

d'ions de charge opposée à celle de la surface. Une particule positivement chargée plongée dans une telle solution est entourée d'une zone chargée négativement, mais «vu de loin», l'ensemble apparaît neutre. Ainsi, en raison de l'écrantage, la force électrique totale qui s'exerce sur ces objets est nulle : le mouvement résulte des mouvements relatifs du fluide et de la particule, car le champ électrique tire le fluide dans un sens opposé à celui de la particule.

Si cette double action du champ électrique est facilement analysable pour des objets chargés uniformément en surface, elle conduit à un mouvement d'ensemble surprenant pour des objets hétérogènes. Dans le cas de la migration des particules de polymère (molécules linéaires), nous avons analysé quelques situations extrêmes, où la vision classique ne s'applique plus.

Imaginons d'abord un polymère refermé sur lui-même dont les deux moi-

tiés ont des charges identiques, mais de signe opposé (voir la figure a). Pour des raisons de symétrie, placé dans un champ électrique, ce polymère globalement neutre ne bouge pas. Lorsque l'on coupe le polymère au centre de sa partie chargée positivement, il dérive comme un objet chargé positivement. Pourquoi ? Parce que les parties chargées positivement sont moins enfouies que les parties chargées négativement. Ces parties positivement chargées sont donc en meilleur contact hydrodynamique avec le fluide environnant et prédominent pour la détermination du sens du mouvement. Cet exemple illustre de manière frappante que le mouvement ne dépend pas de la charge totale du polymère, mais bien de la répartition des charges le long de la chaîne.

Autre exemple, un polymère formé d'un bloc positif attaché à un bloc négatif (b) peut dériver dans le sens du champ appliqué pour de faibles intensités de ce champ et dans le sens opposé pour des

intensités plus grandes : lorsque l'intensité du champ augmente, la déformation du polymère modifie la répartition géométrique des charges.

Finalement, un objet ne dérive pas nécessairement dans le sens du champ ou dans le sens opposé : nous avons imaginé un objet qui tourne sur lui-même sans dériver (c), et un objet qui dérive perpendiculairement au champ appliqué, quelle que soit la direction de ce dernier (d).

Pour l'électrophorèse sur gel, la structure réticulée du gel gomme la plupart des effets hydrodynamiques et ces exemples ne s'appliquent pas. En revanche, en électrophorèse sur capillaires, les effets hydrodynamiques peuvent être importants. En outre, l'analyse de ces effets constitue un premier pas vers la conception de petites pompes, analogues artificiels d'entités biologiques, telles certaines pompes cellulaires ou certains nanorotors.

Didier LONG et Armand AJDARI, Physico-chimie théorique, ESPCI, Paris.

Le réveil des dunes

On déboise aujourd'hui les dunes fixées au siècle dernier par des forêts.

Les dunes mobiles ont longtemps été synonymes de menace, de désertification et de misère pour les populations du littoral. Tout au long du XIX^e siècle, les gestionnaires du littoral européen les ont plantées d'arbres afin de les fixer. Aujourd'hui, au contraire, on protège les dunes encore non boisées et, dans certaines régions, on les déboise.

Le déplacement des dunes menace d'ensablement les maisons, les routes et les champs cultivés près des littoraux. Ainsi, sur la côte d'Aquitaine, pendant

des siècles, les dunes se déplaçaient sous l'action du vent et ensevelissaient les bâtiments.

Grâce à son *Mémoire sur les dunes*, paru en 1797, Nicolas Brémontier, ingénieur des Ponts et Chaussées à Bordeaux, obtient en 1801 la publication d'un décret prescrivant de «prendre des mesures pour continuer de fixer et de planter en bois les dunes des côtes de Gascogne». À la fin du Second Empire, une forêt homogène de pins maritimes s'étend sur 80 000 hectares. Elle stabilise la topographie et, par ses ressources en bois et en résine, contribue au développement socio-économique d'une région jusque là pauvre et attardée.

Cet exemple fait école. Au cours du XIX^e siècle, les espaces dunaires de nombreuses côtes d'Europe atlantique sont boisés de la même façon.

