

Olivier Houdé

**L'intelligence
humaine
n'est pas
un algorithme**

Préface de **Jean-Pierre Changeux**



Odile
Jacob

Olivier Houdé

L'intelligence humaine n'est pas un algorithme

On parle aujourd'hui beaucoup d'intelligence, qu'il s'agisse des circuits biologiques du cerveau ou des circuits électroniques des ordinateurs. Mais qu'est-ce que l'intelligence ?

Partant de ses propres découvertes chez l'enfant, Olivier Houdé nous propose dans ce livre une nouvelle théorie de l'intelligence qui intègre le circuit court des intuitions et le circuit long des algorithmes, mais qui fait aussi et surtout la part belle au système inhibiteur, seul capable de bloquer les réponses, au cas par cas, selon le but et le contexte.

C'est cette inhibition, indispensable pour corriger nos biais cognitifs, qui est la clé de l'intelligence et qu'il faut éduquer ou coder.

Olivier Houdé

Le professeur Olivier Houdé est l'un de nos plus éminents psychologues, auteur d'une œuvre déjà majeure. Directeur honoraire à la Sorbonne du Laboratoire de psychologie du développement et de l'éducation de l'enfant (LaPsyDÉ) du CNRS, il est membre de l'Académie des sciences morales et politiques de l'Institut de France.



© Arno van der Geest

Préface de **Jean-Pierre Changeux**



22,90 €

1306082

9 782738 148908 ISBN : 978-2-7381-4690-3

www.odilejacob.fr

Table

Préface par Jean-Pierre Changeux.....	1
Introduction.....	7
CHAPITRE 1 – À la découverte de l'intelligence des enfants.....	21
Un bébé plus intelligent que ne l'imaginait Piaget.....	22
Un développement dynamique et non linéaire.....	23
Piaget révisité : heuristiques approximatives, algorithmes exacts et inhibition.....	26
Le cerveau de l'enfant exploré en imagerie cérébrale.....	30
Comprendre les erreurs fréquentes en maths et en français à l'école.....	31
Expliquer le cerveau et le contrôle cognitif aux enfants.....	33
Au cœur de la tolérance et du respect d'autrui.....	33
CHAPITRE 2 – L'intelligence (humaine) n'est pas un algorithme.....	37
D'Al-Khwarizmi à algorithme.....	39
Les racines de l'intelligence artificielle (IA).....	40
La révolution cognitive de l'intelligence.....	41
Qu'est-ce qu'un algorithme aujourd'hui ?.....	45
L'hyperpuissance de l'informatique face aux bugs et aux biais.....	46
Heuristiques approximatives, algorithmes exacts et inhibition.....	48
L'intelligence, au-delà du cortex visuel.....	51
Retour à la psychologie du cerveau de l'enfant.....	53

Big data, statistiques et travers humains.....	56
Mais que fait le cortex préfrontal des ordinateurs ?.....	61
CHAPITRE 3 – La mesure de l'intelligence.....	63
De Darwin à la mesure de l'intelligence.....	63
Alfred Binet et William Stern : échelle métrique d'intelligence et quotient intellectuel (QI).....	68
Une étude de Binet sur l'intelligence <i>via</i> l'attention et l'adaptation.....	72
Le test de QI en imagerie cérébrale.....	75
CHAPITRE 4 – Les algorithmes cognitifs chez l'enfant selon Piaget.....	79
Piaget, épistémologue.....	81
Précurseur des sciences cognitives : le cercle des sciences.....	83
D'où viennent les algorithmes logiques ?.....	85
Les stades de l'intelligence chez l'enfant : premiers algorithmes sensori-moteurs et concrets.....	89
Mise en place des algorithmes du raisonnement abstrait, hypothético-déductif.....	96
Critique 1 : la logique mentale existe-t-elle ?.....	100
Critique 2 : un développement dynamique et non linéaire.....	102
Une cathédrale d'algorithmes, si fragile.....	105
CHAPITRE 5 – Les heuristiques chez l'adulte selon Kahneman : système 1/système 2.....	109
Les biais cognitifs dans la déduction : exemple de l'heuristique d'appariement perceptif.....	110
Définition générale des biais de raisonnement.....	113
Lorsque notre sémantique trompe notre logique : biais de croyance et syllogismes.....	114
Deux systèmes : système 1 (heuristiques intuitives) et système 2 (algorithmes logiques).....	117
Les propriétés cognitives du système 1 selon Kahneman.....	119
Les biais cognitifs dans l'induction : stéréotypes et cadrage.....	122

TABLE	247
L'influence des émotions	126
L'hypothèse des marqueurs somatiques de Damasio	128
Un besoin de conscience réflexive et de métacognition.....	132
CHAPITRE 6 – Une nouvelle théorie de l'intelligence :	
 systèmes 1, 2 et 3.....	135
Comment corriger les biais cognitifs ?	137
L'inhibition, un processus clé du fonctionnement neuronal	140
Une pédagogie de la vicariance : inhiber le système 1 pour activer le système 2	148
Le darwinisme neuronal de Changeux : variation-sélection, entendement et raison	150
Imagerie cérébrale de l'inhibition d'un biais cognitif	154
Émotions et sentiments pour inhiber	158
Inhiber les croyances, stéréotypes et décisions absurdes.....	161
À propos des ancrages : amorçage positif ou négatif?.....	163
Mesurer l'effort cognitif d'inhibition.....	167
Allers-retours du labo à l'école.....	174
Pour une pédagogie du regret.....	177
CONCLUSION – Ce qu'il faudrait coder et éduquer.....	181
Glossaire.....	191
Notes	203
Bibliographie générale.....	223
Index.....	239
Remerciements.....	243

Préface

par Jean-Pierre Changeux

L'ouvrage d'Olivier Houdé est le fruit de réflexions qui allient l'expérience pratique de l'éducateur devenu éminent psychologue, spécialiste de sciences humaines – membre de l'Académie des sciences morales et politiques –, et celle de l'experimentaliste de laboratoire, maître de ses méthodes et techniques d'analyse en chronométrie mentale et imagerie cérébrale – membre de l'Académie des technologies. À l'heure où l'intelligence artificielle tente d'envahir le monde, le moment semble venu de faire la part des choses et de comprendre ce qui distingue le cerveau de l'enfant de « la ferraille » (les rouages électroniques) du superordinateur avec ses algorithmes programmés. Voilà qui devrait susciter l'intérêt des enseignants comme celui des informaticiens et bien entendu du grand public.

