

protéine a une affinité supérieure pour la protéine Huntingtine anormale que pour la protéine normale. HAP-1 est associée à la membrane de nombreux organites, dont des vésicules engagées dans l'endocytose, qu'elle régule partiellement. Dès lors, HAP-1, liée de façon anormale à la protéine Huntingtine pathogène, ne peut remplir correctement son rôle de régulation de l'endocytose. Le trafic par endocytose et la dégradation des protéines, telle la Huntingtine, seraient perturbés. L'accumulation de protéines non dégradées pourrait être une cause de la neurodégénération. Cette hypothèse semble confortée par le fait que l'on a observé, dans des biopsies de patients atteints de la maladie de Huntington, des vésicules d'endocytose anormales.

Le trafic dans les neurones est, avec l'activité électrique et l'échange de neuromédiateurs, un phénomène dynamique grâce auquel le cerveau se construit. Cette construction va de sa différenciation lors des premières étapes de la vie, à l'acquisition des caractères propres à la personnalité de chacun, puisque c'est le renforcement de certaines connexions synaptiques qui détermine le contenu conscient des expériences subjectives. Nous pensons que l'analyse moléculaire des mécanismes sous-tendant la plasticité neuronale permettra de mieux comprendre comment chaque cerveau crée ses catégories mentales propres, et comment s'y élaborent mémoire et conscience.

Thierry GALLI dirige l'équipe Trafic membranaire et Plasticité neuronale (INSERM U536), à Paris. Fabienne PAUMET effectue ses recherches au Centre de recherches sur le cancer Memorial Sloan-Kettering, à New York.

S. MARTINEZ et al., *Role of Tetanus neurotoxin Insensitive-Vesicle Associated Membrane Protein (TI-VAMP) in Vesicular Transport Mediating Neurite Outgrowth*, in *J. Cell Biol.* vol. 149, pp. 889-899, 2000.

H. CRAIG et al., *Is heterosynaptic modulation essential for stabilizing Hebbian plasticity and memory?* in *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 1, pp. 11-20, 2000.

T. SÜDHOF et C. STEVENS, *Synapses*, The John Hopkins University Press, 2001.

Li YANKUN et al., *Huntingtin-associated Protein 1 interacts with hepatocyte growth factor-regulated Tyrosine Kinase Substrate and functions in endosomal trafficking*, in *Journal of Biological Chemistry*, vol. 277, pp. 28212-28221, 2002.



Nouveautés

Bulles de Sciences traite de questions scientifiques actuelles.

Cette collection originale ouvre le monde des sciences aux jeunes et aux adultes curieux. Ces livres à la fois ambitieux, divertissants et accessibles à un large public constituent la base d'une culture scientifique vivante.



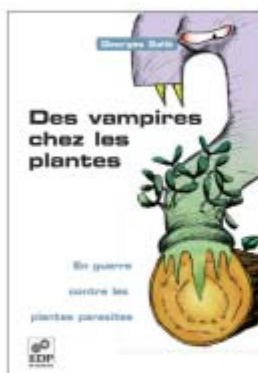
- Préface de Claude Allègre
- 2-86883-610-0
- 192 pages
- 17 €

Combien pèse un nuage ?

Où pourquoi les nuages ne tombent pas

Jean-Pierre Chalon

Les réponses à quelques interrogations de bon sens nous familiarisent avec les bases de la météorologie. Comprendre les nuages, c'est comprendre le temps qu'il fait, mais aussi le climat et le cycle de l'eau.



- Préface d'Aline Raynal-Roques
- 2-86883-574-0
- 240 pages
- 17 €

Des vampires chez les plantes

En guerre contre les plantes parasites

Georges Sallé

Du gui porte-bonheur aux fléaux des cultures, de la Charente-Maritime au Burkina Faso, deux stagiaires découvrent les plantes parasites, leur biologie, leur physiologie, leur écologie et les dégâts qu'elles provoquent.

Synchronisation neuronale et représentations mentales

WOLF SINGER

Dans le cerveau, des ensembles de neurones synchronisent leur activité. Les décharges simultanées de ces assemblées de neurones sont associées à la perception consciente du monde environnant.

Comment le monde mental naît-il du monde matériel? Le cerveau possède quelque 100 milliards de neurones, chacun relié à ses voisins par environ 10 000 connexions. Mathématiquement, la possibilité d'agencement de 10 000 neurones parmi 100 milliards en utilisant 10^{15} connexions est au-delà de tout ce que les machines ou les hommes peuvent concevoir. Ainsi, on peut imaginer que ces agencements de sous-groupes de neurones, ou d'assemblées de neurones, comme nous les nommerons, pourraient coder qui un objet, qui une des situations auxquelles nous sommes confrontés chaque jour. Malheureusement, cette hypothèse ne nous permet pas encore de répondre à la question posée.

Il reste à comprendre comment sont créées ces «assemblées de neurones», de quelle façon elles sont maintenues et comment elles influent les unes sur les autres. Durant ces dernières années, nous avons étudié nombre de processus perceptifs chez des animaux, tout en enregistrant l'activité électrique de leurs neurones. Un point commun semble se dégager de la perception des stimulus visuels, au niveau des assemblées de neurones : les neurones engagés dans la perception d'un objet synchronisent leur activité. Nous allons aborder cette notion de synchronisation des décharges électriques, en insistant sur le fait que la synchronisation des neurones d'une même assemblée et, par conséquent, d'une même image mentale, joue le rôle d'un «code de reconnaissance». Puis nous examinerons à quel point la synchronisation est un code efficace, à la fois pour identifier les neurones appartenant à une même assemblée, pour créer les assemblées et pour leur permettre d'interagir. Enfin, nous verrons que, chez l'homme, cette synchronisation entre territoires distants du cerveau a lieu lorsque l'on se remémore un objet. Tout d'abord, qu'est-ce qu'un objet?