Changement de tendance : en cette fin du XX^e siècle, la vacuité et la valeur paysagère des espaces dunaires naturels sont appréciés. Ceux qui ont échappé au boisement font désormais l'objet de mesures de conservation. Ainsi, les grands champs de dunes libres du Coto de Doñana, en Espagne, et de Leba, en Pologne, sont aujourd'hui inclus dans des parcs nationaux. Au Danemark, près de Skagen, des terres agricoles ont été achetées par l'État pour permettre aux dunes mobiles de Råbjerg Mile de les envahir librement.

En outre, au Danemark et en Angleterre, des boisements artificiels sont éliminés des dunes où ils avaient été implantés. Le but est de redonner vie aux dunes, en s'assurant évidemment que leur mouvement ne présentera pas un risque pour des établissements humains, et de permettre ainsi à la végétation native spécifique du sable de s'y réimplanter spontanément.

Cette évolution de l'aménagement du territoire, où des environnements autrefois sans attrait sont aujourd'hui appréciés pour leur valeur écologique et esthétique, dépasse le cadre des espaces dunaires. La conquête de nouvelles terres agricoles aux dépens des marais maritimes est arrêtée et, en Allemagne et aux Pays-Bas, des polders sont remis en eau. Les riverains, dont la mémoire collective reste marquée par des siècles de lutte contre les sables ou contre la mer, accepteront-ils ce retour à une nature romantique et sauvage ?

Roland PASKOFF, Université Lumière, Lyon



La forêt de pins noirs plantée au début de ce siècle dans la réserve naturelle des dunes d'Ainsdale, près de Southport, en Angleterre, sur la côte de la mer d'Irlande, a été abattue sur une quinzaine d'hectares pour redonner de la mobilité aux dunes.

Qu'est-ce que l'intelligence?

JEAN-POL TASSIN

L'intelligence, modelée par le patrimoine génétique et par l'environnement culturel et affectif, dépendrait d'un équilibre subtil entre un mode de traitement rapide des informations et un mode lent d'analyse de ces données.

Faculté de connaître, de comprendre et de s'adapter, faculté d'abstraction et d'anticipation ou encore intuition, l'intelligence séduit : avec le langage, elle différencie l'homme de l'animal. Pourtant, selon les études de psychologie animale, l'animal sait réaliser des tâches qui nécessitent des facultés quasi identiques à celles qui définissent l'intelligence humaine.

Apprendre à retrouver dans un labyrinthe le chemin qui mène à une récompense ou utiliser un instrument pour atteindre un appât sont des capacités qui ne sont pas propres à l'homme. Il ne s'agit pas de nier les différences entre les performances de l'homme et celles de l'animal, mais elles ne correspondent pas à une discontinuité biologique : l'homme ne diffère du chimpanzé que par une infime partie de son génome (moins de deux pour cent). Toutefois, de l'accumulation des conséquences d'une faible différence résulte une apparente discontinuité.

Peut-on tenter de distinguer l'intelligence humaine et l'intelligence animale? Une des composantes de cette différence semble être le mode de traitement et de mémorisation des informations. Pour connaître, pour comprendre et pour s'adapter, en un mot pour faire preuve d'intelligence, il faut que les perceptions et les sensations que reçoit le système nerveux central aient un sens, c'est-à-dire que les différents stimulus sensoriels soient associés, classés par les structures cérébrales nécessaires au traitement de l'information et mémorisés. Les étapes de ce traitement, par exemple la rapidité de perception d'un stimulus, son stockage, son évaluation par rapport aux informations déjà enregistrées, son ana-

lyse et la réaction qu'il déclenche, sont des facteurs de l'intelligence.

Les anatomistes et les neurophysiologistes ont montré que le traitement de l'information réalisé par un cerveau animal ne diffère pas du traitement effectué par le cerveau d'un très jeune enfant : tant que l'information n'a pas un caractère de nouveauté, le traitement des messages est relativement peu élaboré. Le traitement est rapide, quasi « automatique » : il s'écoule un temps court – inférieur ou égal à 300 millisecondes – entre la perception d'un stimulus et la réaction qu'il déclenche. Lors de ces traitements rapides, le système nerveux central fonctionne selon un mode analogique qui fait appel aux réseaux de neurones constitués au cours du développement.