Les dispositions innées du petit *Homo sapiens* à sa naissance, nous apprend Olivier Houdé, sont déjà très exceptionnelles, comme le sont ses capacités d'apprentissage. Or ces capacités interviendront intensément dès les premiers

contacts avec son nouvel environnement physique moins chaleureux que le sein de sa mère, mais aussi et surtout avec le milieu social et culturel qui fera de lui non seulement un être humain, mais une personne. C'est clair, on n'éduque pas un enfant comme on écrit un programme d'ordinateur. Le moment est venu de s'en inquiéter. Olivier Houdé à travers son livre tente, sur la base de sa propre expérience et de celle d'une communauté scientifique en plein essor, de résoudre le paradoxe entre les « compétences précoces » (pour certaines innées) du nouveau-né et ces « incompétences tardives » (avec ses multiples ouvertures sur le monde) qui interviennent immédiatement après. Sur des bases scientifiques solidement établies, il nous propose enfin *une nouvelle théorie du développement cognitif de l'enfant* et, essentiel pour nous, en dérive des méthodes pédagogiques inattendues. Je dis « enfin » car depuis Jean Piaget (1896-1980) peu de théories aussi accomplies ont été proposées !

On ne dira jamais trop à quel point le développement du cerveau de l'enfant diffère de la construction d'un ordinateur qui s'assemble comme un jeu de Lego à partir de cartes mères, de circuits imprimés et de processeurs préconstruits où la moindre erreur a des conséquences catastrophiques. Le développement du cerveau humain se fait progressivement, de manière dynamique et non linéaire, avec la mise en place de millions de milliards de contacts synaptiques (au rythme moyen du million par seconde) à travers lesquels il tolère les erreurs et les corrige sous la forme d'une évolution darwinienne interne. Celle-ci opère par variation et sélection neuronales. Le cerveau humain diffère également de celui des espèces qui ont précédé *Homo sapiens* au cours de son histoire

évolutive. Il n'atteint sa forme et ses performances adultes que vers 16 à 18 ans, alors que chimpanzés et autres singes ont un développement postnatal beaucoup plus bref. Chez *Homo sapiens*, du bébé à l'adolescent, au fil des années, les périodes sensibles d'apprentissage s'enchaînent et se poursuivent toute la vie. Elles permettent, ici, l'accès à la vision binoculaire, là, à la reconnaissance de soi, puis celle de soi-même comme un autre, ou encore l'apprentissage du langage parlé puis celui de l'écriture, de la lecture, de la logique et du raisonnement... Lorsque *Homo sapiens* est apparu au Maroc, il y a environ 300 000 ans, sa durée de vie ne dépassait pas 30 ans en moyenne ; il a donc été sélectionné au cours de l'évolution biologique pour passer environ la moitié de sa vie à construire son cerveau ! Au cours de cette évolution « épigénétique » postnatale, l'enfant *internalise* son environnement et tout particulièrement, comme le soulignait dès 1920 l'éminent psychologue soviétique Lev Vygotski, son environnement social et culturel. Le bébé internalise les caractéristiques de la communauté culturelle à laquelle il appartient – et cela en dehors de tout consentement éclairé. Un élément biologique supplémentaire intervient dans cette médiation de l'interaction sociale, le *comportement pédagogique*, qui relève de la prise en charge de l'enfant très vulnérable du fait de l'immaturation de son cerveau, mais qui se spécialise socialement avec l'école. La relation maître-élève devient fondamentale. Et notre auteur, qui fut instituteur, sait de quoi il parle. Il a même réussi à démontrer, lors d'une tâche de raisonnement logique, l'effet de cette relation maître-élève sur les reconfigurations du cerveau.

Un autre aspect des fonctions supérieures du cerveau humain dont les informaticiens parlent moins est leur relative lenteur. L'influx nerveux se propage à une vitesse située entre 1 et 100 mètres par seconde, comme un TGV certes, mais inférieure à la vitesse du son (environ 340 mètres par seconde), alors que nos ordinateurs fonctionnent à la vitesse de la lumière (299 792 458 mètres par seconde), c'est-à-dire de l'ordre du million de fois plus vite que l'influx nerveux. Les temps psychologiques sont de l'ordre du dixième de seconde... Nos ordinateurs fonctionnent environ un million de fois plus vite que notre cerveau... ce qui ne veut pas dire qu'ils sont un million de fois plus « intelligents » !