Qu'est-ce qu'un objet ?

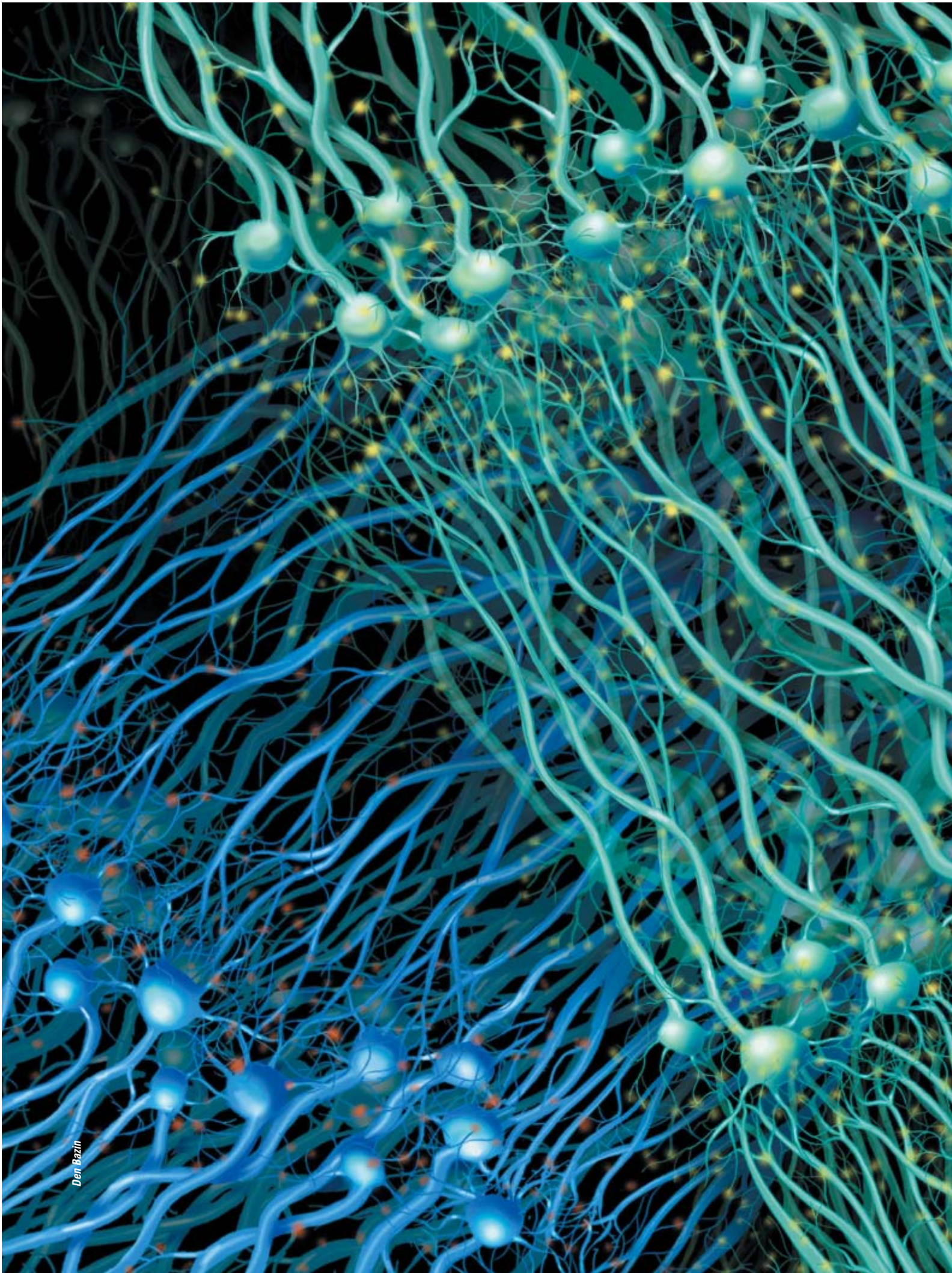
La définition d'un objet est centrale pour qui veut aborder la question de la conscience. Toute conscience est conscience de quelque chose, et il suffit pour s'en convaincre d'essayer de ne penser à rien : aussitôt, d'innombrables images mentales surgissent. Comment l'esprit conçoit-il ces objets? Imaginez-vous dans un salon, au milieu d'un riche environnement constitué d'étagères, de livres, de tables et de

verres remplis de boisson, vous êtes en compagnie de plusieurs personnes qui devisent en buvant du champagne. Sans que vous y prêtiez attention, le système visuel segmente la scène en éléments distincts. Un tel découpage est établi d'après certaines caractéristiques des objets : leur continuité (l'objet «être humain» est défini par regroupement des sous-éléments bras, jambes, tronc et tête), la proximité (un groupe de personnes), la similarité (les verres contiennent du champagne) et la colinéarité (des livres sont placés côte à côte sur l'étagère). Certaines caractéristiques sont moins évidentes : un jeune enfant a tendance à considérer comme une seule entité plusieurs personnes se déplaçant dans la même direction.

Afin d'analyser comment le cerveau crée un même objet par regroupement de plusieurs éléments, nous avons étudié l'activité cérébrale de chats observant des objets lumineux en mouvement. Dans notre expérience, les deux objets sont deux réseaux de lignes parallèles. Les barres du premier réseau sont perpendiculaires à celles du second, et le premier réseau se déplace vers le haut et vers la gauche, tandis que le second se déplace vers le haut et vers la droite. Nous avons enregistré l'activité électrique de neurones du cortex visuel du chat en y implantant des électrodes. Dans cette partie du cerveau, certains neurones sont sensibles au mouvement d'objets vers le haut et vers la gauche, et d'autres sont sensibles au mouvement vers le haut et vers la droite. Au début, le chat voit deux réseaux glissant l'un sur l'autre, mais quand on augmente la luminosité des intersections des lignes, il change de type de perception visuelle : il voit une seule grille à carreaux se déplacer verticalement vers le haut (voir la figure 2).