Le traitement analogique rapide

Dans le cerveau, il existerait deux modes de stockage des informations : un mode rapide, nommé analogique, où l'information est traitée et enregistrée sans que l'on en ait conscience, et un mode lent, dit cognitif, où l'information est analysée consciemment avant d'être stockée. Au cours du développement, quand plusieurs neurones sont activés par un même stimulus, des connexions s'établissent et se renforcent à mesure que l'expérience se reproduit identique à elle-même ; au contraire, quand l'expérience diffère, les connexions sont modifiées. Ce système de mémorisation analogique permet de reconnaître instantanément un stimulus visuel ou auditif, sans qu'il soit nécessaire de l'analyser (on distingue immédiatement le miaulement d'un chat et le grincement d'une porte).

Ce modèle de traitement analogique du cerveau a été élaboré par le mathématicien John Hopfield, qui a eu l'idée d'appliquer les connaissances d'une discipline de la physique des particules, la mécanique statistique, aux réseaux neuronaux. Il a montré que des neurones réunis en réseaux se comportent comme des systèmes de molécules qui interagissent en



1. PEINTURE DE VASARELY évoquant la complexité du traitement cérébral des informations.

modifiant leurs comportements respectifs. Dans ce modèle, les neurones tendent à s'organiser selon un modèle analogue aux structures cristallines.

Les souvenirs sont stockés selon la «règle de Hebb» : quand deux neurones sont activés simultanément lors de l'entrée d'une information, la force de leur liaison, encore nommée «poids synaptique», augmente. Inversement, quand l'activité d'un des deux neurones augmente alors que celle de l'autre diminue, le poids synaptique qui les relie diminue.

C'est l'entrée répétée de la même information qui donne naissance à une mémoire, la quantité d'informations n'étant limitée que par le nombre de neurones du système. Une fois le souvenir enregistré, une partie quelconque du souvenir suffit à faire converger le système vers un état stable : la mémoire est restituée dans sa totalité. Selon J. Hopfield, chaque mémoire corres-

pond à un état d'énergie minimal, état qualifié de bassin attracteur. Ce bassin «attire» vers une mémoire commune des informations qui ont été acquises en même temps (certaines composantes d'un visage ou des événements simultanés). Ainsi, en me promenant sur l'Acropole, à Athènes, alors qu'il venait de pleuvoir et qu'il y avait un arc-en-ciel, j'ai vu un colley. Dans le même bassin attracteur sont stockés le chien, l'arc-en-ciel et l'Acropole. N'importe lequel de ces éléments activera les autres : la vue d'un arc-en-ciel évoquera l'Acropole et le chien.

Ce modèle a l'intérêt de concilier deux caractéristiques essentielles du système nerveux central : il traite plusieurs informations en parallèle et il sait reconstituer une information complète à partir d'éléments épars. Par exemple, la reconnaissance d'un visage est trop rapide pour résulter d'une recherche séquentielle parmi tous les visages connus, ou d'une analyse exhaustive de tous les composants du visage.

Ces bassins attracteurs ne contiennent pas que des informations objectives comme peuvent l'être une forme, une couleur ou une texture. Ils contiennent aussi des «affects» : en revoyant une personne que nous n'avons pas rencontrée depuis plusieurs années, nous ne savons plus qui elle est, ni à quelle occasion nous l'avons connue, mais nous nous souvenons qu'elle nous est sympathique ou antipathique.

Dès la naissance, et même avant en ce qui concerne l'audition, des mémoires se constituent selon ce principe d'analogie. Toutefois, si le système de traitement analogique est rapide, il n'est pas totalement fiable : quand deux événements différents ont quelques éléments communs, ils peuvent activer le même bassin attracteur, et l'on croit percevoir une porte qui grince au lieu d'un chat qui miaule.