Le cerveau humain a compensé cette limitation de vitesse avec l'invention de nouvelles stratégies cognitives, tant neurostructurales que fonctionnelles, qui lui permettent, encore pour un certain temps, d'être en avance sur l'ordinateur. Olivier Houdé nous propose l'inhibition. De quoi s'agit-il ? Il existe dans notre cerveau deux grandes catégories de neurones : ceux qui génèrent des signaux nerveux – ou neurones excitateurs – et d'autres qui bloquent l'excitation – ou neurones inhibiteurs. Leurs neurotransmetteurs sont différents : acétylcholine et glutamate pour les premiers ; GABA pour les seconds. Des ensembles de neurones inhibiteurs peuvent au niveau du cerveau bloquer (ou inhiber) de manière globale un comportement ou une stratégie cognitive lorsqu'ils sont inadaptés ou erronés. Dans sa nouvelle théorie neuroconstructiviste, Olivier Houdé place l'inhibition cognitive au cœur du développement intellectuel de l'enfant. Il en situe l'origine au niveau du cortex préfrontal, un territoire cérébral qui se développe de manière différentielle chez

les hominidés, du chimpanzé à *Homo sapiens*, et qui mature lentement chez l'enfant et l'adolescent. Cette théorie du développement cognitif renouvelle le débat Piaget/Chomsky ou constructivisme/innéisme qui a marqué au cours des dernières décennies bien des positions en psychologie. Il y a certes des capacités cognitives innées ou très précoces chez les bébés, mais la capacité d'inhiber les biais cognitifs se construit après, durant l'enfance et même encore chez l'adulte. En outre, la théorie d'Olivier Houdé vise à résoudre un autre grand paradoxe de la psychologie contemporaine du raisonnement et de la prise de décision : le paradoxe « Kahneman-Piaget » entre irrationalité et rationalité.

Piaget a décrit les stades de l'intelligence chez l'enfant comme une succession d'algorithmes de plus en plus logiques. Mais Daniel Kahneman, prix Nobel d'économie en 2002, a remis en cause cette vision trop rationnelle et logique de l'intelligence, en démontrant que nos jugements et nos décisions sont le plus souvent dominés par des heuristiques intuitives, très rapides, fondées sur des biais cognitifs erronés. D'où nos illogismes ! Pour lever ce paradoxe, Olivier Houdé propose, à partir de ses propres découvertes chez l'enfant et l'adulte, une nouvelle théorie de l'intelligence en trois systèmes : 1. le circuit court des heuristiques approximatives ; 2. le circuit long des algorithmes logiques exacts ; et 3. le système inhibiteur qui bloque les heuristiques, au cas par cas, selon le but et le contexte. Il est guidé par des émotions tel le regret. Pour Olivier Houdé, c'est cette inhibition qui est la clé de l'intelligence dans le cerveau et qu'il faut éduquer ou coder. *Apprendre, c'est inhiber* au niveau cognitif, dit-il,

comme j'ai jadis soutenu qu'*apprendre, c'est éliminer* au niveau neuronal !

Merci à Olivier Houdé de nous offrir des éléments de réflexion si passionnants. Il nous ouvre ici de toutes nouvelles perspectives. De quoi réviser de fond en comble la psychologie du développement, mais aussi de quoi poser un sérieux défi aux informaticiens et à l'intelligence artificielle.

Le débat est ouvert ! Au lecteur maintenant de se faire une idée.

26 février 2019.

Introduction

En 1981, à 18 ans, le bac en poche, je rêve de devenir instituteur, le plus beau métier qui soit : apprendre aux enfants le monde et éveiller leur *intelligence* ! Encore en Belgique à cette époque, mon pays natal, je fais mes études à la Haute École Galilée de Bruxelles. J'y apprends à enseigner le français, les mathématiques, mais aussi la géographie et l'histoire, ainsi que le dessin aux jeunes élèves. Peintre amateur et passionné durant mon adolescence, l'idée d'éveiller tout à la fois la beauté et l'intelligence dans le cerveau des enfants me comble.

À l'aube de mes 20 ans, lors de la rédaction de mon mémoire de fin d'études – celles d'instituteur duraient alors deux ans – je fais la lecture d'un livre de Jean Piaget, *La Formation du symbole chez l'enfant*, paru en 1945. C'est un choc, une révélation ! J'y découvre l'existence d'une science de l'intelligence des enfants. Piaget, juste décédé, savant suisse de l'Université de Genève, en était alors le grand spécialiste. Durant sa carrière, il avait découvert les stades du développement intellectuel, du bébé au jeune adulte. De surcroît, il voyait dans l'intelligence en formation chez l'enfant la forme optimale de l'adaptation *biologique*. Je me souviens très bien aujourd'hui du sentiment qui m'envahit alors : un pan entier

d'une réalité jusque-là dissimulée, tant lors de ma scolarité que dans ma famille, se révélait à moi ; il existe une *science expérimentale* (comme la physique, la chimie, la biologie) de l'intelligence en construction chez les enfants. C'est extraordinaire ! Alors que je suis à peine sorti de l'enfance, cette découverte me bouleverse. Jean Piaget, savant de haute stature, devient mon modèle.

La voie est tracée, le métier de chercheur comme Piaget sera le mien. J'hésite toutefois encore quelques mois – fibre artistique oblige – avec celui très tentant d'illustrateur de livres pour enfants, dont je commence d'ailleurs les études à l'Institut Saint-Luc de Bruxelles, mais à la faveur d'un long voyage de réflexion en Orient, au Rajasthan en Inde et au Népal, je reviens vers l'Europe, Bruxelles *via* Paris, avec l'idée définitivement arrêtée de faire comme Piaget et de m'inscrire dans un cursus universitaire de psychopédagogie. Ce sera à Mons dans le sud de la Belgique car une université y offrait une formation accélérée en psychologie de l'enfant pour les étudiants déjà instituteurs. C'est ensuite à Paris, à la Sorbonne, que je poursuis ma licence de psychologie, suivie du cursus jusqu'au doctorat soutenu en 1991 sur le développement de la catégorisation chez l'enfant. C'est la forme *qualitative* de l'intelligence en construction. À ce sujet, Piaget décrivait un stade intuitif de catégorisation chez les enfants avant l'âge de 6-7 ans, suivi d'un stade logique d'inclusion des classes.