Ces deux types de perception visuelle correspondent à deux types d'activité neuronale. Quand le chat perçoit les réseaux de façon séparée, glissant l'un sur l'autre, ses neurones sensibles au mouvement vers le haut et vers la gauche sont activés par le premier réseau, tandis que ses

1. DEUX POPULATIONS DE NEURONES synchronisent leur activité. La première population (en vert) est le siège de nombreuses décharges électriques visualisées au niveau des synapses par les taches jaunes. Le second réseau (en bleu) commence à décharger (les taches orange, encore peu nombreuses), et va se synchroniser avec le premier. Dans le cerveau, les populations de neurones synchrones pourraient participer à l'élaboration des images mentales.



neurones sensibles au mouvement vers le haut et vers la droite sont activés par le second. Toutefois, les activités de ces neurones sont indépendantes. En revanche, lorsqu'il perçoit une grille unique se déplaçant verticalement vers le haut, les neurones du premier type et ceux du second type sont également activés, mais les décharges des neurones du premier type et celles des neurones du second type se synchronisent, survenant exactement au même moment. De ce fait, l'activité des deux réseaux de neurones est en quelque sorte soumise à une contrainte supplémentaire, le temps. Cette caractéristique temporelle crée un critère de regroupement des neurones : tous ceux qui déchargent dans un même intervalle de temps font partie de la même assemblée.

La synchronisation des décharges offre plusieurs avantages. Grâce à ce système de reconnaissance, les images mentales peuvent se succéder rapidement. Ce ne serait pas le cas si un autre paramètre de l'activité des neurones, l'intensité des décharges, était utilisé comme code de reconnaissance entre les neurones : il faudrait attendre que les neurones reçoivent tout un spectre de décharges de leurs voisins avant de pouvoir détecter celles qui sont les plus intenses. Un tel processus de détection séquentielle serait long (voir la figure 3). De surcroît, ce mode de fonctionnement poserait des difficultés lorsque des assemblées ont des neurones en commun. Elles devraient attendre d'être activées, l'une après l'autre : si le temps séparant l'activation de deux assemblées était inférieur au temps d'analyse séquentielle des intensités, comment savoir à quelle assemblée appartient un neurone émettant une décharge intense ? De

tels mécanismes aboutiraient à des processus de pensée extrêmement lents.

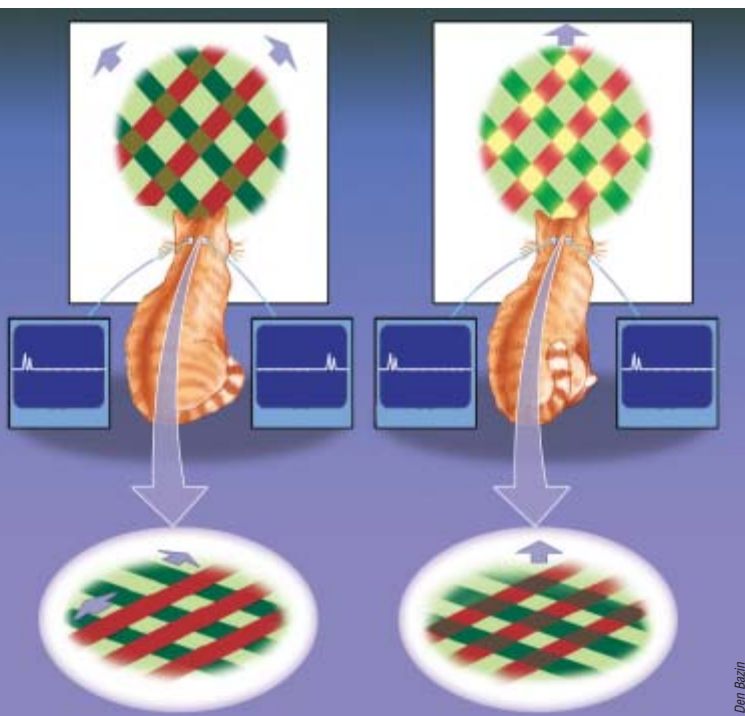
Par ailleurs, l'intensité des décharges varie en fonction de paramètres contingents : certains neurones déchargent plus fort s'ils perçoivent un stimulus qui correspond à leur «sensibilité spécifique». Nous avons vu qu'il existe des neurones, dans le cortex visuel, qui réagissent plus facilement aux mouvements d'un objet de la droite vers la gauche. Si l'on voit passer une voiture de droite à gauche ou de gauche à droite, les cellules du cortex visuel réagissent par des décharges d'amplitudes différentes. Et pourtant, il s'agit toujours d'une voiture en mouvement. Par conséquent, l'intensité des décharges serait un code peu fiable pour la détermination des neurones appartenant à une même représentation mentale. Ceci est confirmé par le fait que, dans notre expérience, lorsque le chat commute d'un type de perception à un autre, on ne note pas de changement notable de l'intensité des décharges neuronales. Dès lors, la synchronisation des neurones est-elle un signe de l'activité consciente du cerveau ?

