</i>	107
<i>La perception des visages</i>	109
<i>Le don des langues</i>	110

CHAPITRE 4

Naissance d'un cerveau

<i>Le cerveau du bébé, déjà bien structuré</i>	116
<i>Les autoroutes du langage</i>	120
<i>L'auto-organisation du cortex</i>	124

CHAPITRE 5

La part de l'acquis

<i>Qu'est-ce que la plasticité cérébrale ?</i>	131
<i>Le portrait d'un souvenir</i>	138
<i>Vraies synapses et faux souvenirs</i>	141
<i>La nutrition, élément clé de l'apprentissage</i>	146
<i>Pouvoirs et limites de la plasticité synaptique</i>	148
<i>Qu'est-ce qu'une période sensible ?</i>	154
<i>Il faut qu'une synapse soit ouverte ou fermée</i>	163
<i>Un miracle à Bucarest</i>	168

CHAPITRE 6

Recyclez votre cerveau

<i>L'hypothèse du recyclage neuronal</i>	176
<i>Les mathématiques recyclent les circuits du nombre</i>	181
<i>La lecture recycle les circuits de la vision et du langage parlé</i>	189
<i>Partitions, équations et visages</i>	198
<i>Les bénéfices d'un environnement enrichi</i>	200

TROISIÈME PARTIE

Les quatre piliers de l'apprentissage

CHAPITRE 7

L'attention

<i>Alerte : l'éveil du cerveau</i>	213
<i>Orientation : le filtre du cerveau</i>	217
<i>Contrôle exécutif : l'aiguilleur du cerveau</i>	223
<i>Apprendre à faire attention</i>	226
<i>Je fais attention si tu fais attention</i>	233
<i>Enseigner, c'est faire attention à l'attention de l'autre</i>	237

CHAPITRE 8

L'engagement actif

<i>Un organisme passif n'apprend pas</i>	243
<i>Approfondir pour mieux apprendre</i>	244
<i>L'échec des pédagogies de la découverte</i>	247
<i>Savoir piquer la curiosité</i>	251
<i>Vouloir savoir : le moteur de la motivation</i>	255
<i>Les trois façons dont l'école peut tuer la curiosité</i>	260

CHAPITRE 9

Le retour sur erreur

<i>La surprise, moteur de l'apprentissage</i>	267
<i>Le cerveau fourmille de messages d'erreur</i>	272
<i>Ne confondons pas erreur et sanction</i>	276
<i>La note, piètre retour sur erreur</i>	278
<i>Se tester pour mieux apprendre</i>	282
<i>Une règle d'or : espacer les apprentissages</i>	285

CHAPITRE 10

La consolidation

<i>Libérer les ressources cérébrales</i>	293
<i>Le rôle clé du sommeil</i>	296
<i>Le cerveau endormi revit les épisodes de la veille</i>	298
<i>Peut-on faire des découvertes en dormant ?</i>	304
<i>Sommeil, enfance et école</i>	308

CONCLUSION

Réconcilier l'éducation
avec les neurosciences

<i>Treize maximes pour l'épanouissement des enfants</i>	313
<i>Une alliance pour l'école de demain</i>	318

<i>Sommaire</i>	13
Notes	321
Bibliographie	341
Remerciements	375
Crédits iconographiques.....	379

« Commencez donc par mieux étudier vos élèves ; car très assurément vous ne les connaissez point. »

Jean-Jacques ROUSSEAU,
Émile ou De l'éducation (1762).

« Chose étrange et presque stupéfiante, on connaît tous les recoins du corps humain, on a catalogué tous les animaux de la planète, on a décrit et baptisé tous les brins d'herbe, et on a laissé durant des siècles les techniques psychologiques à leur empirisme, comme si elles étaient de moindre importance que celles du guérisseur, de l'éleveur ou du cultivateur. »

Jean PIAGET,
La Pédagogie moderne (1949).

INTRODUCTION

En septembre 2009, la rencontre d'un enfant hors du commun m'a forcé à réviser mes idées sur l'apprentissage. J'étais en visite à l'hôpital Sarah de Brasilia, un centre de soins à l'architecture blanche inspirée d'Oscar Niemeyer, dédié à la rééducation neurologique et avec qui mon laboratoire collabore depuis une dizaine d'années. Sa directrice, Lucia Braga, me propose de rencontrer l'un de ses patients : Felipe, un gamin de 7 ans, dont la moitié passée à l'hôpital. Elle m'explique que cet enfant, à 4 ans, a reçu une balle perdue (ce qui n'est hélas pas rare au Brésil). Le projectile lui a sectionné la moelle épinière : il est presque totalement paralysé des quatre membres (tétraparétique). La balle a également fauché les aires visuelles du cortex : il est aveugle. Pour l'aider à respirer, une ouverture a été pratiquée dans sa trachée à la base du cou. Et depuis trois ans, il habite une chambre d'hôpital, enfermé dans le cercueil de son corps inerte.

Dans le couloir qui mène à sa chambre, je me prépare mentalement à découvrir un grand handicapé. Et je rencontre... Felipe, un petit garçon comme tous les enfants de 7 ans, au visage plein de vie, bavard, curieux de tout. Il parle à la perfection, avec un vocabulaire riche, et me questionne avec espièglerie sur les mots du français. J'apprends qu'il est passionné par les langues et qu'il ne

façonner une représentation du monde ? Les comprendre nous permettrait-il d'apprendre mieux et plus vite ? Et pourrait-on s'en inspirer pour construire des machines plus performantes, des intelligences artificielles qui nous imitent, voire nous dépassent ? Telles sont quelques-unes des questions auxquelles ce livre tente de répondre, dans une perspective résolument pluridisciplinaire, en mobilisant les recherches des sciences cognitives et des neurosciences, mais aussi de l'intelligence artificielle et des recherches en éducation.

Pourquoi l'apprentissage ?

Pourquoi devons-nous apprendre ? L'existence même de la faculté d'apprentissage pose question. Ne vaudrait-il pas mieux que nos enfants sachent parler et réfléchir dès le premier jour, telle Athéna dont la légende dit qu'elle sortit toute armée et casquée du crâne de Zeus, en poussant son cri de guerre ? Pourquoi ne naissons-nous pas précâblés, avec un logiciel préprogrammé et doté de toutes les connaissances nécessaires à notre survie ? Dans la lutte pour la vie que décrit Darwin, un animal qui naîtrait mature, avec plus de savoir que les autres, ne devrait-il pas finir par l'emporter ? Pourquoi l'évolution a-t-elle donc inventé l'apprentissage ?