Les perceptions, les sensations, puis, plus tard, les actes moteurs sont associés et classés en catégories qui ne sont pas nécessairement «logiques». Ainsi, il faut du temps à un enfant qui commence à parler pour comprendre que le chat avec lequel il joue ne peut pas dialoguer avec lui. Avant 20 mois environ, les éléments considérés comme caractéristiques du chat sont suffisamment analogues à ceux d'un autre enfant du même âge pour que les deux ensembles convergent vers une même

mémoire. Il faut un autre traitement, plus lent et mettant en jeu plusieurs structures cérébrales, dont le cortex préfrontal, pour que l'enfant sépare en deux catégories le-chat-qui-ne-parle-pas et l'enfant-qui-parle-et-comprend.

Cet autre traitement – le traitement cognitif – permet la formation de deux nouveaux bassins attracteur, l'un qui représente le chat et l'autre le camarade de jeu ; ces deux ensembles participeront, par la suite, au traitement analogique rapide. C'est à ce stade du traitement de l'information qu'apparaissent des différences quantifiables entre le cerveau animal et le cerveau humain.

Le traitement cognitif

L'intervention du cortex préfrontal, une aire cérébrale particulièrement développée chez l'homme, modifie notablement le traitement de l'information. Selon Joaquín Fuster, cette structure intervient dans l'«organisation temporelle du comportement». Le cortex préfrontal est un élément essentiel de la mémoire dite à court terme, le rassemblement des éléments nécessaires à la réalisation d'une tâche et à l'élimination des interférences, internes et externes, susceptibles de rompre les enchaînements comportementaux. En d'autres termes, le cortex préfrontal a la propriété fondamentale (et peut-être unique dans le système nerveux central) de maintenir une information active jusqu'à l'obtention d'une solution considérée comme satisfaisante.

Cette période de persistance de l'information diffère selon les espèces : elle n'excède pas trois secondes chez le rat, mais atteint 20 secondes chez le singe. Elle est supérieure chez l'homme adulte, mais sans doute inexistante chez le nouveau-né ; ainsi, elle apparaît progressivement au cours de la maturation du cortex.

Cette étape essentielle autorise le maintien de l'information, son analyse, d'éventuelles modifications et son classement. Elle facilite des retours vers un stock d'informations déjà mémorisées, permet des comparaisons et des simplifications (seuls les éléments essentiels sont conservés) ; on peut imaginer et prévoir diverses situations. Cette étape est indispensable à la conceptualisation, notamment à l'abstraction, à la symbolisation et à l'anticipation.



AKG Paris

Reprenons l'exemple du bassin attracteur mentionné précédemment : la vue d'un colley réactive le bassin attracteur colley-Acropole-arc-en-ciel. Si, parce qu'il fait presque nuit ou que l'animal est passé très vite, on croit voir, à la place du colley, un chat qui aurait les mêmes couleurs, un autre bassin attracteur s'active : il est, par exemple, constitué par le souvenir d'un ami qui aime le ski de fond et a un petit garçon et un chat. Ce souvenir ne semblant pas correspondre avec la réalité, la vue de l'animal est maintenue dans le cortex pendant plusieurs secondes. L'information est analysée et un élément décisif, par exemple la taille de l'animal, permet de traiter l'information de façon cognitive et de réaliser l'erreur faite au cours du traitement analogique. Le bassin attracteur correspondant au