Mais je découvre, en observant des centaines d'enfants pour ma thèse de doctorat, que les stades de Piaget sont en fait inexacts. D'une part, il existe des capacités logiques de catégorisation, même taxinomiques (donc avec des relations d'inclusion des classes), avant 7 ans, dès l'école maternelle.

D'autre part, les enfants plus grands, bien au-delà du début du stade logique de Piaget font encore, dans certaines situations, des erreurs intuitives de catégorisation qu'ils ne devraient plus faire. Voici un exemple : comme Piaget, je place sur une table, devant l'enfant, 10 marguerites et 2 roses, en lui demandant « Y a-t-il plus de marguerites ou plus de fleurs ? » L'enfant de moins de 6 ans répond : « Plus de marguerites ! » C'est une erreur d'intuition perceptive, spatiale, selon Piaget – un stade préopératoire, illogique. À partir de 6-7 ans, l'enfant répond inversement et logiquement cette fois : « Plus de fleurs ! » C'est, selon Piaget, la preuve de l'émergence d'une structure logique d'inclusion des classes dans l'esprit de l'enfant. Elle permet des réponses d'inclusion. Mais, fait surprenant non prévu par Piaget, lorsque je demande à l'enfant, juste après : « Peut-on faire quelque chose, ou ne peut-on rien faire, pour avoir plus de marguerites que de fleurs ? », il répond (et cela jusqu'à l'âge de 11-12 ans) : « Oui, c'est facile, t'as qu'à ajouter des marguerites ou enlever des fleurs ! » Cette réponse est évidemment tout à fait contraire à la *structure* mentale d'inclusion des classes supposée par Piaget. Or cette structure vient de se mettre en place dans le cerveau de l'enfant selon le savant genevois.

Sous mes yeux et dans mon esprit de jeune chercheur, les stades de Piaget volent alors en éclats ! La théorie du développement de l'intelligence chez l'enfant que je croyais vraie s'effondre.

Mais comment expliquer cette versatilité cognitive des enfants (réussite, puis échec), leurs décalages de performances ? Avec d'autres observations de ce type, cela remet aussi en cause, de façon plus générale, le structuralisme. Comme

Claude Lévi-Strauss et bien d'autres chercheurs en sciences humaines des années 1960-1970, Piaget était structuraliste : il croyait qu'à chaque âge émergeait une structure intellectuelle nouvelle, garante de comportements synchrones, obligés et hiérarchisés chez l'enfant. Ces structures successives étaient des algorithmes logico-mathématiques, d'abord absents, puis concrets (dès 7 ans) et enfin abstraits (à l'adolescence). Mais les observations de mon doctorat chez les enfants montrent que ces algorithmes (de logique des classes) semblent exister plus tôt que prévu par Piaget et à la fois disparaître ensuite plus tard, au cours du développement, dans certaines réponses illogiques des enfants.

Les chercheurs postpiagétiens, mes professeurs de l'époque, restent dans l'idée d'un développement incrémental de l'intelligence en stades cognitifs, mais considèrent alors que l'algorithme logique d'inclusion des classes doit venir à l'esprit des enfants encore plus tard que ne le prédisait Piaget, après une longue phase de bricolage empirique, au seuil de l'adolescence, le moment où, à partir de 12 ans, l'enfant répond : « C'est impossible [d'avoir plus de marguerites que de fleurs], il y aura toujours plus de fleurs. » Dans cette nouvelle interprétation, l'âge des stades changeait, se décalait, alors que la conception piagétienne en stades restait fondamentalement la même.

Mais moi je n'y crois plus ! Dès le début des années 1990, je constate et comprends l'inadéquation du modèle des stades de l'intelligence focalisé seulement sur la présence ou l'absence d'un algorithme logique (dans cet exemple la structure d'inclusion des classes). Le développement doit être plus *dynamique et non linéaire*. Dans mes observations, l'enfant, quel que soit son âge, change trop rapidement et facilement

d'avis – ce que j'appelle la versatilité cognitive –, passant d'une réponse logique d'inclusion des classes à une réponse illogique (ou l'inverse) d'un item à l'autre d'une même tâche au gré d'un changement parfois minime de la question ou du mode de présentation du matériel expérimental. Un stade de développement ou une structure logique solide de l'esprit devrait, tel un roc, être plus insensible, plus résistante. Or la versatilité est la règle ! Les décalages de performances « horizontaux » (au sein d'un même stade piagétien) ou « verticaux » (d'un stade à l'autre) ne sont pas l'exception comme le pensait Piaget, mais, en effet, la règle.

Je pressens alors que ce qu'on évalue chez l'enfant, au cours du développement, est un tout autre processus, fonctionnel, de type attentionnel (exécutif dit-on aujourd'hui), assez invisible et que Piaget n'imaginait même pas : *l'inhibition*. C'est d'abord l'inhibition de la comparaison perceptive directe des extensions spatiales (10 marguerites *versus* 2 roses) jusqu'à 7 ans, dans l'exemple classique d'inclusion de Piaget ; ensuite, jusqu'à 12 ans, l'inhibition du schème arithmétique surappris à l'école comme à la maison, « pour avoir plus de, j'ajoute, pour avoir moins de, j'enlève ». Cette révélation du rôle caché de la capacité d'inhibition est aussi foudroyante pour moi que la découverte de la théorie de Piaget à l'âge de 20 ans. À l'aube de mes 30 ans, je découvre qu'elle est fautive, que la clé de l'intelligence en construction n'est pas la logique – ses structures et ses algorithmes – mais l'inhibition ! C'est une intuition scientifique profonde qui m'habite alors, déjà étayée par quelques observations expérimentales, mais encore très peu.