Ma réponse est simple : le précâblage complet du cerveau n'est ni possible ni souhaitable. Impossible, vraiment ? Oui, car si notre ADN devait spécifier tous les détails de nos connaissances, il n'aurait simplement pas la capacité de stockage nécessaire. Nos 23 paires de chromosomes contiennent 3 milliards de paires de « lettres » A, C, G, T – les molécules adénine, cytosine, guanine et thymine. Combien cela fait-il d'informations ? L'information se mesure en bits : une décision binaire, 0 ou 1. Comme

chacune des 4 lettres du génome code 2 bits (on peut les coder comme 00, 01, 10 et 11), cela fait un total de 6 milliards de bits – mais attention, dans les ordinateurs actuels, on compte en octets, qui sont des séquences de 8 bits. Le génome humain se réduit donc à environ 750 mégaoctets – le contenu d'un CD-ROM ou d'une petite clé USB ! Et ce calcul élémentaire ne tient même pas compte des nombreuses redondances qui parsèment notre ADN.

À partir de cette modeste somme d'informations héritées des millions d'années d'évolution, notre génome, initialement confiné à une seule cellule, l'ovule fécondé, parvient à organiser l'ensemble du corps – chaque molécule de chacune des cellules de notre foie, de nos reins, de nos muscles, et bien sûr de notre cerveau : 86 milliards de neurones, 1 000 milliers de milliards de connexions... Comment pourrait-il les définir une par une ? En supposant que chaque connexion ne code qu'un seul bit, ce qui est très certainement une sous-estimation, la capacité de notre cerveau est de l'ordre de 100 téraoctets (environ 10^{15} bits), soit cent mille fois plus que l'information contenue dans notre génome. Paradoxe : le palais fantastique qu'est notre cerveau contient cent mille fois plus de détails que le plan de l'architecte ! Je n'y vois qu'une seule explication : le gros œuvre se construit en suivant les lignes directrices de l'architecte (notre génome), tandis que les détails sont laissés au maître d'œuvre, qui les adapte au terrain (l'environnement). Précâbler un cerveau humain dans tous ses détails serait rigoureusement impossible, c'est pourquoi l'apprentissage doit prolonger l'œuvre des gènes.

Ce simple argument comptable, toutefois, ne suffit pas à expliquer pourquoi l'apprentissage est universellement répandu dans le monde animal. En effet, même des organismes simples et dépourvus de cortex, comme le ver de terre, la mouche drosophile ou le concombre de mer, apprennent bon nombre de leurs comportements. Prenez le petit ver qu'on appelle « nématode », ou *C. elegans*,

et qui est rapidement devenu une star de laboratoire. Cet organisme est incroyablement précâblé : la plupart des individus comprennent exactement 959 cellules, dont 302 neurones, dont toutes les connexions sont connues et reproductibles. Et pourtant, il apprend². Les chercheurs le considéraient initialement comme une sorte d'automate tout juste capable de ramper en avant ou en arrière, mais ils se sont ensuite aperçus qu'il possédait au moins deux formes d'apprentissage : par habitude et par association. L'habitude signifie que l'organisme s'adapte à la présence répétée d'une stimulation (par exemple une molécule dans l'eau) et finit par ne plus y répondre. L'association, quant à elle, consiste à découvrir et à retenir en mémoire quels aspects de l'environnement prédisent les sources de nourriture ou de danger. Le ver nématode s'avère être un champion de l'association, capable de se souvenir que tel goût, telle odeur ou telle température ont été associés par le passé à de la nourriture (des bactéries) ou à des molécules repoussantes (l'odeur d'ail) et d'utiliser cette information pour choisir son chemin dans son environnement.

Avec son petit nombre de neurones, le nématode aurait très bien pu être précâblé. S'il ne l'est pas, c'est parce qu'il est avantageux, pour sa survie, de s'adapter aux conditions spécifiques dans lesquelles il naît. Même des organismes génétiquement identiques ne naissent pas forcément dans le même environnement. Tous ont intérêt à s'adapter rapidement à des conditions fondamentalement imprévisibles. La sélection naturelle, qui est l'algorithme découvert par Darwin, parvient certes à adapter chaque organisme à sa niche écologique, mais elle le fait avec une lenteur affligeante : il faut que des générations meurent, faute d'être adaptées, avant qu'une mutation favorable ne puisse augmenter la survie. La faculté d'apprentissage, elle, agit bien plus vite : elle modifie le comportement en quelques minutes. Et c'est ce qui fait tout l'intérêt

de l'apprentissage : s'adapter, le plus vite possible, à des conditions imprévisibles.

C'est pourquoi l'évolution a inventé la faculté d'apprendre. Au fil des générations, elle a découvert qu'il était utile de laisser certains paramètres de l'organisme libres de se modifier pour mieux s'ajuster aux aspects les plus changeants de son environnement. Certains aspects de la physique du monde sont strictement invariables : la gravitation est universelle, la propagation de la lumière ou des sons dans l'air ne changent pas du jour au lendemain, et c'est pourquoi nous n'avons – Dieu merci ! – pas besoin d'apprendre à faire pousser nos oreilles, nos yeux, ou les labyrinthes de notre système vestibulaire qui mesurent l'accélération de notre corps : toutes ces propriétés de notre corps et de notre cerveau sont codées génétiquement. Par contre, l'espacement de nos yeux, le poids et la longueur de nos membres, la hauteur de notre voix varient, et c'est pourquoi notre cerveau doit les apprendre. Notre pensée est le résultat d'un compromis : énormément d'inné (toutes les grandes catégories intuitives à l'aide desquelles nous subdivisons le monde en images, sons, mouvements, objets, animaux, personnes, causes...), mais encore plus d'acquis qui raffine ces compétences précoces.

Notre espèce a fait de l'apprentissage sa spécialité. Dans notre cerveau, des milliards de paramètres sont libres de s'adapter à notre milieu, notre langue, notre culture, nos parents, notre nourriture... Ces paramètres sont choisis avec soin : au sein de notre cerveau, l'évolution a défini, avec précision, quels circuits sont précâblés et lesquels sont ouverts à l'environnement. Dans notre espèce, la part d'apprentissage est particulièrement vaste, car notre enfance se prolonge pendant de longues années. Par le biais du langage et des mathématiques, nos espaces d'hypothèses se démultiplient en une combinatoire potentiellement infinie – même s'ils s'appuient toujours sur des fondations fixes et invariables, héritées de notre évolution.