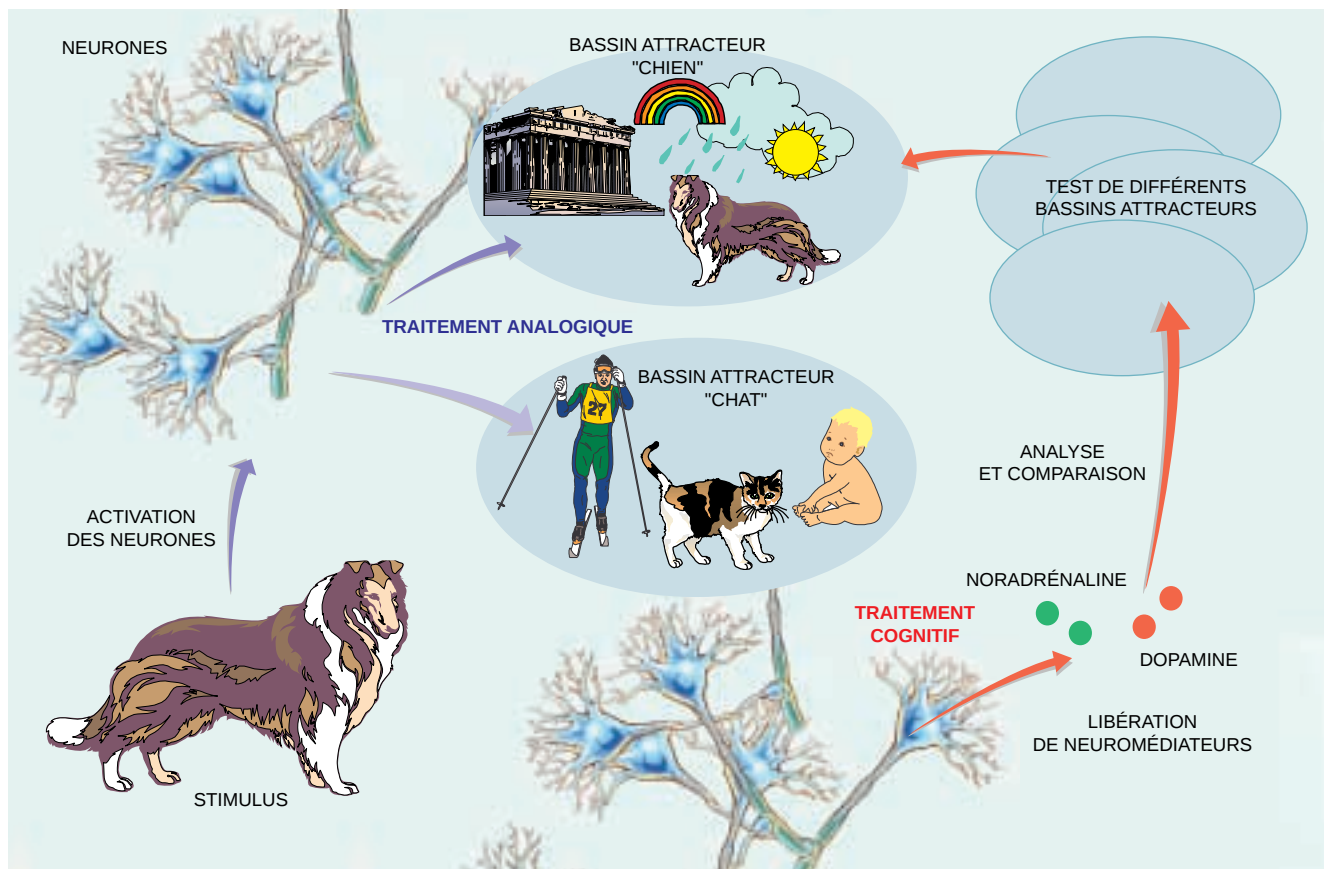
colley est réactivé. Il peut être complété avec des informations liées à la nouvelle réactivation de ce bassin, par exemple le crépuscule. Sinon, un nouveau bassin peut être créé. L'information reste active dans le cortex préfrontal tant qu'une solution jugée satisfaisante n'est pas trouvée.

Bassin attracteur erroné

Toutefois, même si le traitement cognitif enrichit le traitement de l'information, notamment en tenant compte du contexte, le résultat obtenu est mémorisé en mode analogique et perd ainsi une partie de sa précision. Ainsi, on décrit aisément les détails de la pièce où l'on se trouve (sur le mode cognitif), mais la description de cette même pièce, lorsqu'on l'a quittée, ne peut être qu'une reconstruction en mode cognitif de ce

qui a été stocké sous forme analogique. En résumé, le traitement des informations dans le système nerveux central se ferait selon deux modes qui se différencient, notamment, par leur vitesse : un traitement rapide, analogique, auquel nous n'avons pas accès, et un traitement plus lent, cognitif, qui, parce que nous avons conscience des informations qu'il traite, semble être caractéristique du fonctionnement du cerveau humain.