Voir consciemment, voir inconsciemment

Une expérience légèrement différente de celle des réseaux de barres peut être conduite sur des chats à qui l'on présente deux objets ayant la propriété de se superposer visuellement. On place deux objets devant le chat, par exemple un papillon face à son œil droit et une guêpe face à son œil gauche. Le champ visuel du chat est séparé par un miroir placé dans le prolongement de son museau. S'il regarde le papillon, son œil droit se fixe sur l'insecte et l'œil gauche ne fait que suivre le mouvement, par parallélisme. Or, on fait en sorte que cet œil puisse recevoir l'image d'un autre objet (ici, une guêpe) par réflexion sur le miroir (voir la figure 4). Ainsi, le chat reçoit l'image des deux objets superposés. Il doit choisir sur quel objet il doit fixer son attention. S'il fixe son attention sur le papillon, son œil droit réalise la perception consciente, et l'œil gauche voit la guêpe de façon inconsciente. S'il regarde la guêpe, c'est l'œil gauche qui capte l'attention et l'œil droit voit le papillon de façon inconsciente.

Nous avons mesuré l'activité des neurones du cortex visuel du chat reliés respectivement à l'œil droit et à l'œil gauche. Nous avons observé que, quand le chat fixe son attention sur la guêpe, les neurones correspondant à l'œil gauche synchronisent leurs décharges. Au contraire, quand il utilise l'œil droit, ce sont les neurones opposés qui se synchronisent tandis que les premiers se désynchronisent. On en déduit que l'œil qui convoie l'information traitée de façon consciente active une assemblée de neurones qui se synchronisent, tandis que celui qui voit inconsciemment active une assemblée de neurones non synchronisés.

La synchronisation de l'activité neuronale est liée à la capacité attentionnelle des animaux, et augmente avec le degré d'attention de l'animal. Nous avons entraîné des chats à appuyer sur des leviers avec leur patte quand ils observaient que l'orientation d'un réseau de barres parallèles changeait. On constate que non seulement les neurones visuels, mais aussi les neurones du cortex sensorimoteur engagés dans le mouvement de la patte, se synchronisent au moment de la tâche. Ainsi, la synchronisation se manifeste entre des aires cérébrales distinctes, ici le cortex visuel et le cortex pariétal et frontal. De surcroît, une telle synchronisation commence



2. DEUX SÉRIES DE BARRES PARALLÈLES se déplaçant dans des directions perpendiculaires sont observées par un chat. Le système visuel perçoit, soit deux séries se déplaçant dans des directions différentes (à gauche), soit une seule grille, regroupée en un seul motif se déplaçant dans une direction intermédiaire, vers le haut (à droite). Dans le premier cas, les neurones sensibles à ces composantes du mouvement envoient des décharges indépendantes les unes des autres. Dans le second cas, les mêmes neurones sont sollicités, mais leurs décharges sont synchronisées.

déjà à se manifester lorsque le chat se place devant l'écran et se tient prêt à appuyer sur le levier : il se prépare à la tâche et l'on observe que ses représentations visuelles et motrices de la tâche sont activées à l'avance.

Les atouts de la synchronisation

Le chat entraîné à appuyer sur un levier doit percevoir le stimulus déclenchant, le reconnaître et réagir à cette situation par un acte moteur : abaisser le levier. Imaginons que le fait d'abaisser la patte repose en partie sur l'activation d'une assemblée de quelque 10 000 neurones du cortex moteur qui peuvent stimuler les fibres motrices provoquant la contraction des muscles. La capacité des fibres motrices à provoquer la contraction des muscles dépend en partie de l'intensité de la commande électrique qu'elles reçoivent du cortex moteur. Or, l'impact de cette stimulation électrique augmente si les influx des neurones du cortex moteur sont concentrés dans le temps (un phénomène nommé sommation spatiale). Charles Stevens et Anthony Zador, à l'Institut Salk de Californie, ont ainsi montré que les neurones du cortex sont plus facilement activés s'ils sont excités par plusieurs connexions synaptiques au même moment. Dans notre cas, si les neurones d'une même assemblée du cortex moteur sont synchronisés, cela leur donne beaucoup plus d'impact sur la commande du muscle. Ils peuvent, en établissant des contacts multiples avec les neurones de la moelle épinière responsables du mouvement, déclencher l'activité de ces derniers. Ce raisonnement vaut aussi pour l'impact qu'exerce l'assemblée neuronale percevant l'image dans le cortex visuel sur l'assemblée de neurones du cortex moteur commandant le mouvement. Les connexions reliant deux assemblées de neurones sont multiples et aboutissent généralement à un traitement du signal en parallèle. Chaque neurone de la seconde assemblée reçoit plusieurs dizaines de connexions de neurones de la première, qui délivrent des décharges très concentrées dans le temps. La synchronisation, considérée de ce point de vue, est un moyen pour les neurones de concentrer leurs décharges électriques pour agir plus efficacement sur le mouvement de l'animal.