Homo docens

S'il fallait résumer d'un mot le talent particulier de notre espèce, je retiendrais donc le verbe « apprendre ». Plus que des *Homo sapiens* nous sommes des *Homo docens* – car ce que nous savons du monde, pour la plus grande part, ne nous a pas été donné : nous l'avons appris de notre environnement ou de notre entourage. Aucun autre animal n'a su, comme nous, découvrir les secrets du monde naturel. Grâce à l'extraordinaire flexibilité de ses apprentissages, notre espèce est parvenue à quitter sa savane natale pour traverser déserts, montagnes, océans et, en quelques milliers d'années seulement, conquérir les îles les plus lointaines, les grottes les plus profondes, les banquises les plus glaciales, et jusqu'à la Lune. Depuis la conquête du feu et la fabrication des outils jusqu'à l'invention de l'agriculture, de la navigation ou de la fission atomique, l'histoire de l'humanité n'est que constante réinvention. À la source de tous ces triomphes, un seul secret : l'extraordinaire faculté de notre cerveau à formuler des hypothèses et à les sélectionner pour transformer certaines d'entre elles en connaissances solides sur notre environnement.

Cette remarquable capacité d'apprentissage, l'humanité a découvert qu'elle pouvait encore l'augmenter grâce à une institution : l'école. La pédagogie active est l'apanage de notre espèce : aucun autre animal ne prend le temps d'enseigner de nouveaux talents à ses enfants, activement, en prêtant attention à leurs difficultés et à leurs erreurs. L'invention de l'école, en systématisant l'instruction informelle présente dans toutes les sociétés humaines, a décuplé notre potentiel cérébral. Nous avons compris qu'il fallait profiter de cette exubérante plasticité du cerveau de l'enfant pour lui inculquer un maximum d'informations et de talents. Au fil des siècles, notre système scolaire n'a cessé de progresser en efficacité, commençant toujours

plus tôt, dès la maternelle, et se prolongeant pendant une quinzaine d'années, voire plus : un nombre toujours croissant de cerveaux bénéficient d'un enseignement supérieur à l'université, véritable raffinerie neuronale où nos circuits cérébraux acquièrent leurs meilleurs talents.

Aujourd'hui, l'Éducation nationale peut être considérée comme le principal accélérateur de notre cerveau. Sa place de choix, parmi les tout premiers postes de dépenses de l'État, se justifie aisément : sans elle, nos circuits corticaux resteraient des diamants bruts. La complexité de nos sociétés contemporaines ne doit son existence qu'aux multiples améliorations que l'éducation a apportées à notre cortex : lecture, écriture, calcul, algèbre, musique, sens du temps et de l'espace, raffinement de la mémoire... Sait-on, par exemple, que la capacité de mémoire immédiate d'un analphabète, le nombre de syllabes ou de chiffres qu'il peut répéter, est près de deux fois plus faible que celle d'une personne scolarisée ?

Apprendre à apprendre

L'éducation démultiplie les facultés déjà considérables de notre cerveau – mais pourrait-elle faire mieux encore ? À l'école, à l'université et au travail, contraints de nous adapter toujours plus vite, nous jonglons avec nos algorithmes cérébraux d'apprentissage. Cependant, nous le faisons d'une façon intuitive, sans avoir jamais appris à apprendre. Personne ne nous a expliqué les règles qui font que notre cerveau mémorise et comprend ou, au contraire, oublie et se trompe. C'est dommage, car les données abondent. Un excellent site anglais, l'Education Endowment Fund (EEF), recense les interventions pédagogiques qui marchent³. Et l'une des plus efficaces, selon lui, c'est la métacognition, c'est-à-dire le fait de mieux

connaître son propre fonctionnement cognitif. Savoir apprendre est l'un des plus importants facteurs de réussite scolaire.

Au cours des trente dernières années, d'importants progrès ont été réalisés dans la compréhension des principes fondamentaux de la plasticité cérébrale et de l'apprentissage. Le fonctionnement de la mémoire, le rôle de l'attention, l'importance du sommeil sont autant de découvertes riches de conséquences pour chacun d'entre nous. Lorsque vous refermerez ce livre, j'espère que vous en saurez beaucoup plus sur vos propres processus d'apprentissage. Il me paraît fondamental que chaque enfant, que chaque adulte prenne la pleine mesure du potentiel de son propre cerveau et aussi, bien sûr, de ses limites. Les sciences cognitives contemporaines, par la dissection systématique qu'elles pratiquent de nos algorithmes mentaux et de leurs mécanismes cérébraux, revisitent le célèbre adage socratique « Connais-toi toi-même ». Aujourd'hui, il ne s'agit plus de pratiquer l'introspection, mais de mieux connaître la subtile mécanique neuronale qui engendre nos pensées, afin de mieux la maîtriser et de la mettre au service de nos goûts et de nos besoins.

Et je pense aussi, bien entendu, aux professionnels de l'apprentissage que sont les enseignants. Je suis profondément convaincu qu'on ne peut pas enseigner convenablement sans posséder, implicitement ou explicitement, un modèle mental de ce qui se passe dans la tête de l'enfant : quelles sont ses intuitions, correctes ou erronées, quelles sont les étapes par lesquelles il doit passer pour progresser, et quels facteurs l'aident à développer ses compétences.

Tous les enfants démarrent dans la vie avec une architecture cérébrale similaire. Il existe donc des principes fondamentaux que tout enseignement, s'il se veut efficace, se doit de respecter. Dans ce livre, nous en donnons de nombreux exemples. Les compétences des très jeunes enfants pour le langage, l'arithmétique, la logique

ou l'estimation des probabilités démontrent l'existence d'intuitions précoces et abstraites sur lesquelles l'enseignement doit s'appuyer. La réalité de pathologies du développement telles que la dyslexie, la dyscalculie, la dyspraxie ou les troubles de l'attention ne fait plus de doute, et des stratégies existent pour les détecter et les compenser. L'un des objectifs de ce livre est de mieux diffuser ces connaissances, afin que chaque enseignant, mais aussi chaque parent, puisse en tirer les conséquences et adapter sa manière d'enseigner.

