

## Le cerveau et la décision

Olivier Houdé

Séance du 8 février 2021  
de l'Académie des sciences morales et politiques sous la Présidence  
du Professeur André Vacheron

Voir le diaporama qui accompagne cet exposé

Dans l'arbre du vivant, celui de nos racines biologiques *des premières bactéries à l'Homme*, un organe extraordinaire a peu à peu émergé : le cerveau humain. Guidé par nos émotions, nos sentiments et nos idées, il est une véritable « machine à décisions », des plus simples aux plus sophistiquées. Les récentes caméras d'imagerie cérébrale ont permis de révéler que c'est en particulier le cortex préfrontal, à l'avant du cerveau, qui fait office de « lobe de la décision ». Grâce à ce lobe, le cerveau – qui orchestre *tout le corps* – apprend à choisir les bonnes conduites, les bonnes stratégies cognitives, au bon moment, garantissant notre *homéostasie*, c'est-à-dire la régulation et la préservation de l'équilibre biologique interne de l'organisme, de façon à assurer sa stabilité dans le temps, son adaptation et tout simplement sa survie. En un mot, *notre santé* !

Ajoutons que cette homéostasie est informée par des mécanismes d'extéro- et d'intéroception, c'est-à-dire de sensibilité somatique à des stimuli externes (*via* les cinq sens) ou internes (les signaux provenant du corps lui-même).

Dans mon exposé, j'illustrerai cette machine à décisions dans ses dimensions neuronale et psychologique, en suivant l'ontogenèse cognitive, c'est-à-dire le développement intellectuel, du bébé humain de quelques mois à l'adulte qui raisonne, juge, décide, tel parfois, au plus haut niveau, un Président de la République. Mais nous verrons que chez l'un, comme chez l'autre, bébé ou Président, l'erreur (de jugement, de décision) n'est jamais loin !

### 1. Matière-vie-pensée

Si l'on prend un peu de recul, même beaucoup, le développement intellectuel humain, celui de nos idées et décisions, s'inscrit lui-même dans un grand tryptique « matière-vie-pensée ». Il y eut d'abord la matière, à l'origine de l'univers il y a 13,8 milliards d'années. Ensuite, de la matière est née la vie, il y a 3,8 milliards d'années avec les premières bactéries. Dans l'arbre du vivant, certains organismes se sont alors peu à peu équipés d'un système nerveux central, il y a environ 500 millions d'années, au sommet duquel le cerveau d'*Homo sapiens* s'est façonné il y a 300.000 ans.

De ce cerveau émergea alors peu à peu la pensée (de la vie à la pensée) telle que nous la connaissons aujourd'hui. Naîtront un jour Homère (son *Illiade*, son *Odyssée*), Platon, Aristote et bien d'autres ! Plus extraordinaire encore, chaque humain, chaque individu – prenons l'exemple d'un bébé d'*Homo sapiens* né en 2021 – va re-parcourir le (son) chemin de la vie à la pensée, avec toutes les connaissances des siècles accumulées (en littérature, philosophie, sciences et technologies) que son cerveau doit acquérir, assimiler, plus ou moins bien, et traduire en une synthèse neurocognitive personnelle en à peine vingt ans. C'est le défi de l'apprentissage social et culturel. Celui des parents et de l'école.

## 2. Le cerveau humain

Comme nous l'a appris le père de la biologie moderne au XIX<sup>ème</sup> siècle, Charles Darwin, cette évolution de la vie à la pensée est une évolution *naturelle* et non pas d'origine divine tel que l'affirmait encore René Descartes au XVII<sup>ème</sup> siècle. C'est donc naturellement que le bébé humain, très singulier mammifère, naît avec un cerveau déjà bien équipé.

En effet, les connaissances accumulées au XX<sup>ème</sup> siècle dans ce nouveau domaine de la biologie qu'on nomme « les neurosciences » ont permis d'estimer que le cerveau humain est doté d'environ 86 milliards de neurones (à peu près tous présents dès la naissance) et d'un million de milliards de connexions dont une bonne part s'établit au cours de l'ontogenèse, soit un réseau, une connectique, plus complexe – dans la tête de chacun – que l'Internet mondial. Il est même trop complexe ! D'où l'importance de la sélection, ou *l'élagage*, des contacts synaptiques entre neurones qui s'opère au cours du développement pour renforcer certaines connexions en mémoire et en supprimer d'autres. Cet élagage synaptique, où l'environnement de l'enfant joue un rôle important, a été très bien documenté et théorisé par notre confrère de l'Académie des sciences Jean-Pierre Changeux dans son modèle épigénétique du « darwinisme neuronal » selon lequel *apprendre, c'est éliminer*. Dans certains cas, *c'est décider*, et même, selon moi, *volontairement inhiber*.

En informatique et Intelligence Artificielle (IA), ce que l'on appelle aujourd'hui le neuromorphisme est beaucoup plus limité : par exemple, le cerveau numérique de l'entreprise américaine Intel, réputé l'un des plus puissants au monde, ne comporte que 100 millions de neurones, soit le cerveau d'un petit mammifère, entre un hamster et un rat. Ainsi, à ce jour, le cerveau humain reste, *de très loin*, le meilleur siège de l'intelligence sur Terre. Encore faut-il bien l'éduquer et bien l'utiliser !

## 3. Le développement de l'intelligence chez l'enfant

Quatre piliers fondent le développement de l'intelligence chez l'enfant, comme l'a remarquablement étudié le psychologue suisse Jean Piaget au XX<sup>ème</sup> siècle : l'objet, le nombre, la catégorisation et le raisonnement.

Si je cache cette petite bouteille d'eau derrière mon dos, il est évident pour vous [adresse au public] qu'elle continue d'exister. C'est parce que votre cerveau infère *la permanence de l'objet*, c'est-à-dire le principe selon lequel les objets continuent d'exister lorsqu'ils échappent à notre perception immédiate. Si, à présent, je cache cette même bouteille partiellement derrière cet écran, il est aussi évident pour vous qu'il ne s'agit pas d'une demi-bouteille, mais d'une bouteille entière, car votre cerveau infère *l'unité de l'objet*. Unité et permanence de l'objet sont ainsi conjointement la brique de base *de toute notre intelligence ultérieure* ! Ces notions n'existent pas à la naissance et se construisent durant les premiers mois de la vie du bébé, notamment à travers ses expériences très intenses de perception visuelle et, peu à peu, de manipulation des objets.