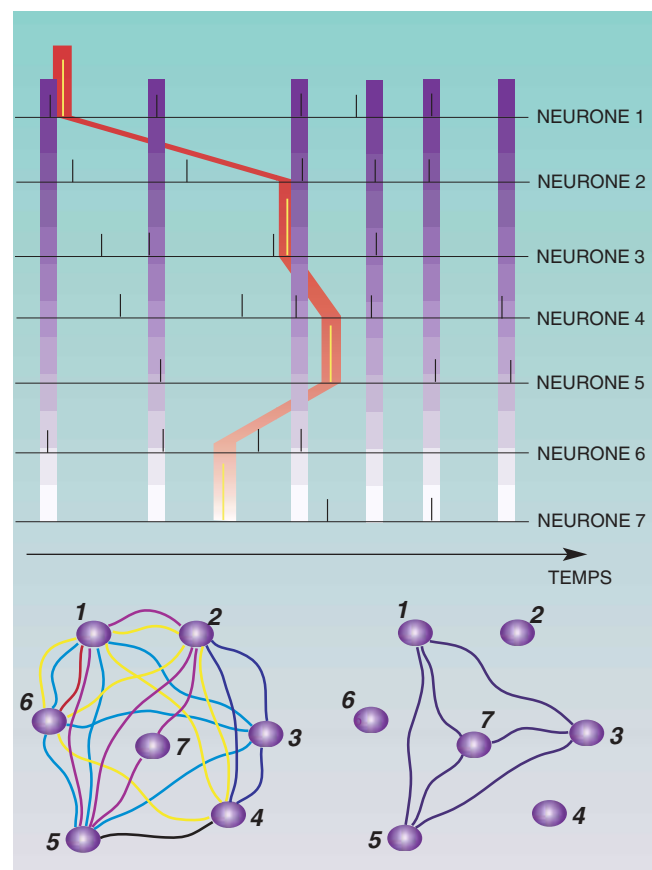
Pourquoi, dans ce cas, la phase de «préparation» de l'expérience, au cours de laquelle la synchronisation existe déjà, ne se traduit-elle pas par un mouvement de la patte? Dans ce cas, la synchronisation est infraliminale : les neurones du cortex visuel présentent une activité spontanée sous la forme d'oscillations faibles, insuffisantes pour donner naissance à une onde de dépolarisation, correspondant à une vraie «décharge». Tant que le chat ne se concentre pas, les neurones réagissent de façon «étalée» à l'application d'un stimulus : le stimulus est insuffisant pour faire décharger ceux dont l'activité est faible, tandis qu'il suffit à faire décharger ceux dont l'activité est déjà élevée. Dans le cortex, certains neurones déchargent alors immédiatement, d'autres dix millisecondes plus tard, d'autres encore 20, 30 ou 40 millisecondes plus tard : ils ne sont pas synchronisés, de sorte que le chat ne bouge pas sa patte.

Au contraire, si les courbes de fluctuation des neurones sont déjà présynchronisées avant que le stimulus arrive, tous les neurones se trouvent dans la même zone de leur courbe de fluctuation. S'ils sont dans la partie basse, aucun ne décharge et s'ils sont dans la partie haute, ils déchargent tous en même temps. Dans tous les cas, le

moment de la décharge est unique et précis. La présynchronisation observée durant la phase préparatoire devient un moyen d'assurer la synchronisation des décharges des assemblées et, par conséquent, l'impact de la transmission électrique entre ces assemblées.

Capacité d'attention et mémorisation

Par ailleurs, l'impact des neurones synchronisés sur les autres neurones permet de mieux comprendre la différence, chez le chat, entre capacité d'attention et perception inconsciente. Chez l'animal percevant deux objets de chaque côté de son champ visuel, l'attention est reportée entièrement sur un œil, tandis que l'autre se laisse piloter de façon passive. Les neurones reliés à l'œil dominant sont synchronisés, et peuvent de ce fait influencer sur l'activité électrique d'assemblées de neurones situées dans d'autres aires corticales, notamment l'aire motrice qui commande les mouvements



3. DEUX CODAGES sont possibles pour créer des assemblées de neurones, dont l'activité électrique est représentée par les axes horizontaux (on a représenté sept neurones). Les décharges sont symbolisées par les traits verticaux (en noir et jaune). Le codage temporel consiste à former des assemblées en regroupant les décharges qui surviennent au même instant (les bandes verticales violettes). Six assemblées ont ainsi été formées selon les combinaisons suivantes : la bande 1 : neurones 1 et 6 ; la bande 2 : neurones 1, 3, 5, 6 ; la bande 3 : neurones 1, 2, 4, 6 ; la bande 4 : neurones 2, 3, 4 ; la bande 5 : neurones 1, 2, 5, 7 ; la bande 6 : neurones 4 et 5. Selon le codage d'intensité, les neurones caractérisés par une intensité de décharge supérieure sont regroupés dans une même assemblée (bande rouge). Dans cet exemple, une seule assemblée a été créée, car la comparaison des intensités requiert plus de temps que le codage temporel : il faut attendre que les neurones déchargent plusieurs fois pour que les intensités soient comparées et que les plus fortes soient identifiées. En bas, on a schématisé les réseaux de neurones obtenus par codage temporel (à gauche) et par codage d'intensité (à droite).

de l'œil. Par cette boucle de rétroaction, l'œil qui perçoit l'objet consciemment peut bouger et rester en contact avec le stimulus. Ainsi, la synchronisation apparaît comme la marque des neurones qui, temporairement, ont un impact sur les mouvements d'un animal, autant que sur ses états perceptifs.

La synchronisation est le ciment des assemblées de neurones, qui leur procure leur unité et leur pouvoir d'action. Peut-elle expliquer comment les assemblées se forment chez le jeune animal? Prenons l'exemple de l'apprentissage de la parole : un jeune enfant apprend le sens du mot «rouge» en associant la stimulation auditive produite par le mot et la stimulation visuelle déclenchée par la couleur. Dans son cerveau, une assemblée de neurones est activée par la perception auditive, et l'autre par la perception visuelle. Pour donner son sens au mot, il faut réunir les deux assemblées et les maintenir associées. Avançons d'un pas dans le détail de ce mécanisme. Considérons deux neurones appartenant à chacune des assemblées, et reliés l'un à l'autre par des points de contact, les synapses, où ils peuvent se transmettre l'information électrique. Avant que le mot et la couleur n'aient été associés, l'information électrique a une faible probabilité de passer d'un neurone à l'autre. Cette probabilité est équivalente à celle qui relie deux neurones quelconques dans le cerveau. Pour créer un lien entre les