La piste est bonne, j'en suis certain ! Personne encore ne parle d'inhibition en un sens positif, facteur d'intelligence, en psychologie du développement cognitif. Ma directrice de thèse s'inquiète de mes conclusions ; l'inhibition est négative à ses yeux, contraire à la dimension positive du constructivisme de Piaget (« Êtes-vous encore piagétien ? » me demande-t-elle un jour). Je continue de plus belle, à la suite de ma thèse, en élargissant l'exploration de façon systématique à tous les grands pans de l'intelligence selon Piaget : la permanence de l'objet chez le bébé où il doit, selon moi, apprendre à *inhiber* un geste préprogrammé vers l'objet disparu lorsqu'il est déplacé d'un cache à un autre (l'erreur dite « A-non-B »), la conservation du nombre chez l'enfant (aspect quantitatif de l'intelligence) où il doit *inhiber* une illusion de longueur, la catégorisation déjà explorée (aspect qualitatif de l'intelligence) et, enfin, le raisonnement logique chez l'adolescent et l'adulte où ils doivent *inhiber* des biais cognitifs – biais que découvrent à la même époque les psychologues Jonathan Evans et Daniel Kahneman (futur prix Nobel). Ces derniers récusent l'existence de l'ultime stade logique de Piaget. En effet, les adultes – vous, chers lecteurs – sont très souvent illogiques, inconsciemment (biaisés par des émotions, des opinions, des préjugés), dans leurs jugements et décisions. Mon idée est que, si notre intelligence dépend de stratégies intuitives que nous devons toujours inhiber, au cas par cas, et non de structures ou algorithmes logiques infaillibles, alors l'adulte peut encore se trouver souvent en défaut d'inhibition.

Ma seconde thèse en Sorbonne (on dit « habilitation à diriger des recherches ») expose l'ensemble de ces travaux qui donnent alors une forte cohérence à l'hypothèse de

l'intelligence explorée *via* la capacité d'inhibition. Je publie *Rationalité, développement et inhibition. Un nouveau cadre d'analyse*.

Dès ce moment, je ne crois plus, mais plus du tout, que l'intelligence soit seulement un algorithme et que son développement soit une suite incrémentale de stades de plus en plus logiques et abstraits qui, comme le croyait Piaget, effaceraient les stades intuitifs précédents. Je ressens plutôt qu'il y a trois systèmes cognitifs interdépendants qui coexistent, à tout âge, dans le cerveau humain : 1) les intuitions ou illusions perceptives et cognitives qui ne correspondent pas à des stades primitifs, bornés par des âges, mais à des stratégies toujours disponibles en mémoire, 2) les stratégies logiques (parfois bien plus précoces que les structures décrites par Piaget) et 3) l'inhibition, plus ou moins efficace. C'est ce contrôle inhibiteur, dont je découvrirai plus tard qu'il est lié à la maturation du cortex préfrontal chez l'enfant et l'adolescent, qui permet de stopper les intuitions lorsqu'elles sont trompeuses et qu'elles entravent la logique.

Jeune professeur de psychologie expérimentale, je découvre alors, dans la littérature scientifique, un paradigme nouveau que j'expose d'emblée à mes étudiants : l'amorçage négatif. Ce paradigme inventé par Steven Tipper me passionne tout particulièrement, car il permet de tester l'inhibition de façon informatisée et très précise en mesurant les temps de réaction des individus en millisecondes, ce que Piaget n'avait jamais fait chez les enfants. L'idée de Tipper est de demander à l'individu qui passe l'expérience de répondre en ignorant, c'est-à-dire en inhibant, un stimulus visuel (par exemple le tracé d'un chien sur une image) qui est le distracteur par

rapport à un stimulus cible qu'il faut identifier (le tracé superposé d'une trompette). Ensuite, dans un second temps, l'individu doit répondre en activant le stimulus qu'il vient d'inhiber (le tracé du chien devenant la cible à identifier). Si l'inhibition préalable a bien fonctionné, la seconde phase doit prendre plus de temps que dans une situation contrôle (paires d'items non reliés) : c'est l'amorçage négatif, au sens d'un ralentissement. Mais, en soi, cet indicateur est très positif pour l'adaptation à la tâche (inhibition, puis levée d'inhibition), donc pour l'intelligence !

Ce principe technique fort simple, élégant, de chronométrie mentale permet donc de mettre en évidence l'existence du processus d'inhibition et d'en mesurer l'efficacité. Comme il s'agit dans mes études du facteur clé de l'intelligence en développement chez l'enfant, j'entreprends alors d'adapter et d'appliquer cette méthodologie, non pas seulement aux *traitements perceptifs* des stimulus comme le faisait Tipper (des tracés d'objets), mais à la *sélection des stratégies cognitives* à inhiber ou à activer en mémoire lors de tâches logico-mathématiques de nombre, de catégorisation et de raisonnement – pour certaines d'entre elles, reprises de Piaget. Je tenais ainsi le test le plus fin possible d'évaluation de ce processus caché de l'intelligence : l'inhibition. Avec mon collègue et ami le professeur Grégoire Borst nous ne cessons encore aujourd'hui de renforcer et de généraliser cette méthodologie expérimentale de l'amorçage négatif utilisée tant au laboratoire de la Sorbonne que dans nos écoles partenaires.