Maintenant, imaginez, un instant, que vous soyez dans le cerveau d'un bébé qui vient de découvrir l'unité et la permanence des objets, tant physiques (comme cette bouteille), que sociaux et humains (comme vous et moi). Cela veut dire que sa perception et sa conception de

l'environnement, du monde, passent *du continu au discontinu*, au sens mathématique : désormais, son environnement est « découpé mentalement » en de *multiples* objets physiques et humains, uniques et permanents. C'est, pour le bébé, une première façon tout à la fois de découvrir la complexité du réel, du monde, et de déjà y mettre de l'ordre. Mais cela veut dire aussi que pour le reste de sa vie (jusqu'à nous cet après-midi à l'Académie par exemple) le cerveau humain, face à ces multiples objets uniques et permanents, aura irrémédiablement envie de faire deux choses : soit les traiter *quantitativement* (les compter), c'est la genèse du *nombre* qui conduira l'enfant, *via* l'école et la culture, aux mathématiques, soit les traiter *qualitativement* (les classer selon la forme, la couleur, la fonction, le nom et le concept), c'est la genèse de *la catégorisation* qui conduira, également *via* l'école et la culture, aux taxinomies. Les deux, quantitatif et qualitatif, peuvent évidemment opérer en synergie dans le cerveau, comme lorsqu'on demande à un jeune enfant de compter les carrés rouges dans un ensemble de formes géométriques colorées posées sur une table, ou quand nous, adultes, faisons des statistiques.

Enfin, lorsque ces traitements quantitatifs (nombres) et/ou qualitatifs (catégorisations) ne portent plus seulement sur des objets concrets, mais aussi sur des idées, des hypothèses et des propositions logiques (à l'adolescence selon Piaget, beaucoup plus tôt selon les découvertes récentes), le cerveau humain atteint sa toute puissance. C'est *le raisonnement hypothético-déductif* (si-alors) où *le réel devient un cas particulier du possible* (devise de mon épée d'Académicien). Il permet à notre cerveau d'élaborer des hypothèses et modèles cognitifs pour prédire (projeter), agir et tester nos idées, même abstraites, dans *et sur* le monde. Le raisonnement est dès lors la charpente de l'architecture cognitive – *telle une cathédrale de l'intelligence*. C'est un processus essentiel à notre adaptation dans la vie quotidienne, mais aussi dans les sciences et pour la créativité dans les arts.

Attention, toutefois, lorsque l'intelligence humaine se déploie, qu'il s'agisse de l'objet, du nombre, de la catégorisation ou du raisonnement, elle peut suivre des chemins sinueux, au point de s'y perdre.

#### **4. Au cœur des processus de la décision dans le cerveau : heuristiques, algorithmes et inhibition**

Ces chemins ou stratégies mentales (*via* des connexions et réseaux neuronaux) se résument en deux grands types. Soit il s'agit d'*heuristiques*, telles que les a décrites le psychologue Daniel Kahneman, Prix Nobel d'économie en 2002, c'est-à-dire des stratégies très rapides, très efficaces – donc économiques pour le cerveau – qui marchent très bien, très souvent, *mais pas toujours*.

Soit il s'agit d'*algorithmes* logico-mathématiques exacts, tels que les a décrits Piaget (dans le sillage d'Aristote et de Descartes), c'est-à-dire des stratégies plus lentes et réfléchies, analytiques, avec effort cognitif, mais qui conduisent *toujours* (sauf en cas de bug) à la bonne solution. Notez que, très loin d'avoir été inventé par les chercheurs contemporains en Intelligence Artificielle de la Silicon Valley, le terme d'algorithme que l'on entend beaucoup aujourd'hui et que j'utilise ici vient du nom du savant perse du IX<sup>ème</sup> siècle, Al-Khwarizmi, membre de la Maison de la sagesse à Bagdad.

Ces deux systèmes de pensée, l'un rapide, l'autre lent, suffisent-ils à décrire l'intelligence humaine comme l'a proposé Kahneman en 2012 dans son livre *Système 1, Système 2. Les deux vitesses de la pensée* résumant les travaux de son Prix Nobel ?<sup>1</sup> Ma réponse est non ! Il en faut un

troisième, *celui d'inhibition*, système d'arbitrage qui précisément interrompt – lorsque c'est nécessaire – le système heuristique pour activer celui des algorithmes. C'est cette capacité d'interruption, *cette décision d'inhiber*, qui est à mon sens le cœur de l'intelligence humaine.

En voici un exemple pour la décision médicale dans le domaine de la lutte contre le cancer (ce qui me permet une brève et intense pensée à mon prédécesseur au fauteuil n°4 de la Section de philosophie, le célèbre oncologue Lucien Israël). Dans son livre évoqué plus haut, Kahneman souligne que le Système 1 (celui des heuristiques) est très sensible aux mots lestés d'une charge émotionnelle forte : par exemple, la mort. Ainsi, pour évaluer les risques d'une intervention chirurgicale immédiate par rapport à une radiothérapie plus longue, un taux de survie de 90% paraît à nos cerveaux encourageant, alors qu'un taux de mortalité de 10% est effrayant !

Dans cette situation de décision, on retrouve les deux systèmes. D'une part, l'heuristique de la peur : éviter le choix de mortalité à 10 %, en raison de la peur de la mort qui est au cœur de la survie, donc de l'homéostasie. D'autre part, l'algorithme logico-mathématique : considérer les deux choix équiprobables, 10 % de mortalité = 90 % de survie ... et juger rationnellement ! Etre intelligent dans ce cas, pour un médecin comme pour son patient, c'est inhiber l'heuristique trop émotionnelle et rapide, pour laisser au cerveau le temps de raisonner selon l'algorithme logique.