Le défi des machines

L'intelligence humaine est aujourd'hui confrontée à un nouveau défi : elle n'est plus la seule à savoir apprendre. Dans tous les domaines du savoir, des algorithmes défient notre espèce, car ils apprennent, parfois mieux que nous, à reconnaître les visages ou les voix, à transcrire la parole, à traduire des langues étrangères, à contrôler des machines, et même à jouer aux échecs ou au jeu de go. Les algorithmes de *machine learning* nourrissent aujourd'hui une industrie multimilliardaire qui, de plus en plus, s'inspire de notre cerveau. Comment fonctionnent-ils ? Leurs principes peuvent-ils nous aider à comprendre ce qu'est l'apprentissage ? Parviennent-ils déjà à imiter le fonctionnement de notre cerveau, ou ont-ils encore beaucoup à apprendre ?

Dans ce livre, je consacre une section entière à ces questions. Si les avancées actuelles de l'informatique sont fascinantes, leurs limites sont nettes. Les algorithmes d'apprentissage profond conventionnels ne font qu'imiter une petite partie du fonctionnement de notre cerveau : celle qui correspond aux premières étapes de traitement sensoriel, les fameux 200 ou 300 millisecondes pendant lesquelles

Aujourd'hui, des algorithmes nouveaux, qu'on appelle bayésiens, du nom du révérend Thomas Bayes qui en a esquissé la théorie dès le XVIII^e siècle, commencent à formaliser et à implémenter cette vision nouvelle de l'apprentissage. Je suis prêt à parier qu'ils vont révolutionner la *machine learning*, tant ils s'avèrent déjà capables d'extraire des informations abstraites avec une efficacité proche de celle d'un scientifique humain.

*

Partons donc, ensemble, explorer ce que nous comprenons aujourd'hui de l'apprentissage. Je vous propose un voyage en trois étapes.

Dans la première partie, intitulée « Qu'est-ce qu'apprendre ? », nous ferons le point sur les théories actuelles de l'apprentissage, à la lumière de leur implémentation concrète dans les ordinateurs. Ce sera l'occasion de formaliser ce qu'apprendre veut dire. En comparant les performances des algorithmes informatiques avec ceux de notre cerveau, *in silico* versus *in vivo*, nous commencerons à entrevoir comment l'apprentissage, pour être optimal, doit s'appuyer sur un usage raisonné des probabilités et des statistiques. Entre le tout inné et le tout acquis, un nouveau modèle émerge : celui du cerveau bayésien, véritable statisticien neuronal. Selon cette théorie, nos gènes, au sein du cerveau en développement, mettent en place de vastes espaces d'hypothèses *a priori*, ainsi que les mécanismes qui permettent de les adapter aux entrées du monde extérieur – et l'environnement sélectionne, parmi ces hypothèses, celles qui correspondent le mieux au monde extérieur.

Cette théorie correspond-elle vraiment au fonctionnement de notre cerveau ? Dans une deuxième section, « Comment notre cerveau apprend », nous nous pencherons sur le berceau du bébé humain, une véritable machine à apprendre, souvent imitée mais jamais égalée. Les données

récentes démontrent que l'enfant est bien ce statisticien en herbe que prédit la théorie bayésienne. Ses intuitions fulgurantes, dans le domaine du langage, de la géométrie, des nombres ou des statistiques, confirment qu'il n'a rien d'une ardoise vierge, une *tabula rasa*. Dès la naissance, les circuits neuronaux de l'enfant sont bien organisés et projettent des hypothèses sur le monde extérieur. Mais ils possèdent aussi une marge considérable de plasticité, qui se traduit par un bouillonnement permanent de modifications cellulaires. Au sein de cette machine statistique, l'inné et l'acquis, loin de s'opposer, se combinent. Il en résulte un système structuré mais plastique, aussi bien capable de s'autoréparer en cas de lésion cérébrale que de recycler ses circuits pour apprendre à lire ou à faire des mathématiques.

Dans la troisième partie, « Les quatre piliers de l'apprentissage », je détaillerai quelques-unes des astuces qui font de notre cerveau le plus efficace dispositif d'apprentissage que l'on connaisse aujourd'hui. Quatre mécanismes essentiels modulent massivement notre capacité d'apprendre. En premier vient l'attention : un ensemble de circuits neuronaux qui sélectionnent, amplifient et propagent les signaux auxquels nous accordons de l'importance – et multiplient par cent ou par mille leur représentation en mémoire. En deuxième, l'engagement actif : un organisme passif n'apprend pratiquement rien, car l'acte d'apprendre exige que le cerveau génère activement des hypothèses, avec curiosité. Troisième volet, et complément naturel de l'engagement actif : les signaux d'erreur et de surprise. Ce sont eux qui, en se propageant dans tout le cerveau, viennent corriger nos modèles mentaux, éliminer les hypothèses inappropriées et stabiliser les plus justes. Enfin, quatrième facteur, la consolidation : au fil du temps, notre cerveau compile ce qu'il a acquis et le transfère en mémoire à long terme, afin de libérer les ressources pour d'autres apprentissages. La répétition joue un rôle essentiel

PREMIÈRE PARTIE

QU'EST-CE QU'APPRENDRE ?

« L'intelligence peut être considérée comme la capacité de convertir des informations brutes en connaissances utiles et exploitables. »

Demis HASSABIS,
fondateur de la société DeepMind (2017).

Qu'est-ce qu'apprendre ? Ce verbe possède la même racine latine qu'*appréhender* : prendre, attraper, saisir. Apprendre, c'est donc saisir par la pensée : emporter en soi une parcelle de réalité, un modèle de la structure du monde. Comme le dit bien Demis Hassabis, le directeur de la société DeepMind et l'un des chercheurs les plus actifs en intelligence artificielle, apprendre consiste à transformer les informations qui nous parviennent en un jeu de connaissances utiles et exploitables. Grâce à l'apprentissage, les données brutes qui frappent nos sens se muent en idées abstraites, raffinées et suffisamment générales pour que nous puissions les exploiter dans des situations nouvelles. En sciences cognitives, nous les appelons des *modèles internes*.