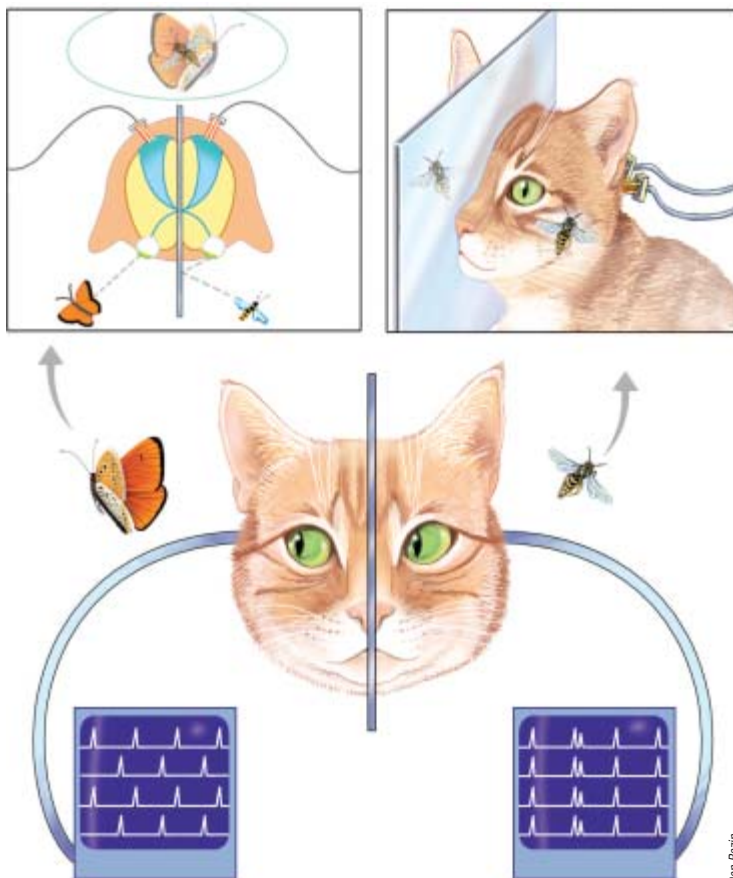
deux représentations, il faut donc augmenter cette probabilité, améliorer en quelque sorte l'efficacité de la jonction synaptique. Des expériences multiples ont été réalisées afin de mesurer la probabilité de transmission de l'information entre deux neurones selon que leurs activités sont synchronisées ou non. Ces expériences ont établi que la qualité de la transmission de l'information d'un neurone à l'autre augmente lorsque ces derniers sont activés dans un intervalle de temps de quelques millisecondes, c'est-à-dire quand ils sont synchronisés. La synchronisation neuronale contribue à nouer des liens privilégiés entre neurones et à édifier les assemblées. Elle joue trois rôles essentiels : elle assure la création des assemblées de neurones, elle favorise la reconnaissance des neurones au sein d'une même assemblée et elle augmente le pouvoir d'action des neurones sur le fonctionnement d'autres assemblées, et celles qui commandent les mouvements de l'animal. Parmi les neurones ayant la capacité de se synchroniser, ceux du cortex ont une capacité d'autoorganisation qui s'adapte aux contraintes liées à la perception. Examinons comment.

Un mécanisme «horizontal»

Il y a une dizaine d'années, nous avons tenté de répondre à une question fondamentale : existe-t-il, au cœur du cerveau, sous les zones corticales, un «chef d'orchestre», qui assurerait la synchronisation des neurones corticaux? Ou bien les neurones corticaux parviennent-ils à se synchroniser spontanément? Afin de trancher entre ces deux hypothèses, nous avons sectionné chez des chats le corps calleux qui assure le passage des informations entre les deux hémisphères du cortex. Le reste du cerveau, notamment toutes les structures sous-corticales, est intact. Nous avons observé que, sans corps calleux, les réponses des neurones ne parviennent plus à se synchroniser. Ceci apporte la réponse à notre question : si un centre «chef d'orchestre» avait été présent au niveau sous-cortical, il aurait continué à envoyer ses instructions à chaque hémisphère. Le fait que la synchronisation ait disparu indique une interaction des neurones à l'intérieur même du cortex, dans une relation réciproque. Les populations de neurones synchrones n'ont pas besoin de chef d'orchestre ; ils trouvent d'eux-mêmes la pulsation, comme des interprètes de musique de chambre qui s'observent pour rester en mesure.

On ignore encore comment les neurones «s'observent». Toutefois, on a réussi à simuler le comportement de neurones à l'aide d'oscillateurs harmoniques électroniques reproduisant leurs propriétés de décharge. Peter König, dans notre équipe, a ainsi démontré que si l'on programme des neurones artificiels pour qu'ils exercent l'un sur l'autre une influence de type inhibiteur (où chaque neurone diminue l'activité électrique de son partenaire quand ce dernier lui envoie un signal électrique trop intense), ceux-ci peuvent synchroniser leurs fluctuations à condition que le temps de conduction du signal entre les deux neurones n'excède pas le tiers de la période des oscillations. Dans le cas des chats que nous avons étudiés, le temps de conduction entre les deux hémisphères où étaient implantées les électrodes, est de l'ordre de 5 millisecondes et la période des oscillations est de 25 millisecondes.

Les liens horizontaux entre neurones du cortex permettent de comprendre comment les assemblées de neurones prennent forme chez un jeune animal à mesure



4. UN CHAT OBSERVE DEUX INSECTES séparés par un miroir, pendant que l'on enregistre l'activité électrique de son cortex visuel. S'il regarde le papillon de son œil droit (*cartouche en haut à gauche*), l'œil gauche suit ce mouvement. Il reçoit alors par réflexion l'image de la guêpe. Le chat voit alors un papillon superposé à une guêpe (*en haut*). Pour résoudre ce conflit, il doit choisir quel insecte voir consciemment : s'il voit consciemment le papillon, les neurones reliés à l'œil droit se synchronisent (*enregistrement en bas à droite*), tandis que ceux liés à l'œil gauche se désynchronisent (*enregistrement en bas à gauche*).