Mais Kahneman a, en effet, démontré expérimentalement lors d'une étude réalisée à la Harvard Medical School, ce qu'on appelle « l'effet du cadre ». Selon la façon de présenter les statistiques aux jeunes futurs médecins : dans le « cadre survie », 84% ont retenu l'option chirurgicale, contre 50% seulement dans le « cadre mortalité », alors que le risque était strictement identique ! Ma conclusion est simple : il manquait à beaucoup d'individus interrogés, dans cette prestigieuse université, la capacité *d'inhiber* leur heuristique de la peur, erronée dans ce cas. D'où leurs décisions irrationnelles de type Système 1.

Dans son livre *La science au cœur de nos vies*, Maurice Tubiana, autre oncologue français, membre de l'Académie des sciences et de l'Académie de médecine, soulignait en 2010 que certaines enquêtes « ont tendance à [trop] privilégier les travaux les plus pessimistes, au nom de l'heuristique de la peur » (p. 280).

Avant d'aller plus loin, quelques précisions lexicales et étymologiques à propos du terme « heuristique ». Est-ce le bon terme employé par Kahneman, certes Prix Nobel, et beaucoup d'autres chercheurs après lui en psychologie et sciences cognitives ? Ma réponse est oui. L'heuristique ou euristique (du grec ancien εὕρισκω, *heuriskô*, « je trouve ») est l'art d'inventer, de faire des découvertes en résolvant des problèmes à partir de connaissances incomplètes. Ce type d'analyse permet d'aboutir en un temps limité à des conclusions vraisemblables, mais celles-ci peuvent s'écarter de la solution optimale. En sciences, y compris en sciences humaines et sociales, on parle avec un *a priori* positif « d'hypothèse heuristique » pour désigner une hypothèse choisie provisoirement comme idée directrice indépendamment de sa vérité absolue. *Cela aide, certes, mais peut aussi tromper l'esprit !* Ce sont ces cas moins heureux du système heuristique que je pointe ici, à la suite de Kahneman.

## 5. La permanence de l'objet chez le bébé et l'erreur A-non-B

Nous allons voir à présent, dès le début du développement cognitif, comment le bébé humain décide, mais aussi se trompe. Voici le paradigme expérimental de la recherche de l'objet disparu. Soit un objet (par exemple, une balle) caché derrière un écran sous les yeux du bébé. Jusqu'à huit mois, il ne fait rien pour le retrouver car, selon lui, l'objet disparu n'existe plus. Il ne différencie pas percept et concept. Le premier concept ou proto-concept d'objet permanent n'existe pas encore dans son cerveau. Mais, à partir de huit mois, Piaget a observé que le bébé commençait à aller rechercher systématiquement l'objet derrière l'écran, d'où une réussite. Toutefois, si après quelques répétitions, le psychologue-expérimentateur cache, toujours sous les yeux du bébé attentif, l'objet derrière un autre écran à proximité, disons un écran B plutôt que l'écran A initial, équidistant du point de vue du geste du bébé pour l'atteindre, on constate – comme l'avait découvert Piaget – que jusqu'à douze mois, le bébé fait « l'erreur A-non-B », c'est-à-dire qu'il continue d'aller rechercher l'objet derrière l'écran A, alors qu'il est à présent en B !

C'est un résultat surprenant, mais très robuste, répliqué avec la même procédure sur des bébés du monde entier, dans des laboratoires de psychologie ou en milieu naturel, à la maison par exemple : tous font « l'erreur A-non-B » jusqu'à l'âge d'un an, qui révèle une erreur de décision, un premier biais de raisonnement. La décision à prendre, pour le bébé dans cette situation, est de tendre le bras vers l'écran A ou l'écran B. S'il se trompe, croyait Piaget, c'est parce que le bébé n'aurait pas, avant l'âge d'un an, une solide permanence de l'objet – ce serait encore un défaut d'ordre (proto)conceptuel donc. Mais, on sait aujourd'hui que c'est faux. Des recherches nouvelles en sciences cognitives après Piaget, notamment celles de la psychologue Renée Baillargeon, ont révélé que dès 5 mois les bébés maîtrisent visuellement le principe de permanence de l'objet. En effet, dans le dispositif A-B, le bébé sait que l'objet est caché sous l'écran B (son tout premier regard l'indique d'ailleurs), mais il va quand même le rechercher sous A. Le fin mot de l'histoire a été apporté par la psychologue et neuroscientifique Adele Diamond. Elle a pu démontrer que le cortex préfrontal des bébés n'est pas encore assez mature, avant l'âge d'un an, pour inhiber le geste vers A. C'est cela la vraie explication, insoupçonnée de Piaget. Un défaut d'inhibition motrice.

En mes propres termes, l'heuristique (Système 1) est le geste qui marchait d'habitude pour le bébé, les fois précédentes : le geste préprogrammé vers A dans son cortex moteur, plus exactement pré-moteur. L'algorithme (Système 2) est celui de la permanence de l'objet, à savoir que l'objet continue d'exister – il « se conserve » – à travers ses déplacements dans l'espace, d'A vers B, soit un calcul exact de sa position finale. Mais, ce qui fait défaut au bébé, son manque d'intelligence, c'est avant tout la capacité *d'inhibition* (Système 3) de l'heuristique motrice dominante : le geste vers A.

Cet exemple illustre que dès le début du développement de l'intelligence humaine, la question de la décision, de l'arbitrage (ici, le choix A ou B) est consubstantielle de celle d'inhibition. A un an, c'est ainsi le tout début de l'efficacité du cortex préfrontal pour cet exemple moteur. En outre, l'Imagerie par Résonance Magnétique anatomique (IRMa) a clairement démontré que le lobe frontal est celui dont la maturation (donc l'efficacité) se développe le plus lentement au cours des âges, jusqu'à la fin de l'adolescence. Ce qui veut dire qu'à l'âge adulte, sa maturation est à peine terminée. Il en ressort de nombreux défauts d'inhibition, comme celui du bébé, à tous les âges, mais pour des domaines cognitifs plus complexes que celui de l'objet : la catégorisation, le nombre et le raisonnement logique. En voici un exemple pour le nombre chez l'enfant plus grand.