Aux seuls algorithmes logiques définissant l'intelligence selon Piaget, nous ajoutons ainsi l'inhibition des stratégies intuitives ou heuristiques en mémoire lorsqu'elles sont

erronées. *Heuristiques* est le concept qui a valu le prix Nobel d'économie en 2002 à Kahneman pour l'application qu'il en a faite à la prise de décision chez les adultes, notamment les agents économiques. Contrairement à Piaget, Kahneman démontre que les adultes en général (agents économiques ou autres) sont encore dominés par des intuitions perceptives et cognitives qui court-circuitent la logique. Ces intuitions ne sont donc pas un stade infantin (prélogique) qui disparaîtrait autour de 6-7 ans, mais des stratégies rapides, souvent efficaces – pas toujours ! – et qui subsistent dans le cerveau adulte. Toutefois, ce que n'a pas vu Kahneman, trop focalisé sur l'opposition entre le système 1 (les heuristiques) et le système 2 (les règles ou algorithmes logiques) chez les adultes, est que la clé de l'intelligence, qui doit se développer chez l'enfant, se situe dans un système 3 d'arbitrage entre S1 et S2. C'est l'inhibition de S1 pour activer S2, au cas par cas, guidée par le doute et le regret. Pour un psychologue du développement de l'enfant – ce que n'est pas Kahneman –, c'est une évidence eu égard aux incohérences observées dans les réponses aux tâches de Piaget et au constat systématique de l'inhibition nécessaire à les surmonter. Pour un neuroscientifique, c'est aussi une évidence, eu égard au rôle supposé du cortex préfrontal dans cette fonction d'arbitrage, en particulier de contrôle inhibiteur.

Cette dimension neuroscientifique a ici beaucoup d'importance. Une révolution technologique, annoncée par Jean-Pierre Changeux dès 1983 dans *L'Homme neuronal*, est, en effet, survenue dans les années 1990 pour la psychologie : l'imagerie cérébrale fonctionnelle. J'en ai rendu compte dans *Cerveau et psychologie. Introduction à l'imagerie cérébrale*

anatomique et fonctionnelle, codirigé avec Bernard et Nathalie Mazoyer. Ces deux collègues étaient les grands spécialistes en la matière. Bernard Mazoyer a introduit en France la tomographie par émission de positons (TEP), offrant les toutes premières images *in vivo* du cerveau humain en action lors d'une tâche cognitive de perception visuelle ou de langage, par exemple. Pour ma part, convaincu épistémologiquement, à la suite de Piaget, que l'intelligence chez l'enfant est la forme optimale de l'adaptation biologique – donc *via* le cerveau –, je m'oblige à réaliser un nouveau master de biologie humaine à l'université Claude-Bernard de Lyon pour apprendre à maîtriser directement ces techniques d'imagerie cérébrale.

La TEP étant une technique dite « invasive » – avec injection d'un produit radioactif (à très faible dose) –, elle ne s'applique en aucun cas aux enfants, mais s'utilise avec des volontaires adultes. C'est pourquoi je crée alors de façon expérimentale, en laboratoire, un « microdéveloppement » : un paradigme où l'adulte passe deux fois dans la machine d'imagerie cérébrale, avant (prétest) et après (post-test) un apprentissage de l'inhibition, comparé à une condition contrôle (un apprentissage simplement logique, sans inhibition). Pour cela, il fallait trouver une tâche où l'adulte présente encore un déficit d'inhibition et ce fut facilement fait en reprenant l'une des tâches de raisonnement où Evans, par exemple, observe des réponses illogiques, intuitives, que Kahneman appelle des heuristiques.

Lorsque mes collègues et moi-même lançons l'ultime analyse statistique, *via* le logiciel dédié (SPM, *Statistical Parametric Mapping*), quelle n'est pas notre surprise, notre émerveillement, de découvrir sur l'écran de l'ordinateur une véritable

« bascule cérébrale », de l'arrière vers l'avant (partie préfrontale) du cerveau, en comparant – par une procédure soustractive de l'activité neuronale – le prétest au post-test de l'apprentissage de l'inhibition. Rien de comparable n'est observé après l'apprentissage logique dans la condition contrôle. Nous avons donc sous les yeux les images du cerveau prouvant l'effet incroyablement adaptatif et spécifique de l'exercice pédagogique du contrôle inhibiteur. S'agissant d'une tâche de raisonnement logique, c'est l'intelligence humaine, *via* l'inhibition, qui se déployait dans ces images ! Notez au passage que nous faisons ainsi la première découverte mondiale, publiée en 2000, des traces cérébrales des heuristiques (le prétest) et d'un changement de stratégie de raisonnement (le post-test) dans le cerveau humain. C'est ce qu'on appelle la vicariance ou la flexibilité.

Vous imaginez l'impatience qui est alors la nôtre de pouvoir réaliser la même démonstration expérimentale, non pour un microdéveloppement (apprentissage) chez l'adulte, mais pour le vrai développement chez l'enfant ! Par chance, cela commence à devenir technologiquement possible au début des années 2000 où s'installe en France, à l'hôpital et dans les centres de recherche, l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). Cette technique est non invasive et utilisable, pour le coup, sans problème aucun avec des enfants – sous réserve, toutefois, d'une minutieuse préparation. Ma collègue et amie, psychologue du développement, Arlette Pineau et moi-même n'avons dès lors eu de cesse que de préparer tout le laboratoire à utiliser l'IRM fonctionnelle avec des enfants volontaires des écoles, de la maternelle à la fin du primaire. Il a fallu soulever des montagnes, contourner

bien des résistances, car c'était une première en France ! Cela suppose évidemment l'accord préalable d'un comité d'éthique, que nous avons obtenu, et l'accord ensuite des parents volontaires, ainsi qu'un partenariat pédagogique et scientifique étroit avec les écoles et l'Éducation nationale (directeur académique et recteur). Quant au choix du paradigme cognitif, une évidence s'imposait à nous : c'est l'une des tâches les plus emblématiques de Piaget, la conservation du nombre, qu'il faut absolument faire réaliser aux enfants dans l'IRM. Il sera alors possible de voir si la région préfrontale dédiée à l'inhibition (déjà connue dans le cerveau adulte) est spécialement engagée lorsque les enfants parviennent à réussir la tâche. Face à deux alignements de jetons en nombre identique, mais de longueur différente (après l'écartement d'un des deux alignements), l'enfant doit dire s'il y a la même quantité de jetons. Selon mon hypothèse, pour réussir, l'enfant doit inhiber l'heuristique visuo-spatiale « longueur égale nombre ». Je l'avais déjà démontré, au niveau comportemental, grâce à l'amorçage négatif... À la fin des années 2010, dans notre projet d'IRM fonctionnelle enfin réalisé avec des enfants de 5 à 10 ans, nous démontrons, en effet, que l'inhibition préfrontale caractérise le passage de l'échec à la réussite de la tâche de conservation du nombre de Piaget, avant et après 7 ans.