qu'il accumule les expériences perceptuelles. Comme nous l'avons indiqué, l'activité synchrone de plusieurs neurones tend à renforcer leurs connexions synaptiques, c'est-à-dire à augmenter la facilité avec laquelle ils échangent des informations. Chez un petit chaton, les neurones du cortex visuel présentent dès la naissance des schémas d'organisation préférentiels : certaines connexions sont naturellement plus fortes que d'autres, elles forment un schéma préétabli, prêt à recevoir l'impact des stimulus extérieurs. Certains neurones ont ainsi une tendance plus affirmée à se synchroniser, et forment en quelque sorte des «images mentales précurseurs». Sur le terrain de ces circuits innés, l'organisation plus fine des assemblées peut avoir lieu ; à un instant donné, des sous-groupes de neurones émettent spontanément des décharges synchrones, et la présentation d'un stimulus chez le jeune animal fixe en quelque sorte les neurones déchargeant à ce moment-là, engendrant la consolidation des synapses existantes, consolidation qui facilite la synchronisation des neurones concernés.

Un fonctionnement en parallèle

Ainsi, l'auto-organisation semble être la règle dans les schémas de connexion «horizontaux» du cortex. Dès lors, si la synchronisation neuronale est un mécanisme horizontal se déroulant à l'intérieur même du cortex, l'activation d'une image consciente résulterait des décharges synchrones de centaines ou de milliers de neurones occupant parfois des positions éloignées dans les couches superficielles du cerveau. Certaines aires, les aires associatives, ont peut-être la propriété de synchroniser l'activité de plusieurs assemblées distinctes, réunissant ainsi les divers attributs d'un même objet, comme la vision d'un stylo rouge réunit les caractéristiques de la forme et de la couleur du stylo. Comment les assemblées se créent-elles chez l'individu en relation étroite avec l'objet qu'elles représentent? Peuvent-elles être activées en l'absence de leur objet?

Chacun peut penser à une scène de film ou à un quelconque objet de la vie quotidienne, à un visage, sans qu'aucun ne soit présent. La faculté de représentation abstraite est une des caractéristiques de la conscience : fait-elle également appel à des décharges synchrones de populations de neurones? Cette question est plus difficile à aborder que les précédentes, car l'analyse des images mentales «remémorées» ne peut être pratiquée que chez l'homme, chez qui on ne peut, bien évidemment, pas utiliser d'électrodes. Il faut recourir à des techniques d'imagerie cérébrale transcrânienne. À l'unité INSERM U280 de Lyon, Catherine Tallon-Baudry, puis Francisco Varela, à l'Hôpital de la Pitié-Salpêtrière, ont utilisé la technique dite d'électroencéphalographie pour visualiser les aires du cerveau de personnes se remémorant des objets aperçus peu de temps auparavant. Diverses aires visuelles, distantes de plusieurs centimètres, synchronisent leurs oscillations au moment où l'image mentale est «visualisée». Ainsi, la synchronisation sous-tendrait, non seulement la perception, mais aussi la représentation interne des objets. Une telle propriété de répétition silencieuse des images conscientes en l'absence du stimulus qui leur a donné naissance serait le support du pouvoir d'abstraction. D'autres expériences ont également montré que la synchronisation des neurones intervient dès qu'on se concentre.

Ces observations réalisées sur l'être humain confirment le rôle que joue le cortex dans la genèse des images conscientes, en synchronisant ses neurones. Bien sûr, l'observation par électroencéphalographie et magnétoencéphalographie met en lumière des zones d'activité dont le volume peut contenir des milliers de représentations distinctes, sous-réseaux de neurones tellement enchevêtrés qu'il faudrait pouvoir introduire de très fines électrodes dans le cerveau pour savoir quelle assemblée précise est active dans telle ou telle tâche cognitive. C'est donc en poursuivant les études d'imagerie cérébrale chez l'homme et de mesure des courants électriques de neurones individuels chez l'animal, que l'on verra peut-être se dessiner un parallèle précis entre états de conscience et assemblées de neurones.

Confrontation intérieure

La conscience semble réunir deux types d'opérations. La construction d'images mentales, c'est-à-dire de représentations internes des objets extérieurs, et l'activation de ces représentations, même en l'absence du stimulus qui leur a donné naissance. Grâce à ces deux aspects, le cerveau réalise une confrontation des représentations internes avec les signaux bruts représentés par les stimulus. Cette confrontation pourrait être un moteur de la prise de décision. Les situations réelles, confrontées aux images mentales déjà construites de situations antérieures plus ou moins comparables, donnent lieu à un traitement complexe. Certaines structures cérébrales joueraient le rôle de «modérateur» et feraient correspondre plus ou moins étroitement l'image réelle et l'image cérébrale. De telles aires sont apparues à un stade relativement récent de l'évolution des mammifères. Apparues au cours de l'évolution dans la lignée des primates, elles auraient contribué à l'augmentation de la surface du cortex qui confère au cerveau humain son aspect replié caractéristique. Bien qu'éloignées des aires de perception primaires, elles joueraient le rôle d'un miroir, renvoyant aux aires primaires de la perception les images qu'elles ont conservées du passé. Ces interactions d'une aire à l'autre, autorisées par la synchronisation des neurones, auraient lieu soit par l'intermédiaire de zones plus profondes du cerveau, tel le thalamus, soit par le truchement de connexions internes au cortex. Peut-être est-ce dans ce jeu de miroirs que se noue la conscience.

Wolf SINGER dirige l'Institut Max-Planck de recherche sur le cerveau, à Francfort.

P. ROELFSEMA *et al.*, *Visuomotor integration is associated with zero time-lag synchronization among cortical areas*, in *Nature*, vol. 385, pp. 157-161, janvier 1997.

W. SINGER, *Neuronal Synchrony : A Versatile Code for the Definition of Relations*, in *Neuron*, vol. 25, pp. 49-65, septembre 1999.