## 6. La conservation du nombre chez l'enfant et le biais visuospatial de la longueur

Ici encore, l'enfant doit apprendre à *décider*. Face à deux alignements de jetons de même nombre (par exemple 7 et 7) et de même longueur, il doit dire si le nombre de jetons est le même ou non au-dessus et en dessous de la ligne noire. Dès 4-5 ans (âges de l'école maternelle), les enfants réussissent et répondent que c'est pareil, en réalisant souvent une comparaison terme à terme, de jeton à jeton. Mais si, sous les yeux de l'enfant, vous écartez simplement l'un des deux alignements et que vous reposez la même question de comparaison quantitative « Pareil ou pas pareil ? », jusqu'à l'âge de 6-7 ans, tous les enfants répondent : « Ah ben non, maintenant, c'est plus pareil ! ». Et si vous insistez : pas le même nombre ? « Ah, ben non, tu vois bien, y en a plus là parce que c'est plus long ! » dit typiquement l'enfant en pointant du doigt l'alignement le plus long. Ici encore, c'est Piaget qui découvrit cette erreur, ce biais de décision.

Mais Piaget pensait, avec le même raisonnement que pour l'objet chez le bébé (l'erreur A-non-B), que ce qui manquait encore à l'enfant d'école maternelle, trop « intuitif », était la notion ou le concept de nombre, ce dernier apparaissant, selon lui, vers 6-7 ans, « l'âge de raison » cher aux philosophes classiques. En fait, ce qui se passe dans la tête, plus exactement le cerveau, de l'enfant qui échoue dans cette tâche cognitive est bien plus complexe.

C'est un autre exemple, offert par l'enfance, qui illustre le triple système cognitif : *heuristique, algorithme et inhibition*. Quelle est ici l'heuristique exprimée par l'enfant, celle qui sous-tend sa décision erronée et son argumentation ? C'est l'heuristique visuospatiale « longueur = nombre ». D'où vient-elle, pourquoi s'impose-t-elle à l'esprit de l'enfant ? Parce qu'elle marche très souvent et on peut comprendre que l'enfant y pense spontanément. Par exemple, dans les livres de maths pour petits ou les affiches didactiques sur les murs des classes, très souvent on illustre les nombres de 1 à 10 par des alignements d'animaux (ou de fruits). Dans ce cas, l'heuristique visuospatiale « longueur = nombre » marche ! Le cerveau de l'enfant, très tôt, détecte implicitement, voire inconsciemment, ce type de régularités. De même au supermarché, face à deux alignements de produits du même type, sur deux étagères d'un rayon (deux *linéaires* disent les magasiniers !) celui qui est le plus long contient aussi le plus de produits. Ici encore, le cerveau de l'enfant détecte ce type de régularité visuelle et spatiale (« l'enfant est avide de saisir, c'est un véritable accumulateur », disait déjà la pédagogue et médecin Maria Montessori). De même à l'école ou à la maison, quand on apprend les additions et les soustractions (ajouts/retraits) avec des objets sur une table, si l'on additionne, on ajoute 1 ou plusieurs objets ( $1 + 1 + 1 + 1 + \dots$ ) et c'est plus long; si l'on soustrait, c'est l'inverse. Donc là aussi, dans l'arithmétique élémentaire comme au supermarché et dans les livres de maths pour petits, la longueur et le nombre covarient ! C'est ainsi que se crée une heuristique forte dans le cerveau : par la culture (l'exemple du livre) et l'environnement.

Donc quasiment partout, sauf dans la tâche des jetons de Piaget, l'heuristique visuospatiale « longueur = nombre » marche, fonctionne ! Vous comprenez dès lors qu'elle domine dans le cerveau de l'enfant et que pour répondre correctement, pour bien décider de l'équivalence numérique des deux alignements de jetons, il lui faut, grâce à son cortex préfrontal, bloquer, inhiber cette heuristique trop rapide et tentante. Car l'idée directrice de la longueur, *dans ce cas*, est fautive. C'est un biais de jugement, un biais cognitif. Si et seulement si l'heuristique « longueur = nombre » est inhibée, alors peut se dérouler, s'activer dans le cerveau de l'enfant (en son cortex pariétal pour le nombre), l'algorithme du comptage, un peu plus lent, exigeant un effort cognitif, mais analytique

et exact : un, deux trois, ... sept (premier alignement), un, deux trois, ... sept (second alignement), 7 = 7, donc c'est pareil !

D'autres travaux de sciences cognitives après Piaget ont démontré que déjà l'enfant plus jeune maîtrise cette capacité de compter, en son sillon intrapariétal (SIP), siège du nombre et des mathématiques (voir les travaux de notre confrère de l'Académie des sciences, Stanislas Dehaene). Mon interprétation nouvelle est que ce qui manque encore à l'enfant, dans ce domaine du nombre, c'est la capacité d'inhibition appliquée à des dimensions non pertinentes telles ici la longueur. Le cortex préfrontal, toujours en cours de maturation, n'est pas encore assez efficace pour cela avant 6-7 ans.

Afin de tester cette nouvelle interprétation qui remettait en cause la théorie de Piaget et attribuait à l'inhibition le rôle clé dans la bonne décision de l'enfant, j'ai lancé, avec mon laboratoire du CNRS en Sorbonne, au début des années 2000 – c'était une première en France – un grand programme d'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf) avec une cohorte d'enfants volontaires d'écoles maternelles et élémentaires (et l'accord des parents bien entendu), programme validé en amont par un comité d'éthique, tel que le prévoyait la loi bioéthique en vigueur.