L'algorithme visuel de l'invariance du nombre par rapport à la longueur, de même que l'algorithme moteur et verbal du comptage des jetons, existent bien plus tôt chez le bébé et le jeune enfant. Mais, subrepticement, l'heuristique « longueur égale nombre » se construit aussi, parallèlement dans l'environnement, à l'école et ailleurs, par une covariation surapprise entre ces deux dimensions. La clé du développement

intellectuel – ici cérébralement démontrée en IRMf – est dès lors la capacité préfrontale d'inhibition de cette heuristique perceptive pour activer l'algorithme logique (invariance du nombre, comptage) lorsque c'est nécessaire. Et c'est le cas dans la tâche de Piaget.

Ainsi, ce sont bien trois systèmes cognitifs interdépendants qui agissent dans le cerveau de l'enfant en développement : 1) les heuristiques, 2) les algorithmes (la logique de Piaget) et 3) l'inhibition des premières pour activer les seconds, au cas par cas. Il en ressort pour l'école – l'instituteur reprend ici le dessus – qu'il faut non seulement : a) identifier, cartographier les heuristiques perceptives, cognitives et scolaires surappries et souvent inconscientes (tant pour le maître que pour l'élève), mais aussi b) apprendre à les inhiber. Provoquer, en quelque sorte, une bascule cérébrale, comme celle découverte chez l'adulte, pour pouvoir activer et appliquer avec robustesse les algorithmes logiques. Ces derniers sont soit déjà acquis, soit au cœur du programme scolaire et en cours d'acquisition : règles et notions de mathématiques, de français, etc. Mais, pour dire simple, l'école apprend surtout à activer, même à suractiver, accumuler et empiler des connaissances, *et pas à inhiber*. Or c'est tout aussi important, voire plus, pour construire un citoyen à l'intelligence et au cerveau robustes (face aux *fake news* par exemple) ! Pour construire *un cerveau fin stratège*.

Après cette brève autobiographie scientifique, vous comprendrez pourquoi lorsque j'entends, comme vous, parler aujourd'hui partout et tout le temps d'algorithmes et d'intelligence artificielle (IA), ma réaction immédiate est de dire : attention, *l'intelligence n'est pas (seulement) un algorithme* !

Elle est aussi et surtout l'inhibition des heuristiques. C'est le cœur du sujet. J'en suis maintenant convaincu pour l'intelligence humaine, après avoir expérimenté et testé nos hypothèses, avec toutes les techniques précitées, sur plus d'une dizaine de milliers d'enfants, d'adolescents et de jeunes adultes. Quant à l'IA, il est très probable que l'inhibition dont je parle lui soit aussi nécessaire car les systèmes informatiques dits « intelligents » appliqués à de plus ou moins grandes bases de données, à l'aide d'algorithmes d'apprentissage plus ou moins profonds, sont également victimes, comme les humains, de puissantes heuristiques trompeuses : les biais perceptifs, cognitifs, sociaux et émotionnels des données ! Voilà pourquoi j'affirme dans ce livre que l'intelligence n'est pas (seulement) un algorithme. C'est en tenant compte des trois composantes, heuristiques, algorithmes et inhibition, que l'on peut s'approcher de ce qu'est réellement l'intelligence.

Si l'on veut progresser en cette matière, il faut capitaliser tous les savoirs, pas seulement ceux des informaticiens, mais aussi des psychologues, spécialistes de l'humain. C'est avec ce point de vue unique d'avoir observé – dans le sillage de Piaget mais autrement – l'intelligence en développement chez les enfants, ainsi que l'adaptation cérébrale qui la sous-tend, que j'ai écrit ce livre tant pour les informaticiens que les psychologues et les professeurs des écoles. Mais aussi pour chacune ou chacun d'entre vous qui n'avez jamais autant entendu parler d'intelligence qu'aujourd'hui. Tout est *smart* ! Mais c'est quoi, *smart* ?

À la découverte de l'intelligence des enfants

La conception de l'intelligence de l'enfant selon Jean Piaget était incrémentale, c'est-à-dire « stade après stade », de plus en plus élaboré¹. C'est le « modèle de l'escalier », intuitivement cohérent avec la succession des âges dans l'enfance (de 0 à 18 ans) ou des classes à l'école (de la petite section de maternelle au bac). Dans ce modèle, chaque marche correspondait à un grand progrès, à un stade bien défini ou mode (structure) unique de pensée dans la genèse de l'intelligence logico-mathématique : de l'intelligence sensori-motrice du bébé (0-2 ans), fondée sur ses sens et ses actions, à l'intelligence conceptuelle et logique (nombre, catégorisation, raisonnement), d'abord concrète chez l'enfant (vers 7 ans), puis abstraite et formelle chez l'adolescent (vers 12-14 ans) et l'adulte.