Dans les pages qui suivent, nous allons passer en revue ce que l'intelligence artificielle et les sciences cognitives nous ont appris de ces modèles internes et de la façon dont ils se transforment avec l'apprentissage. Nous commencerons par examiner les réseaux de neurones conventionnels, ces modèles informatiques qui s'inspirent du cerveau. Comment font-ils pour ajuster leurs paramètres afin de modéliser le monde extérieur ? Nous verrons qu'en dépit de leurs succès, ils ne capturent, pour l'instant, qu'une fraction des capacités du cerveau humain. Le langage,

Comment un réseau de neurones apprend

Apprendre, c'est affiner un modèle du monde. Notre cerveau porte en lui des milliers de modèles du monde extérieur. Métaphoriquement, ce sont comme des maquettes, des modèles réduits plus ou moins fidèles à la réalité qu'ils représentent. Nous avons tous dans la tête, par exemple, un plan de notre quartier, ou une carte mentale de notre maison ou de notre bureau – nous pouvons fermer les yeux et le voir par la pensée.

La richesse de ces représentations mentales, pour la plupart inconscientes, dépasse l'imagination. Notre cerveau d'adulte abrite des milliers de modèles réduits du monde. Nous disposons par exemple d'un vaste modèle mental de la langue française, qui nous permet de comprendre les mots que vous lisez en ce moment même et de deviner que *plastovski* n'est pas un mot du français, tandis que *sextant* l'est et que *blascon* pourrait l'être. Notre cerveau comprend également plusieurs modèles de notre corps : il s'en sert pour coder où se trouvent nos membres, comment les diriger, à quelle vitesse ils se meuvent, comment garder l'équilibre... D'autres modèles mentaux représentent nos connaissances des objets et de nos interactions avec eux : savoir tenir un stylo, écrire ou faire du vélo. D'autres

Apprendre, c'est ajuster les paramètres d'un modèle mental

Ajuster un modèle mental, c'est parfois très simple. Comment faisons-nous, par exemple, pour contrôler nos mouvements afin de tendre la main vers un objet que nous voyons ? René Descartes l'avait déjà pressenti : nous devons apprendre à transformer les entrées visuelles en commandes musculaires (figure 2). Vous pouvez l'expérimenter sur vous-même en quelques secondes : essayez d'attraper un bâton alors que vous portez les lunettes de quelqu'un d'autre, si possible très myope. Mieux encore, si vous le pouvez, munissez-vous de lunettes à prismes qui décalent la vision d'une dizaine de degrés vers la gauche, et tentez d'attraper un objet – vous pouvez faire cette expérience à l'exposition *C3RV34U* que j'ai organisée à la Cité des sciences de Paris. Vous verrez que votre premier geste est faux : à cause des prismes, votre main atterrit largement à droite du bâton que, pourtant, vous visez. Progressivement, vous ajustez vos mouvements vers la gauche. Par tâtonnements successifs, vos gestes deviennent de plus en plus précis : votre cerveau a appris à corriger le décalage de vos yeux. Enlevez à présent les lunettes, et saisissez le bâton : vous serez surpris de voir votre main se diriger du mauvais côté, bien trop à gauche !

Que s'est-il passé ? Au cours de ce bref apprentissage, votre cerveau a réajusté son modèle interne de la vision. Un paramètre de ce modèle, qui correspond au décalage entre la scène visuelle et l'orientation du corps, a été recalibré. Votre cerveau s'est comporté comme un tireur d'élite qui effectue d'abord un tir d'essai, puis ajuste la hausse de son viseur afin de tirer plus juste. Cet apprentissage est très rapide : quelques essais suffisent à corriger le décalage entre le geste et la vision. Cependant, le nouveau

PREMIÈRE PARTIE

Qu'est-ce qu'apprendre ?

CHAPITRE 1

Comment un réseau de neurones apprend

<i>Apprendre, c'est ajuster les paramètres d'un modèle mental</i>	41
<i>Apprendre, c'est exploiter le potentiel de la combinatoire</i>	44
<i>Apprendre, c'est minimiser ses erreurs</i>	46
<i>Apprendre, c'est explorer l'espace des possibles</i>	53
<i>Apprendre, c'est optimiser une fonction de récompense.....</i>	55
<i>Apprendre, c'est restreindre l'espace de recherche</i>	60
<i>Apprendre, c'est projeter des hypothèses a priori.....</i>	62

Pourquoi notre cerveau apprend mieux que les machines

Les succès récents de l'intelligence artificielle peuvent laisser croire que nous avons enfin compris comment imiter l'apprentissage et l'intelligence de l'espèce humaine dans des machines – au point que, selon certains prophètes autoproclamés, les machines seraient sur le point de nous dépasser. Rien n'est plus faux. En fait, la plupart des chercheurs en sciences cognitives, même s'ils admirent les progrès récents des réseaux de neurones artificiels, savent très bien que ces machines demeurent limitées. Dans un article récent, j'ai argumenté que les réseaux de neurones conventionnels correspondent étroitement aux opérations que notre cerveau réalise inconsciemment, en deux dixièmes de seconde, lorsqu'il perçoit une image : il la reconnaît, la catégorise et accède à son sens¹³. Cependant, notre cerveau, lui, va beaucoup plus loin : il est capable de l'explorer consciemment, avec attention, point par point, pendant plusieurs secondes. Il formule des représentations symboliques, des théories explicites du monde que nous pouvons partager avec d'autres personnes par le biais du langage.

DEUXIÈME PARTIE

COMMENT NOTRE CERVEAU APPREND

« Au-dedans de son âme, chacun possède la puissance du savoir, ainsi que l'organe au moyen duquel chacun acquiert l'instruction. »

PLATON, *La République* (~380 av. J.-C.).

Le savoir invisible : les étonnantes intuitions des bébés

Quoi de plus démuni, en apparence, qu'un nouveau-né ? Quoi de plus raisonnable que de penser, avec Locke, que cette « ardoise vierge » doit encore recevoir la marque de l'environnement ? Rousseau le martelait déjà avec force dans *Émile ou De l'éducation* (1762) : « Nous naissons capables d'apprendre, mais ne sachant rien, ne connaissant rien. » Près de deux siècles plus tard, l'hypothèse est reprise par Alan Turing, père de l'informatique contemporaine : « Il est vraisemblable que le cerveau de l'enfant soit comme un cahier qu'on vient d'acheter chez le papetier. Guère de mécanismes, beaucoup de pages vierges. »

Nous savons aujourd'hui que rien n'est plus faux. Les apparences sont trompeuses. En dépit de son immaturité, le petit de l'espèce humaine possède déjà un vaste savoir, hérité de son histoire évolutive. Mais cela ne se voit pas dans son comportement. Il a fallu des avancées méthodologiques importantes en sciences cognitives pour mettre en évidence l'extraordinaire base de données avec laquelle chaque bébé vient au monde. Objets, nombres,

Naissance d'un cerveau

« L'enfant naît avec un cerveau inachevé et non pas, comme le postulat de l'ancienne pédagogie l'affirmait, avec un cerveau inoccupé. »

Gaston BACHELARD,
La Philosophie du non (1940).