Après une familiarisation ludique à l'IRM réalisée à l'école (confinement et immobilité dans un faux tunnel en tissu, avec un faux casque-antenne en carton d'IRM, etc.), le jour J au laboratoire, l'enfant, parfaitement préparé (tel Thomas Pesquet pour l'espace !), était délicatement positionné dans le tunnel de l'IRM (un IRM 3 Teslas) et, lorsqu'il était allongé et immobile, il voyait sur un écran intégré d'ordinateur (posé juste devant ses yeux) la tâche des jetons plus ou moins écartés de Piaget – celle que je vous ai présentée précédemment. Grâce à un boîtier de réponse, doté de deux boutons (l'un associé à la réponse « pareil », l'autre à la réponse « pas pareil »), qu'il tenait dans sa main, l'enfant décidait, à chaque stimulation (double alignement de jetons) présentée à l'écran, si le nombre de jetons était le même ou non au-dessus et en dessous de la ligne noire. La question lui était posée par un système audio *via* un casque qui, en même temps, protégeait ses oreilles du bruit de l'IRM.

Dans cette expérimentation, *rien n'était laissé au hasard !* Avec les parents de l'enfant présents, l'équipe de chercheurs (médecins, manipulateurs radio, neuro-imageurs, psychologues, etc.), nous étions dans l'obscurité bleutée de la salle de contrôle et voyions sur l'écran de l'ordinateur les images du cerveau de l'enfant. La révolution *fabuleuse* de cette technologie est qu'après une reconstruction informatique, l'IRM fonctionnelle produit, pour une tâche cognitive donnée, des images numériques tridimensionnelles reliées à l'activité des neurones en tout point du cerveau de l'enfant, toutes les secondes et au millimètre près.

C'est ainsi que nous avons découvert que la réussite dans la tâche des jetons de Piaget, à partir de l'âge de 6-7 ans, dépend de l'entrée en action d'une partie du lobe frontal, où réside la fonction d'inhibition cognitive (au sens positif évoqué jusqu'ici), le gyrus frontal inférieur (GFI), épicrote cortical de la décision, dont les neurones à axones (ou prolongements) longs peuvent envoyer des ordres *inhibiteurs* précis vers l'ensemble du cerveau, en particulier ici vers une partie du sillon intrapariétal (SIP) où s'enchevêtrent les réseaux neuronaux dédiés au codage spatial de la longueur et au codage du nombre exact. Seul l'ordre inhibiteur des premiers au profit des seconds permet à l'enfant de résister au piège de la longueur pour décider correctement de l'équivalence numérique des deux alignements de jetons et répondre « c'est toujours pareil » après leur

écartement ! Telle une action militaire ciblée ou de la haute couture, l'action tant inhibitrice qu'activatrice du cerveau doit être ici extrêmement précise. C'est une véritable « géopolitique neuronale » qui s'y joue.

En outre, nous avons pu montrer au laboratoire, avec la même tâche piagétienne des jetons, en Électro-EncéphaloGraphie Haute Densité (EEG-HD), technique dotée de 256 canaux ou capteurs mesurant l'activité électrique cérébrale de l'enfant toutes les millisecondes, que cette inhibition de l'heuristique « longueur = nombre », lorsqu'elle est bien déclenchée, survient dans le cerveau à une vitesse inférieure à la seconde (quelques centaines de millisecondes), de manière à bloquer l'impulsion trop rapide. Car comme l'avait pressenti Kahneman, tout est question de *vitesse de la pensée*. Mais ce que l'on démontre ici, contrairement au constat pessimiste de Kahneman sur notre impuissance face aux biais cognitifs, c'est que l'inhibition des heuristiques trompeuses (*via* le Système 3) est possible. Apprendre à les surmonter est même (ou devrait être) une étape-clé du développement intellectuel des enfants.

On retrouve donc pour cet exemple du nombre, comme pour la permanence de l'objet chez le bébé, trois systèmes cognitifs à l'œuvre dans la prise de décision chez l'enfant : l'heuristique (« longueur = nombre »), l'algorithme (le comptage) et l'inhibition.

Mais qu'en est-il des émotions ? Car l'homéostasie que j'évoquais au début de cet exposé dépend aussi des émotions du corps entier, notamment les motivations pour les bons choix. A ce propos, sachez que, dans la tâche de Piaget, si on remplace les jetons par des bonbons et qu'il s'agit de choisir un alignement à manger, alors, dès l'âge de 2 ans, les enfants réussissent, ne se laissant pas du tout tromper par le piège de la longueur si les nombres sont inégaux (et qu'il y en a moins là où c'est plus long). L'enjeu et la gourmandise rendent ici l'enfant mathématicien ! Surtout, cela démontre que c'est *l'émotion qui guide l'inhibition* dans le cerveau, *via* le système limbique. Notamment, nous l'avons démontré, *l'anticipation du regret* qui est une émotion dite « contrefactuelle ». « Contre » (aller contre), c'est bien le sens de l'action *antagoniste* propre à la notion tant physiologique que cognitive d'inhibition.

Ainsi, loin d'être incrémental, comme le pensait Piaget, le développement cognitif, du bébé à l'adulte, est dynamique et non linéaire. Tant les émotions que la capacité (ou le défaut) d'inhibition peuvent en expliquer les hauts et les bas, les progrès et les apparentes régressions. C'est ce que l'on va encore découvrir avec ce dernier exemple : celui du raisonnement logique chez l'adulte.

## **7. Le raisonnement logique chez l'adulte : biais et heuristiques persistants**

*Le bébé humain devenu grand*, on arrive ici au dernier principe cognitif, charpente de la cathédrale de l'intelligence : le raisonnement, en particulier la déduction. Imaginez que je vous invite à lire la règle logique suivante sur un écran d'ordinateur (une règle conditionnelle): « *S'il n'y a pas de carré rouge à gauche, alors il y a un cercle jaune à droite* », et que je vous demande, ensuite, de sélectionner deux formes qui réfutent cette règle parmi les diverses figures géométriques affichées (carrés, cercles, losanges, bleus, jaunes, rouges ou verts), en plaçant une forme dans la case de gauche et l'autre dans la case de droite – ces deux cases de réponse sont disponibles à côté des formes sur l'écran.