L'intelligence (humaine) n'est pas un algorithme

À l'approche de 2020, smartphone en poche et montre connectée au bras, qui n'a jamais entendu parler d'algorithmes et d'intelligence artificielle (IA), concepts omniprésents ? Et cela, bien au-delà de la communauté scientifique ? On entend d'ailleurs dire que les algorithmes nous gouvernent déjà, qu'une nouvelle intelligence est née et qu'il serait grand temps de reprendre le contrôle.

Ces algorithmes peuvent, en effet, réaliser (exécuter *via* un ordinateur) le meilleur et le pire, sans émotion, sans sentiment, sans conscience, sans morale, sans éthique. Il y a l'algorithme des robots¹ aspirateurs, dits « intelligents », inoffensifs et très utiles dans nos maisons – même si l'un d'entre eux, tournant autour de moi, me dérange au moment où j'écris ces lignes – et, plus inquiétant, il y a potentiellement les algorithmes des robots ou drones tueurs, avec l'utilisation de l'IA autonome militaire, contre laquelle ont pris position Bill Gates, Yann Le Cun – l'un des inventeurs des réseaux de neurones artificiels profonds, directeur de l'IA chez Facebook – et Mustafa

La mesure de l'intelligence

Dans beaucoup de livres ou d'articles sur l'intelligence naturelle *versus* artificielle, on se trouve à regretter que l'intelligence ne soit jamais définie. Je puis vous assurer que ce ne sera pas le cas ici. Abordons dès lors, dans ce chapitre, la mesure exacte de l'intelligence en psychologie différentielle et retraçons l'histoire de son étude, issue de la philosophie et de la biologie¹.

De Darwin à la mesure de l'intelligence

Bien avant Darwin, chez Aristote déjà, les puissances de fonction cognitive viennent d'un souffle général de vie, «*âme*», partagé par tous les êtres animés : les végétaux, dotés de facultés d'alimentation et de croissance ; les animaux, de facultés de mouvement et de perception ajoutées aux précédentes ; les humains, qui bénéficient en plus de facultés cognitives de pensée et de raisonnement (d'entendement et

Les algorithmes cognitifs chez l'enfant selon Piaget

Dans cette grande histoire de l'intelligence humaine, l'une des œuvres majeures du xx^e siècle est celle du psychologue suisse Jean Piaget. Lors d'un séjour de formation initiale



Figure 6. Le psychologue suisse Jean Piaget (1896-1980), auteur d'une théorie des stades de l'intelligence.

Les heuristiques chez l'adulte selon Kahneman : système 1/système 2

Pour les informaticiens, tout est algorithme, y compris les heuristiques (ils parlent dans ce cas d'*algorithmes heuristiques* qu'ils distinguent des *algorithmes exacts*)¹. Mais pour le psychologue et le neuroscientifique, on ne peut assimiler des heuristiques à des algorithmes dans le cerveau humain. Les propriétés cognitives qui les définissent sont fondamentalement différentes, même antinomiques, comme nous allons le voir ici à travers de nombreux exemples².

Commençons par un exemple concret de déduction logique « si-alors ». Si vous ne l'avez déjà fait pour l'exemple précédent de l'escargot de Piaget (qui n'était pas si simple que cela), n'hésitez pas à vous munir d'un crayon, même de crayons de couleur si vous en avez à proximité, et d'un bloc de papier. Vos systèmes 1 et 2 vont être mobilisés ! Peut-être aussi vos émotions.

Une nouvelle théorie de l'intelligence : systèmes 1, 2 et 3

Le besoin de conscience réflexive et de métacognition renvoie à une insatisfaction à l'égard des algorithmes logiques : en dépit de leur très sérieuse réputation de rationalité (d'Aristote et Descartes à Piaget), ils sont trop vulnérables, court-circuités, au moindre déclencheur contextuel, par des heuristiques perceptives ou sémantiques qui dominent la pensée et les décisions. *Ce ne peut donc être cela l'intelligence.*

Selon Piaget, le seul système des algorithmes logiques (système 2) caractérise l'intelligence humaine, forme optimale de l'adaptation biologique au cours du développement de l'enfant et de l'adolescent. *Mais l'adaptation n'est pas au rendez-vous !* Les algorithmes logiques sont incapables de résister par eux-mêmes aux heuristiques dominantes (système 1), erronées et suractivées en mémoire de travail – et cela toute la vie, y compris chez les adultes supposés être logiques automatiquement (stade IV de Piaget). L'aptitude de résistance et d'inhibition (système 3), plus subtile et psychologique que les algorithmes de la seule et « froide » logique, relève – comme

Ce qu'il faudrait coder et éduquer

Nous voilà arrivés au terme de ce livre. Il est temps de revenir aux questions initiales. Qu'est-ce que l'intelligence ? C'est la capacité d'inhibition. Inhiber quoi ? Les circuits courts, trop rapides, trop faciles : les heuristiques lorsqu'elles sont erronées. Pour activer quoi ensuite ? Les algorithmes logiques, plus lents et réfléchis, efficaces dans leur exactitude. Ce sont les circuits longs. Mais la vitesse de la pensée ne leur est pas favorable, ni notre paresse cognitive.

En eux-mêmes, comme le dit très bien Kahneman, les algorithmes (système 2) n'ont aucun contrôle sur les heuristiques trop impétueuses (système 1) qui les court-circuitent. Or il faut savoir ralentir la pensée, l'interrompre, même brièvement, pour se dégager des heuristiques : les inhiber, éviter les courts-circuits dangereux, prendre un autre chemin cérébral ou électronique, être vicariant. C'est la capacité d'arbitrage et de prise de recul du système 3, métacognitif, sous le contrôle du cortex préfrontal dans le cerveau humain et de l'extraordinaire potentiel neuronal, physico-chimique, qu'il peut mobiliser, diriger, *via* les mécanismes inhibiteurs