Chez l'adulte, au cours de la veille, les deux modes, analogique et cognitif, sont en oscillation permanente. C'est par ces deux modes que le système nerveux central perçoit les informations, leur donne un sens et les mémorise. Selon cette hypothèse, l'intelligence serait l'aptitude d'un animal ou d'une personne à utiliser les capacités de ces deux modes de traitement. Elle dépendrait de trois



2. LORS DE LA RÉCEPTION D'UN STIMULUS, ici la vue d'un chien, un groupe de neurones est activé. L'information est traitée sur un mode analogique rapide (flèche violette, en haut) : le bassin attracteur qui regroupe des informations enregistrées simultanément (sur l'Acropole, après une averse, alors qu'il y avait un arc-en-ciel, j'ai vu un colley) est activé. Ainsi la vue d'un colley évoque l'Acropole ou un arc-en-ciel. Ce traitement requiert, au maximum, 300 millisecondes. Le stimulus active parfois un bassin attracteur erroné (flèche mauve) : par exemple, un ami qui aime le ski de fond a un enfant et un chat. Ce bassin peut être activé par erreur, parce

qu'il fait sombre et que le colley est confondu avec un chat. Parce qu'il y a un conflit entre le stimulus perçu et le bassin attracteur activé, le traitement de l'information est plus long : le traitement cognitif intervient (flèches rouges). Les neurones libèrent des neuromodulateurs (noradrénaline et dopamine). La dopamine maintient le stimulus actif dans le cortex préfrontal : différents bassins attracteurs sont testés jusqu'à ce que le stimulus soit classé dans celui qui semble le plus cohérent, ici le bassin colley-Acropole-arc-en-ciel, ou qu'un nouveau bassin attracteur soit créé, par exemple colley-crêpuscule-vitesse.

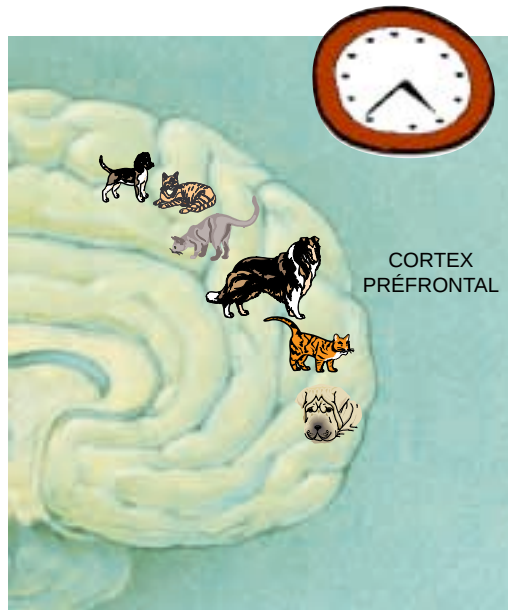
critères : la vitesse et la quantité d'informations qui peuvent être traitées en mode analogique, le temps pendant lequel le mode cognitif peut se maintenir, et les conditions qui contrôlent les oscillations entre le mode analogique et le mode cognitif. Parmi ces trois critères, les deux premiers sont, selon toute vraisemblance, déterminés génétiquement.

Deux critères d'intelligence ?

Même si cette notion peut heurter, l'intelligence a un caractère génétique. Ne pas le reconnaître reviendrait à admettre que les différences entre les aptitudes du singe et celles de l'homme sont d'origine culturelle. Si des différences génétiques existent entre espèces, elles se manifestent aussi au sein d'une même espèce : on sait que certains enfants ont des performances intellectuelles nettement supérieures à la moyenne des enfants du même âge. Le rôle de la génétique dans l'expression de ces performances semble si bien établi qu'une association spécialisée dans la détection de ces « surdoués » assure que la présence d'un de ces enfants dans une famille indique qu'un ou plusieurs des ascendants ont aussi cette caractéristique. Où se situent les différences génétiques de ces enfants surdoués ?

Bien que la quantité d'informations que peut stocker le mode analogique dépende du nombre de neurones, il est peu probable que cela suffise à expliquer la différence des performances. D'ailleurs, le cerveau d'Einstein ne contenait pas plus de neurones que la moyenne ! Le nombre de connexions, qui est évidemment en relation directe avec le nombre de neurones, ne semble pas être non plus une piste intéressante.