L'existence des compétences précoces du bébé réfute l'hypothèse que son cerveau n'est qu'une ardoise vierge, une table rase, une page blanche uniquement capable d'absorber l'empreinte de son environnement. Elle conduit à une prédiction simple : si l'on examine le cerveau d'un nouveau-né, on doit y observer, dès la naissance et même avant, des structures cérébrales bien organisées, correspondant à chacun des grands domaines du savoir.

Cette idée a longtemps été contestée. Jusqu'à il y a une vingtaine d'années, le cerveau du nouveau-né demeurait une *terra incognita*. L'imagerie cérébrale venait d'être inventée et elle n'avait pas encore été appliquée au cerveau en développement. La vision théorique prédominante était celle de l'empirisme, l'idée que le cerveau naît vierge de toute connaissance et subit l'empreinte de son environnement. C'est seulement avec l'avènement de méthodes raffinées d'imagerie par résonance magnétique que l'on a enfin pu visualiser l'organisation précoce du cerveau

La part de l'acquis

Je viens d'insister sur la part d'inné dans notre cerveau, trop souvent négligée. Mais, bien sûr, cette organisation précoce ne reste pas inchangée : elle se modifie et s'enrichit sous l'effet de l'expérience. C'est l'autre face de la médaille : comment l'apprentissage modifie-t-il les circuits du cerveau de l'enfant ? Pour le comprendre, il nous faut remonter un siècle en arrière, jusqu'aux découvertes fondamentales du grand anatomiste espagnol Ramón y Cajal.

Qu'est-ce que la plasticité cérébrale ?

« Tout le monde sait que les talents d'un pianiste [...] exigent des années de gymnastique musculaire et mentale. Pour comprendre ce phénomène important, il nous faut admettre qu'en plus du renforcement des voies organiques préétablies, des voies nouvelles se créent par ramification et croissance progressive des arbres dendritiques et axonaux. »

SANTIAGO RAMÓN Y CAJAL,
prix Nobel de médecine (1904).

Recyclez votre cerveau

Résumons-nous. Tous les bébés viennent au monde avec un riche savoir, un jeu d'hypothèses universelles. Leurs circuits cérébraux sont bien organisés, ce qui leur confère des intuitions fortes dans toutes sortes de domaines : objets, personnes, temps, espace, nombres... Leurs compétences statistiques sont remarquables et c'est en véritables scientifiques en herbe qu'ils sélectionnent les meilleurs modèles du monde.

Dès la naissance, tous les grands faisceaux de connexions sont en place, mais la plasticité cérébrale peut en réorganiser les terminaisons. Synapses et faisceaux de connexions se modifient en permanence chaque fois que nous apprenons des connaissances nouvelles. Envoyer un enfant à l'école, enrichir son environnement, c'est modifier profondément son cerveau et y graver des compétences qu'il gardera tout au long de sa vie. Cette plasticité est toutefois contrainte, à la fois dans l'espace (quelques millimètres) et dans le temps : beaucoup de circuits se ferment à l'apprentissage après quelques mois ou quelques années de vie.

Il nous reste à comprendre comment l'éducation joue avec la plasticité cérébrale précoce. Comment se fait-il que l'espèce humaine puisse étendre ses capacités dans des directions jamais anticipées par l'évolution ? Comment ne pas être fasciné de voir le primate humain, seul en

TROISIÈME PARTIE

LES QUATRE PILIERS DE L'APPRENTISSAGE

Nous venons de voir que tous nos apprentissages reposent sur la modification des circuits de notre cerveau pendant une période sensible où ceux-ci sont encore flexibles et possèdent une marge de plasticité. Cependant, l'existence de la plasticité synaptique ne suffit pas à expliquer l'extraordinaire succès de notre espèce. En effet, cette plasticité est omniprésente dans le monde animal : même la mouche, le ver nématode ou la limace de mer possèdent des synapses modifiables.

Si nous sommes devenus *Homo docens*, si l'apprentissage est devenu notre niche écologique et la principale raison de notre succès planétaire, c'est que notre cerveau contient toute une panoplie d'astuces supplémentaires. Au fil de son évolution, notre cerveau s'est doté de quatre fonctions majeures qui maximisent la vitesse avec laquelle nous parvenons à extraire des informations de notre environnement. Je les appelle les quatre piliers de l'apprentissage, parce que chacun d'eux est indispensable à nos constructions mentales : qu'un seul de ces piliers chancelle et c'est l'ensemble de l'édifice qui vacille. Inversement, chaque fois que nous avons besoin d'apprendre, et d'apprendre vite, nous pouvons nous appuyer sur eux pour optimiser nos efforts. Ces piliers sont :

- **l'attention**, qui amplifie l'information sur laquelle nous nous concentrons ;
- **l'engagement actif**, un algorithme qu'on appelle également « curiosité », et qui incite notre cerveau à évaluer sans relâche de nouvelles hypothèses ;
- **le retour sur erreur**, qui compare nos prédictions avec la réalité et corrige nos modèles du monde ;
- **la consolidation**, qui automatise et fluidifie ce que nous avons appris, notamment pendant le sommeil.

Au cours de l'évolution, ces fonctions ne sont pas apparues en un jour, et elles ne sont donc pas uniques à notre espèce. Cependant, grâce à notre cerveau social et à notre faculté de langage, nous les exploitons de façon plus efficace que tous les autres animaux – notamment dans nos familles, nos écoles et nos universités.

Faire attention, s'engager, se mettre à l'épreuve et savoir consolider ses acquis sont les secrets d'un apprentissage réussi. L'enseignant qui parvient à mobiliser ces quatre fonctions chez chacun de ses élèves est certain de maximiser la vitesse et l'efficacité avec lesquelles sa classe apprend. Chacun de nous devrait donc apprendre à les apprivoiser – ce qui nécessite de bien comprendre comment chacun de ces systèmes fonctionne et à quoi il sert.