Dans ce test de logique, la plupart des personnes adultes interrogées, toutes réputées logiques selon Piaget – y compris des polytechniciens que j’ai pris le soin de tester discrètement dans un grand groupe industriel français – répondent assez (même trop) rapidement : « Carré rouge à gauche et cercle jaune à droite ». Ainsi, en appariant avec les deux formes citées dans la règle (d’où le nom de biais ou heuristique « d’appariement perceptif »), les gens pensent facilement la réfuter – sans doute parce qu’il y a une négation dans l’antécédent. Or l’algorithme logique est tout autre. Dans cette tâche, il s’agit de dérouler mentalement les quatre cas de figure qui peuvent rendre l’antécédent (la partie Si...) et le conséquent (la partie alors...) vrai (V) ou faux (F), soit VV, VF, FV et FF. Seul le cas VF peut réfuter une règle conditionnelle de type si-alors. C’est, par exemple, la réponse « Carré bleu, losange vert » ou toute autre réponse VF qui ne soit ni un carré rouge à gauche (antécédent vrai), ni un cercle jaune à droite (conséquent faux). Il fallait donc, pour le dire simplement, *inhiber* le carré rouge et le cercle jaune cités dans la règle. « Sortir du cadre », s’abstraire !

Lors d’un premier test de raisonnement de ce type, nous avons constaté que les réponses logiques étaient très minoritaires (16%), alors que la théorie de Piaget, s’agissant de grands adolescents ou d’adultes, eût prédit à peu près 100% de réussite. Non seulement, ces derniers ont atteint l’âge de raison depuis longtemps (dès 7 ans), mais aussi celui de la logique formelle, dernier stade piagétien du raisonnement dit « hypothético-déductif » (vers 14-16 ans). Or, il n’en est rien, le développement dynamique et non linéaire fait réapparaître, ici aussi, des biais et heuristiques qui dominent encore chez l’adulte, tel le biais d’appariement perceptif, révélant une forme d’irrationalité flagrante là où la rationalité logique était attendue.

Face à ce constat et après la lecture de l’ouvrage *Les normes du vrai* du philosophe Pascal Engel, j’ai formulé, contrairement à Kahneman, une *présomption de rationalité*. A savoir que les individus qui se trompent dans ce test ont bien la logique nécessaire à sa réussite – l’algorithme – quelque part dans leur cerveau, mais restent incapables, même à l’âge adulte, d’inhiber un biais ou une heuristique trop tentant(e), déclenché(e) par la tâche, d’où leur mauvaise décision ! Comme chez le bébé ou l’enfant, cet adulte illogique n’est pas irrationnel, mais mauvais inhibiteur. Son cortex préfrontal, certes arrivé à maturité, reste encore fragile dans son usage dès qu’un piège cognitif surgit.

Fragile, *mais toujours perfectible* ! Et cela grâce à l’environnement social, pédagogique, soit une « interaction de tutelle », processus sociocognitif cher aux psychologues Lev Vygotski et Jerome Bruner. C’est pourquoi, avec mon laboratoire, nous avons conçu un entraînement de l’inhibition dans ces tâches de raisonnement. S’agissant d’une expérimentation scientifique, il fallait évidemment un groupe contrôle qui fut celui d’un simple entraînement à la logique du test, sans inhibition – comme on le fait classiquement à l’école. Les résultats furent clairs. Seul l’entraînement de l’inhibition était efficace, confirmant que c’était bien ce processus qui faisait défaut aux individus interrogés et non pas la logique elle-même, corroborant dès lors notre *présomption de rationalité*.

Mais le plus extraordinaire, Chères Consœurs et Confrères, fut ce que l’on découvrit, lors de cette expérimentation, en imagerie cérébrale. Après l’entraînement de l’inhibition, les individus qui étaient passés d’une réponse biaisée à la réponse logique – ou de l’heuristique du Système 1 à l’algorithme du Système 2 – et eux seuls, présentaient une reconfiguration cérébrale de la partie postérieure du cerveau en pré-test (avant l’entraînement) à sa partie préfrontale en post-test (après

l'entraînement). Pour la première fois, en psychologie expérimentale et en neurosciences, était ainsi démontré le processus d'inhibition d'un biais cognitif dans le cerveau humain. Et surtout la possibilité de l'exercer par l'apprentissage. Tel un slogan, je le répète : un cerveau fragile, très sensible aux biais, *mais toujours perfectible !*

Ici encore, comme dans l'exemple de l'objet chez le bébé ou du nombre chez l'enfant, l'inhibition est au cœur de l'intelligence. La logique d'Aristote, de Descartes ou de Piaget (le Système 2 de Kahneman), qu'elle soit innée ou acquise, ne suffit pas. Il faut à notre cerveau la capacité d'inhiber ses biais cognitifs (les paralogismes et sophismes déjà dénoncés par Aristote jadis, les heuristiques de Kahneman)<sup>2</sup>. Mais, contrairement à ce que pense Kahneman de façon trop pessimiste, notre esprit n'est pas condamné à être dominé par ces heuristiques irrationnelles du Système 1. Le cerveau a en lui une force d'inhibition, de contrôle inhibiteur (le Système 3). Mais sans doute faut-il mieux l'éveiller et l'exercer, tant chez l'enfant que chez l'adulte.

Plus précisément et concrètement, l'entraînement de l'inhibition que nous avons conçu en laboratoire correspond à un « Attrape-piège », c'est-à-dire un filtre d'attention sélective dessiné avec une zone ou « mémoire de travail » en forme de carré (celle des réponses qui viennent à l'esprit, le champ des possibles), composée en son centre d'un cercle qui symbolise la zone d'activation finale (pour l'algorithme qui sera sélectionné) et, tout autour, des hachures qui symbolisent la zone inhibitrice sous laquelle glisser obligatoirement les cartons-réponses initiaux, spontanés, issus de l'heuristique erronée. Cette épure pédagogique, « métacognitive » pourrait-on dire au sens où elle invite l'individu à prendre conscience de ses propres processus cognitifs (heuristique, algorithme et inhibition), présente l'avantage de pouvoir s'appliquer à n'importe quelle tâche cognitive ou scolaire (y compris du monde du travail) qui requiert du contrôle inhibiteur, des plus simples aux plus complexes. En outre, on peut lui apposer un label de validation d'efficacité neuropédagogique testée par imagerie cérébrale en laboratoire.