En revanche, le temps durant lequel une information reste active (et qu'elle est donc traitée en mode cognitif) et la quantité d'informations que peut traiter le système en mode analogique pendant ce temps semblent déterminants. Ces variables dépendraient notamment des caractéristiques électriques des neurones, c'est-à-dire des propriétés de leurs canaux ioniques, des structures qui commandent le passage des ions d'un côté de la membrane neuronale à l'autre. Les durées d'ou-



3. LA QUANTITÉ D'INFORMATIONS qui peuvent être simultanément activées dans le cortex préfrontal et le temps que peut durer cette activation seraient deux «facteurs d'intelligence».

verture de ces canaux, qui se mesurent en fractions de milliseconde, déterminent la fonctionnalité de l'ensemble. La structure des protéines qui constituent ces canaux ou la membrane qui les entoure déterminerait la quantité de informations traitées et la qualité de leur traitement. Or, la constitution de ces protéines peut varier légèrement d'une personne à l'autre : les protéines ne perdent pas leur fonction, mais d'infimes différences dans leur structure tridimensionnelle peuvent avoir des conséquences quantifiables sur le fonctionnement des canaux ioniques.

Selon cette hypothèse, le troisième «facteur de l'intelligence» repose sur le rythme des oscillations entre le mode analogique et le mode cognitif. Soit un groupe de neurones associé à un bassin attracteur ; quand un stimulus active cet «essaim» de neurones, il déclenche un traitement analogique (rapide). Les neurones qui interviennent sont ceux qui libèrent des neuromédiateurs, notamment le GABA ou le glutamate, lesquels assurent la transformation d'un signal chimique en un signal électrique.

Au contraire, quand le groupe de neurones n'est pas associé à un bassin attracteur ou qu'il active un bassin erroné, un traitement cognitif de l'information se déclenche dans le cortex préfrontal ; les neurones qui réagissent aux stimuli (et à leur contenu affectif) y libèrent des neuromodulateurs. Contrairement aux neuromé-

diateurs, les neuromodulateurs, telles la noradrénaline et la dopamine, «modulent» les signaux électriques. La dopamine assure le maintien du stimulus actif dans le cortex préfrontal, le temps que l'information soit traitée et qu'un bassin attracteur cohérent avec les diverses informations reçues ou déjà mémorisées soit trouvé ou créé ; la noradrénaline fait cesser ce traitement. Quand le maintien de l'information dans le cortex préfrontal a été suffisamment long pour qu'un bassin ait été créé, le stimulus déclenchant est traité sur le mode analogique. Le traitement cognitif a donné lieu à une modification du stock analogique.

Le cortex préfrontal fonctionne «normalement» pour des quantités bien définies de neuromodulateurs ; quand ces quantités sont modifiées, en particulier par l'émotion, le fonctionnement est perturbé. C'est sans doute pour cette raison qu'un peu d'anxiété augmente parfois les facultés cognitives, mais qu'un stress trop fort interdit toute possibilité de concentration.

Si la nature des informations stockées dépend de l'environnement culturel, le traitement cognitif – et, par conséquent, les modifications du stock analogique – dépend beaucoup des conditions affectives et des motivations. Selon ce modèle, on comprend pourquoi des enfants objectivement surdoués sont parfois en échec scolaire : un enseignement inadapté, parce que trop facile, élimine toute motivation.

Entre l'inné et l'acquis, l'intelligence rassemble les extrêmes : bien qu'elle soit déterminée génétiquement, son expression dépend de l'environnement culturel et de la situation affective.

Jean-Pol TASSIN, neurobiologiste au Collège de France, est directeur de recherches à l'INSERM.

J.J. HOPFIELD, *Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities*, in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 79, pp. 2554-2558, 1982.

J.-P. TASSIN, *Ontogenèse du fonctionnement psychique : de l'analogique au cognitif*, in *Le bébé dans tous ses états*, sous la direction de R. Frydman et M. Szegez, Odile Jacob, 1997.