L'attention

Imaginez que vous arriviez à l'aéroport juste à temps pour prendre un avion. Tout, dans votre comportement, met en évidence la concentration de votre attention. L'esprit en alerte, vous recherchez le panneau des départs, sans vous laisser distraire par le flot de passagers, puis vous identifiez la ligne qui indique votre vol. Des publicités criardes vous interpellent, mais vous ne les voyez même pas : vous vous dirigez en droite ligne vers le guichet d'enregistrement. Soudain, vous vous retournez, car un ami vient de prononcer votre prénom : ce message, jugé prioritaire par votre cerveau, s'empare de votre attention et envahit votre conscience... vous faisant oublier le numéro du guichet.

Telles sont quelques-unes des fonctions clés de l'attention : éveil et alerte, sélection et distraction, orientation et filtrage. En sciences cognitives, on appelle « attention » l'ensemble des mécanismes par lesquels notre cerveau sélectionne une information, l'amplifie, la canalise et l'approfondit. Ce sont des mécanismes anciens dans l'évolution : le chien qui oriente ses oreilles, la souris qui se fige à l'écoute d'un craquement déploient des circuits attentionnels très proches des nôtres¹⁹².

Pourquoi l'évolution a-t-elle intégré, chez tous les animaux, des mécanismes attentionnels ? Parce que ces circuits résolvent un problème bien précis : la saturation en

L'engagement actif

Prenez deux chatons. Donnez au premier un collier. Quant au second, placez-le dans une nacelle. Enfin, reliez-les à un manège (figure 31). Ce dispositif assure que les mouvements des deux chatons sont rigoureusement identiques, l'un étant actif et l'autre passif. Le premier explore l'environnement de son propre chef, tandis que le second bouge exactement de la même manière, mais sans contrôle.

Telle est l'expérience classique du manège qu'ont menée Richard Held et Alan Hein en 1963 – à une époque où l'éthique de l'expérimentation animale n'était clairement pas aussi développée qu'aujourd'hui ! Pendant quelques semaines, les deux chatons vécurent, trois heures par jour, dans un grand cylindre tapissé uniquement de barres verticales. Tous deux y recevaient exactement les mêmes entrées visuelles. Et pourtant, leur développement fut très différent, et cette expérience simple a conduit à une découverte fondamentale : l'exploration active du monde est essentielle au bon développement de la vision²³⁶. Malgré la pauvreté de son environnement, constitué uniquement de barres verticales, le chaton actif développe rapidement une vision normale. Le chaton passif, par contre, perd ses capacités visuelles et, à la fin de l'expérience, échoue dans des tests élémentaires d'exploration visuelle. Dans le test de

Les trois façons dont l'école peut tuer la curiosité

Tous les parents ont la nostalgie de la petite enfance, où l'esprit de leur bambin pétillait de curiosité. Entre 2 et 5 ans, l'enfant est curieux de tout. Son mot favori est « pourquoi » : il ne cesse d'expérimenter sur le monde et d'interroger les adultes afin d'étancher sa soif de savoir. Cet appétit qui paraissait insatiable finit pourtant par s'évanouir, souvent après quelques années d'école. Certains enfants restent curieux de tout, mais d'autres se renferment. Leur engagement actif se mue en morne passivité. La science de la curiosité peut-elle expliquer pourquoi ? Nous n'avons pas toutes les réponses, mais je voudrais proposer ici quelques éléments de spéculation informée.

Première hypothèse : le manque de stimulation appropriée au niveau de l'enfant. Selon l'algorithme que nous venons de décrire, il est normal que la curiosité diminue au fil des apprentissages : mieux nous maîtrisons un domaine, plus nous arrivons aux limites de ce qu'il nous offre à apprendre et moins il nous intéresse. Pour maintenir la curiosité, il faut donc que l'école continue de fournir, au superordinateur qu'est le cerveau, des stimulants à la hauteur de l'intelligence des enfants. Or ce n'est pas toujours le cas. Les élèves les plus avancés peuvent manquer de stimulation : après quelques mois, leur curiosité se fane et ils n'attendent plus grand-chose de l'école, parce que leur système métacognitif leur prédit que, malheureusement, ils n'y apprendraient guère. Une seule solution : piquer leur curiosité en leur donnant du nouveau grain à moudre – des langues à déchiffrer, des casse-tête à résoudre, de vrais défis à leur intelligence.

À l'autre bout de la courbe, les élèves en difficulté, eux, peuvent s'étioler pour la raison inverse. C'est toujours la

métacognition qui est en cause : ils n'ont plus de raison d'être curieux, car ils ont appris... qu'ils ne parviendront pas à apprendre. Leur expérience passée a gravé, au plus profond de leurs circuits métacognitifs, une règle simple (quoique fausse) : tu es incapable d'apprendre tel ou tel domaine. Ce n'est pas rare : les petites filles se convainquent que les mathématiques ne sont pas pour elles²⁶², certains enfants de banlieue que l'école leur est hostile et qu'ils n'y apprendront rien d'utile à leur avenir, et ainsi de suite. De tels jugements métacognitifs sont désastreux, car ils démotivent et tuent la curiosité dans l'œuf. Seule solution : remettre ces enfants en confiance en leur démontrant, par des problèmes adaptés à leur niveau, qu'ils sont parfaitement capables d'apprendre, à leur rythme, et qu'y parvenir porte en soi sa propre récompense. La théorie de la curiosité dit que, lorsqu'un enfant est découragé, qu'il soit brillant ou en difficulté, il faut avant tout lui redonner le goût d'apprendre en lui proposant des stimulations adaptées à ses capacités.

Deuxième cas de figure : la punition de la curiosité. L'appétit de découvertes de l'enfant peut être tué dans l'œuf par une organisation scolaire trop rigide. L'enseignement traditionnel, par le biais du cours magistral, peut dissuader l'enfant d'intervenir ou même de réfléchir. Il peut lui donner l'impression qu'il lui est simplement demandé de se taire, de se tenir calme et d'attendre la fin du cours. L'interprétation neurophysiologique de cette situation est simple : le signal de récompense lié à la curiosité entre en compétition avec les autres récompenses et punitions extérieures au sein du circuit de la dopamine. Il est donc possible de décourager la curiosité en sanctionnant chaque tentative d'exploration par une punition. Imaginez un enfant qui, chaque fois qu'il essaie d'intervenir, est tancé, moqué ou puni : question idiote, tu ferais mieux de te taire, tu resteras une demi-heure de plus à travailler... Son cerveau apprend très vite à ne plus tenter la moindre intervention : la récompense que son cerveau tirait du fait

de comprendre est largement compensée par les signaux négatifs qu'il reçoit. La punition répétée entraîne un syndrome d'impuissance acquise (*learned helplessness*), une sorte de paralysie physique et mentale associée au stress et à l'anxiété, dont la recherche animale démontre qu'elle inhibe les apprentissages²⁶³.