## **8. Le rôle des émotions dans la décision**

Mais s'agit-il de « cognitif » uniquement ? Non, pas tout à fait. Un peu comme dans l'exemple du nombre précédemment évoqué (souvenez-vous des bonbons), nous avons pu visualiser ici en imagerie cérébrale le circuit des émotions qui guident l'inhibition du biais de raisonnement vers la logique. C'est un circuit qui va du système limbique, le « lobe des émotions » au centre du cerveau, vers le cortex préfrontal, le « lobe de la décision ». Chez les individus qui étaient passés, *grâce à l'apprentissage*, de la réponse biaisée (l'heuristique) à la logique et chez eux seuls, une région paralimbique clé, d'interface entre les deux lobes, le cortex préfrontal ventromédian (CPVM) de l'hémisphère droit, était systématiquement activée, corrélativement à la correction de l'erreur.

Cette région, très bien documentée par les travaux du neurologue Antonio Damasio, est l'épicentre, avec d'autres (tel le cortex cingulaire antérieur, CCA), des émotions contrefactuelles comme le doute, la curiosité et le regret – émotions mêlées de « sentiments intellectuels », ainsi que les nommait jadis notre confrère philosophe Théodule Ribot (dans *La logique des sentiments*). Aujourd'hui, nous mesurons chacune d'elles au laboratoire *via* des échelles graduées (de doute, de curiosité et de regret) que les individus complètent, un peu comme les échelles de douleur à l'hôpital. Ce résultat sur les émotions qui guident l'inhibition nous rappelle que même lorsqu'il s'agit

de raisonnement logique et de pure abstraction, tout le corps est impliqué car c'est l'homéostasie et les relations très rapides, permanentes, corps-émotions-cerveau qui alimentent *toujours* nos équilibres internes, qu'ils soient biologiques ou cognitifs. Damasio l'a remarquablement illustré. C'est en ce sens que j'ai intitulé l'un de mes récents livres *L'intelligence humaine n'est pas un algorithme* (il faudrait dire *pas seulement*). Elle est aussi de ressentir corporellement, ou *via* des boucles de simulation dans le cerveau, les émotions qui nous font, *au bon moment*, inhiber nos automatismes (ou heuristiques erronées) et trouver la solution logique (l'algorithme) pour prendre les bonnes décisions – l'algorithme ne survenant qu'à la fin du processus. *C'est ainsi qu'on apprend !*

Une machine d'Intelligence Artificielle n'a pas de corps, pas d'enjeux d'équilibre et de survie biologiques, pas de peur de se tromper, pas d'homéostasie, dès lors pas d'émotions régulatrices fines qui guideraient l'inhibition du fonctionnement automatique, précisément mécanique ou informatique, lorsqu'il est biaisé. A quand des machines contrefactuelles au sens où elles douteraient d'elles-mêmes, seraient curieuses, anticiperaient le regret de leurs réponses ou calculs trop rapides et inhiberaient leurs propres automatismes erronés ? On en est très loin ! Ce serait pourtant utile car l'IA et le *Big Data* peuvent créer des biais cognitifs tout autant erronés que gigantesques.

## 9. Conclusion

Dans cet exposé, j'espère vous avoir bien illustré à partir de quelques exemples seulement (il y en aurait beaucoup d'autres), ce que j'appelle un modèle distribué d'inhibition des heuristiques dans le cerveau humain. Selon cette théorie, pour répondre à votre préoccupation essentielle, Monsieur le Président Vacheron, *un cerveau en bonne santé cognitive est un cerveau qui inhibe bien !* On pourrait le démontrer pour d'autres exemples médicaux telles les conduites addictives où le défaut de contrôle inhibiteur préfrontal est flagrant, chez les adolescents notamment.

Conscients désormais de l'importance du contrôle inhibiteur pour le bon développement cognitif du cerveau et de ses décisions, à partir de nos découvertes neuropédagogiques d'imagerie cérébrale en laboratoire, nous avons conçu, avec l'éditeur scolaire Nathan, des coffrets et jeux éducatifs pour la classe, parus en 2020 et destinés à *Entraîner le cerveau à résister* (résister aux biais cognitifs), l'un pour l'école maternelle, depuis la petite section, l'autre pour l'école élémentaire, du CP au CM2. Ils comportent un « Attrape-piège », un grand poster qui illustre pour les enfants la course cognitive entre l'Heuristique trop rapide et l'Algorithme plus lent, arbitrée juste avant la ligne d'arrivée (la réponse) par le Capitaine Inhibition ! En outre, chaque coffret pédagogique comporte un manuel destiné aux professeurs des écoles qui leur explique, tout au long de la journée, de la semaine et de l'année, comment décliner ces outils nouveaux dans le programme scolaire : notamment à l'école élémentaire pour apprendre à lire, écrire, compter, raisonner et respecter autrui.

Tout ce que j'ai décrit dans cet exposé vaut pour l'école en priorité, mais aussi pour l'entreprise et le monde du travail où les automatismes erronés sont légion, qu'il s'agisse d'heuristiques individuelles ou collectives. Bien des décisions absurdes en entreprise, soulignait le sociologue Christian Morel dans ses livres à succès sur ce sujet, s'expliquent par notre théorie du défaut d'inhibition. Des erreurs presque-enfantines resurgissent dans certains contextes, écrit-il.

Rappelez-vous nos polytechniciens dans le test de logique analysé plus haut, pourtant élémentaire. Il suffit de très peu (une négation dans l'antécédent d'une règle à réfuter) pour que le cerveau dérape, sorte de sa route rationnelle et logique, revenant à un mode perceptif erroné.

A cet égard, on a vu *qu'un cerveau qui décide bien est un cerveau qui inhibe bien*. Dans cet esprit, j'ai intitulé un livre *L'inhibition au service de l'intelligence. Penser contre soi-même*, alors que notre confrère physiologiste de l'Académie des sciences, Alain Berthoz, publiait simultanément en 2020, dans le même esprit, *L'inhibition créatrice*.