K. ENGEL et W. SINGER, *Temporal binding and the neural correlates of sensory awareness*, in *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 5, pp. 16-25, janvier 2001.

F. VARELA *et al.*, *The brainweb: phase synchronization and large-scale integration*, in *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 2, pp. 229-39, avril 2001.

C. TALLON-BAUDRY *et al.*, *Oscillatory synchrony between human extrastriate areas during visual short-term memory maintenance*, in *Journal of Neuroscience*, vol. 21, R.C. 177, octobre 2001.

Les cheminement de la conscience chez l'enfant

OLIVIER HOUDÉ

À l'école, l'enfant apprend surtout à activer des compétences et pas assez à inhiber certains automatismes, c'est-à-dire à se mettre dans des situations d'introspection où, conscient des différentes stratégies, il opère un choix adapté.

La conscience est un trait biologique du cerveau humain et de certains cerveaux animaux. Elle figure parmi les mystères les plus profonds dont la science, notamment la psychologie cognitive, cherche la clé. L'une des façons d'élucider ce mystère est d'aborder la question de la conscience par les mécanismes de son ontogenèse, c'est-à-dire par l'étude expérimentale de sa naissance chez le bébé et de son développement de l'enfant à l'adulte.

Cette question a été classiquement envisagée à propos de la conscience de soi. Le psychologue américain Gordon Gallup a mis au point, dans les années 1960, le «test de la tache» : on observe les réactions de l'enfant placé devant un miroir après que son front a été marqué, à son insu, d'une tache de couleur rouge. L'enfant réussit ce test, c'est-à-dire qu'il porte la main immédiatement sur son front à l'endroit de la tache, vers l'âge de un an et demi seulement. Ce comportement indique qu'il a bien compris que c'est lui qui apparaît dans le miroir ; l'enfant plus jeune essaye d'effacer la tache directement sur le miroir. Chez les autres animaux, seuls les grands singes (chimpanzés, gorilles, orangs-outans) réussissent ce test. On est donc ici en présence d'un indicateur de la naissance de la conscience de soi au cours de l'évolution.

Le rapport à l'image de soi n'est qu'une façon d'aborder la question de la conscience. D'autres psychologues, tel Jean Piaget (1896-1980), de l'Université de Genève, se sont intéressés à une forme plus subtile de conscience que l'enfant développe à propos de ses propres actions et de ses opérations mentales : dénombrer, classer, raisonner, etc. Il a nommé cette forme de conscience «l'abstraction réfléchissante», d'abord au sens du miroir, mais, cette fois, du miroir interne, mental, qui reflète dans l'esprit de l'enfant les actions qu'il réalise et les opérations qu'il imagine ; ensuite au sens du passage à un stade supérieur de réflexion, de raisonnement.

Les philosophes qualifient ce type de conscience d'introspective ou de réflexive, par opposition à la conscience phénoménale qui, elle, traite directement des phénomènes perceptifs (par exemple, on a conscience qu'une balle est ronde, que le ciel est bleu, etc.). Selon Piaget, l'enfant prend peu à peu conscience des propriétés logiques et mathématiques de ses actions (réelles) et des opérations (imaginées). Il passe d'une conscience seulement perceptive à la conscience réflexive, de plus en plus évoluée. D'après ses travaux d'exploration du cerveau, le neurobiologiste Jean-Pierre

Changeux, du Collège de France, a décrit l'existence d'un «espace de travail neuronal conscient» dans le cerveau de l'enfant et de l'adulte, où opère cette conscience réflexive, qui comprend les actions d'organiser et de planifier, de raisonner, de résoudre des problèmes à l'aide d'un effort d'introspection et qui requiert une certaine attention.

Objet, nombre, catégorisation et raisonnement

Dans le développement cognitif de l'enfant, la conscience réflexive s'applique d'abord à l'objet, plus précisément, à la permanence de l'objet. Il est évident pour vous et moi qu'un objet continue d'exister lorsqu'il échappe à notre perception immédiate. En revanche, pour le jeune bébé qui n'est pas encore doté d'une conscience réflexive de l'objet, que celui-ci soit physique (une balle) ou humain, l'objet n'existe plus quand il disparaît de sa vue.

Le bébé atteint la première étape de conscience réflexive lorsqu'il considère l'objet, unité de base du réel, construit dans sa permanence. Il commence alors à décomposer le monde en objets permanents, et il devient capable de traiter plusieurs objets soit quantitativement (il acquiert la notion de nombre, fondement de l'édifice mathématique), soit qualitativement (il entame la catégorisation, base des taxonomies). Lorsque ces traitements ne portent plus seulement sur des objets concrets – comme c'est souvent le cas chez l'enfant – mais aussi sur des idées, des hypothèses, l'enfant ou l'adolescent accède aux étapes ultimes de la conscience réflexive, celles du raisonnement formel, logique. L'objet, le nombre, la catégorisation et le raisonnement sont les piliers du développement cognitif de l'enfant ; notre conscience réflexive d'adulte se façonne progressivement à travers ces éléments. En voici deux exemples, l'un concernant le nombre chez le bébé et chez l'enfant, l'autre le raisonnement chez l'adolescent et chez le jeune adulte.

Selon Piaget, la conscience réflexive du nombre n'apparaît que vers sept ou huit ans. À cet âge, l'enfant parvient à réussir son test des jetons, dit de conservation du nombre. Ce test a fait le tour du monde : on place l'enfant devant deux rangées de jetons qui contiennent le même nombre de pions, mais qui ont une longueur différente (on écarte les jetons de l'une des rangées). La plupart des enfants d'école maternelle se trompent et considèrent qu'il y a plus de jetons là où c'est plus long ! Selon Piaget, après être longtemps resté