La solution ? Elle est bien connue de la plupart des enseignants. Il s'agit de récompenser la curiosité et non de la punir : encourager les questions, demander aux enfants de faire des exposés sur ce qui les passionne, féliciter chaque élève pour ses initiatives, même maladroitement... Les neurosciences de la motivation sont extrêmement claires : pour avoir envie de faire une action, il faut anticiper qu'elle conduira à une récompense, laquelle peut être directe (nourriture, sexe, confort) ou cognitive (un gain d'information). Trop d'enfants ont perdu toute curiosité, toute motivation d'apprendre, parce qu'ils ont appris à n'espérer aucune récompense de l'école.

Troisième effet qui peut décourager la curiosité : la transmission sociale des connaissances. Souvenez-vous que l'espèce humaine dispose de deux modes d'apprentissage : le mode actif, où l'enfant s'interroge comme un scientifique en herbe, et le mode réceptif, pédagogique, où il se contente d'enregistrer ce que d'autres lui enseignent. L'école encourage nettement le second mode – mais il se peut qu'elle décourage progressivement le premier, à mesure que l'enfant découvre que l'enseignant sait toujours tout mieux que lui.

Une expérience récente montre que cet effet est réel : l'attitude de l'enseignant peut tuer la curiosité de l'enfant²⁶⁴. On présente à des élèves de maternelle un étrange assemblage de tubes, totalement nouveau pour eux, et qui s'avère être un véritable tiroir à malices : en cherchant un peu, on découvre qu'un miroir, un klaxon, un jeu de lumière et une boîte à musique sont cachés dans les différents tuyaux. Donnez ce gadget à un gamin, et vous déclenchez

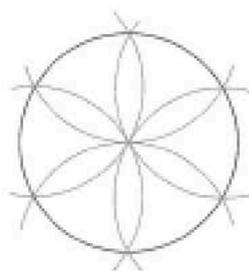
Le retour sur erreur

« Il faudrait apprendre à se tromper de bonne humeur. [...] Penser, c'est aller d'erreur en erreur. »

ALAIN (Émile Chartier),
Propos sur l'éducation (1932).

En 1940, le jeune Alexandre Grothendieck n'avait que 11 ou 12 ans. Il ne savait pas qu'il allait devenir l'un des plus influents mathématiciens du XX^e siècle, qui inspirerait toute une génération (c'est pour lui que fut fondé, en 1958, le célèbre Institut des hautes études scientifiques de Bures-sur-Yvette, qui a fécondé tant de médailles Fields). Mais le jeune Alexandre faisait déjà des mathématiques... avec plus ou moins de bonheur. Écoutons ses *Mémoires*²⁶⁵ :

« Vers l'âge de 11 ou 12 ans, alors que j'étais interné au camp de concentration de Rieucros (près de Mende), j'ai découvert les jeux de tracés au compas, enchanté notamment par les rosaces à six branches qu'on obtient en partageant la circonférence en six parties égales à l'aide de l'ouverture du compas reportée sur la circonférence à six reprises, ce qui fait retomber pile sur le point de départ. Cette constatation expérimentale m'avait convaincu que la longueur de la circonférence



La consolidation

Prenez un bon élève en fin de CP. Sa première année d'école s'est bien passée. Soutenu par les trois premiers piliers de l'apprentissage, il a vite appris à lire. Il s'est engagé activement dans la lecture, avec curiosité et enthousiasme. Il a appris à prêter attention à chaque mot, à chaque lettre, de la gauche vers la droite. Et, au fil des mois, il est parvenu à corriger ses erreurs pour décrypter fidèlement les correspondances entre les lettres et les sons, et reconnaître les mots irréguliers. Pourtant, ce n'est pas encore un lecteur fluide. Il lit lentement et avec effort. Que lui manque-t-il ? Il lui reste encore à déployer le quatrième pilier de tout apprentissage : la consolidation. Celle-ci doit encore rendre automatique et inconsciente l'activité de lecture qui, pour l'instant, mobilise toute son attention.

L'analyse de ses temps de réponse est révélatrice. Elle montre que plus les mots sont longs, plus il lui faut de temps pour les déchiffrer (figure 35). La courbe est linéaire, ce qui est caractéristique d'une opération sérielle, pas à pas : chaque lettre supplémentaire ajoute un cinquième de seconde au total. C'est tout à fait normal : à son âge, lire, c'est encore déchiffrer les lettres et les syllabes une par une²⁹². Mais ce n'est pas définitif : avec la pratique, dans les deux années qui suivent, sa lecture va s'accélérer et devenir plus fluide.

Réconcilier l'éducation avec les neurosciences

« Traiter de la façon d'élever et d'éduquer les enfants semble être la chose la plus importante et la plus difficile de toute la science humaine. »

MONTAIGNE, *Essais* (1580).

« La pédagogie est comme la médecine : un art, mais qui s'appuie – ou devrait s'appuyer – sur des connaissances scientifiques précises. »

Jean PIAGET,
La Pédagogie moderne (1949).

Nous arrivons au terme de ce voyage. J'espère vous avoir convaincu que, grâce aux avancées de la psychologie cognitive, des neurosciences, de l'intelligence artificielle et des sciences de l'éducation, nous disposons de connaissances détaillées sur la manière dont notre cerveau apprend. Ces connaissances ne vont pas de soi, et la plupart de nos idées sur l'apprentissage sont à revoir :

- Non, le bébé n'est pas une ardoise vierge de tout savoir – il dispose, dès la première année de vie, d'une vaste panoplie de connaissances sur les objets, les nombres, les probabilités, l'espace ou les personnes.

Enseignants, parents, scientifiques, ensemble pour faire progresser les sciences de l'éducation et leur mise en œuvre à l'école : la recette me paraît claire – mais l'urgence est réelle, car comme le souligne l'humoriste Francis Blanche :

« Face au monde qui bouge, il vaut mieux penser le changement que changer le pansement ! »