En outre, je voudrais non pas souligner mais *espérer* l'intérêt de ces découvertes pour lutter contre les biais cognitifs des chercheurs, des médecins (nous en avons vu des exemples au début), mais aussi des politiques. Du bébé au Président de la République que le défaut d'inhibition peut aussi, parfois, guetter ! Les enfants d'école élémentaire, on le sait, font souvent des fautes d'orthographe du type « je les manges » avec un s à manger. Nous avons démontré au laboratoire que ce n'est pas qu'ils ignorent la règle selon laquelle il n'y a pas de s à la première personne du singulier dans les verbes du premier groupe (manger, trouver, etc.), mais ils sont incapables d'inhiber l'heuristique surapprise : « après les, je mets un s ». Il s'agit encore d'un défaut d'inhibition préfrontale ! ... Ce type d'erreur est-il le propre des enfants ? Non !

Le 9 novembre 2020 à Colombey-les-Deux-Eglises, lors d'un hommage au Général de Gaulle, Emmanuel Macron écrivait dans le livre d'or à la Boiserie : « *Cinquante ans plus tard, le souvenir vivace du Général de Gaulle demeure une source d'inspiration pour notre Nation, notre République. Pussions-nous trouver en ces lieux, en ses choix, les traces qui nous permettrons de bâtir notre action pour la France.* » L'enfant « inhibiteur inefficace » n'est jamais loin ! En outre, de la simple faute d'orthographe au biais cognitif de décision, plus profond, l'écueil cérébral n'est pas si distant, *le cerveau est fragile mais perfectible*, avec tout le respect que je dois à notre protecteur !

Des découvertes exposées cet après-midi, vous comprenez également les enjeux pour la santé cognitive dans le monde des écrans, notamment chez les adolescents et les jeunes adultes : l'inhibition des *fake news* ou infox sur Internet qui ne sont autres que des pièges de l'heuristique de *crédibilité* (on s'arrête trop vite à ce qui est crédible ou à ce qu'on a envie de croire), heuristique qui court-circuite l'algorithme plus lent de validité et de vérification logiques – cœur de métier des journalistes sérieux. Là aussi l'inhibition, facteur d'interruption, est essentielle. Notre monde cognitif devenu fou et trop rapide manque *cruellement* d'inhibition. C'est sur ce processus que devrait être aujourd'hui construite l'éducation à l'esprit critique.

Enfin, quelques lectures pour les petits et les grands : *Explore ton cerveau* (KIDIDOC) et *Mon cerveau* (Questions ? -Réponses !) pour les petits chez Nathan ; pour les plus grands : *Le cerveau et les apprentissages*, *L'école du cerveau* et *La psychologie de l'enfant*.

Merci de votre constante inhibition, signe de la bonne homéostasie (ou santé) de notre compagnie !

## Notes

1. Rappelant, à certains égards, l'esprit de finesse (Système 1) et l'esprit de géométrie (Système 2) distingués jadis, au XVII<sup>ème</sup> siècle, par Blaise Pascal.
2. Les « puissances trompeuses » dénoncées par Pascal.

## Références

Aron, A. et al. (2004). Inhibition and the right inferior frontal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 8, 170-177.

Aron, A. et al. (2014). Inhibition and the right inferior frontal cortex: One decade on. *Trends in Cognitive Sciences*, 18, 177-185.

Berthoz, A. (2020). *L'inhibition créatrice*. Paris : Odile Jacob.

Changeux, J.-P. (1983), *L'homme neuronal*. Paris : Fayard.

Changeux, J.-P. (2016), *L'homme neuronal, trente ans après*. Paris : Édition rue D'Ulm.

Dehaene, S. (2010). *La bosse des maths*. Paris : Odile Jacob.

Damasio, A. (1999). *Le sentiment même de soi : Corps, émotion, conscience*. Paris : Odile Jacob.

Damasio, A., & Carvalho, G. (2013). The nature of feelings: Evolutionary and neurobiological origins. *Nature Reviews Neuroscience*, 14, 143-152.

Engel, P. (1989). *La norme du vrai : Philosophie de la logique*. Paris : Gallimard.

Fuster, J. (1997). *The Prefrontal Cortex*. New York: Raven Press.

Fuster, J. (2003). *Cortex and Mind*. Oxford and New York : Oxford University Press.

Houdé, O. (2004). *La psychologie de l'enfant*. Paris : PUF.

Houdé, O. (2014). *Apprendre à résister*. Paris : Le Pommier.

Houdé, O. (2020). *L'inhibition au service de l'intelligence : Penser contre soi-même*. Paris : PUF.

Houdé, O. (2021). *L'école du cerveau*. Paris: Le Livre de Poche.

Houdé, O. et al. (2000). Shifting from the perceptual brain to the logical brain: The neural impact of cognitive inhibition training. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 721-728.

Houdé, O. et al. (2001). Access to deductive logic depends on a right ventromedial prefrontal area devoted to emotion and feeling: Evidence from a training paradigm. *NeuroImage*, 14, 1486-1492.

Houdé, O. et al. (2011). Functional MRI study of Piaget's conservation-of-number task in preschool and school-age children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 110, 332-346.

Houdé, O., & Borst, G. (Eds.) (2018). *Le cerveau et les apprentissages*. Paris : Nathan.

Houdé, O., & Tzourio-Mazoyer, N. (2004). Neural foundations of logical and mathematical cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 4, 507-514.

Kahneman, D. (2012). *Système 1, Système 2 : Les deux vitesses de la pensée*. Paris : Flammarion.

Piaget, J. (1936). *La naissance de l'intelligence chez l'enfant*. Neuchâtel : Delachaux & Niestlé.

Piaget, J., & Inhelder, B. (1966). *La psychologie de l'enfant*. Paris : PUF.

Piaget, J., & Szeminska, A. (1941). *La genèse du nombre chez l'enfant*. Neuchâtel : Delachaux & Niestlé.

Ribot, T. (1904). *La logique des sentiments*. Paris : Alcan.

Tubiana, M. (2010). *La science au cœur de nos vies*. Paris : Odile Jacob.

\* \* \*