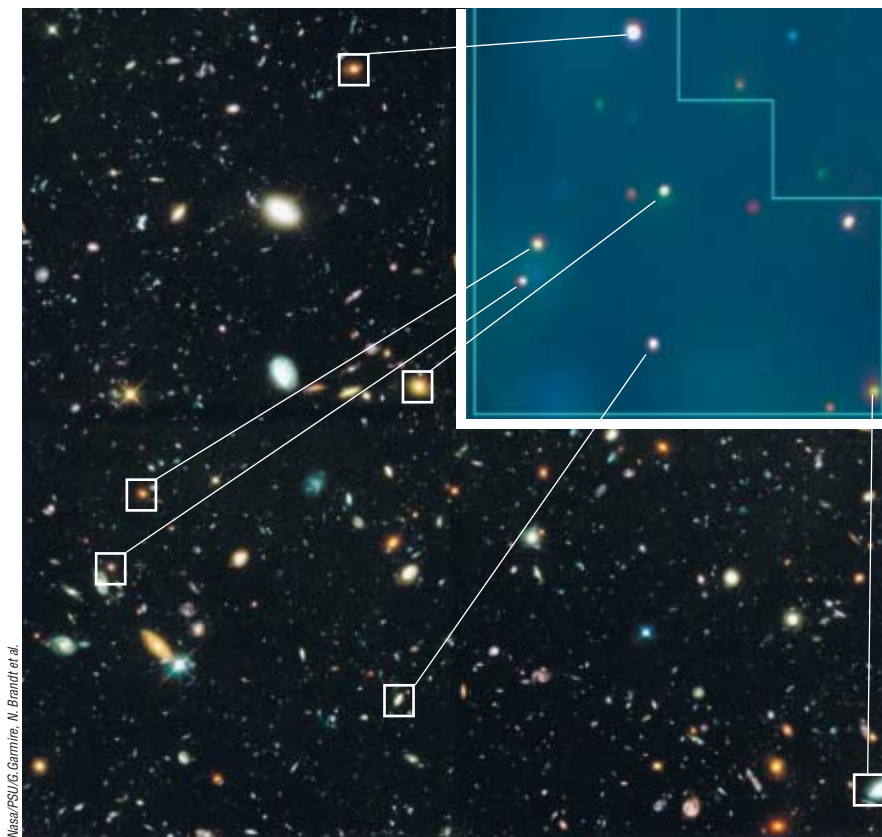




NASA/PSU/G. Garmire, M. Brandt et al.

6. DES GALAXIES DISTANTES dont on sait maintenant qu'elles sont pleines de poussière interstellaire apparaissent sur cette image connue sous le nom de **champ profond de Hubble**. Sur l'image de la même région réalisée par le satellite **Chandra** sensible aux rayons X (**dans le cartouche**) apparaissent des sources très brillantes – probablement des trous noirs supermassifs – auxquelles on peut associer des galaxies apparaissant sur l'image reprise dans le domaine visible.

d'entre nous (G. Hasinger) a utilisé le télescope spatial sensible aux rayons X, *XMM-Newton*, et le satellite sensible à l'infrarouge *ISO*, pour estimer que les noyaux actifs contribuent à environ 15 pour cent du fond infrarouge.

Elise Archibald et ses collègues du Centre d'astronomie de Hilo, à Hawaï, ont expliqué ces découvertes par une séquence naturelle de formation galactique. Selon leur scénario, chaque galaxie se forme autour d'un petit trou noir d'environ 1 à 1 000 masses solaires qui lui sert de graine. À ce moment, le flux de la galaxie est essentiellement dû à la lumière stellaire. Par la suite, le trou noir croît rapidement en avalant de la matière. Après environ 500 millions d'années, le trou atteint un milliard de masses solaires et devient si brillant qu'il masque l'éclat des étoiles : un quasar est né. Après une période d'intense activité, ce quasar ayant aspiré le combustible disponible s'endort jusqu'à ce que, à la faveur d'une rencontre rapprochée, une autre galaxie lui fournisse du gaz qui tombera à nouveau vers le centre, où que les deux

trous noirs galactiques fusionnent. Simultanément, ces événements déclenchent d'intenses flambées de natalité stellaire qui enrichissent l'ensemble en poussière et se signalent par une émission infrarouge intense.

Certaines pièces manquent encore à ce puzzle. Aurions-nous, par exemple, oublié, dans notre recensement, des galaxies trop diluées et trop étendues pour que nos instruments les détectent ? Par ailleurs, nous ne savons pas expliquer le fond diffus gamma. Nous ne connaissons principalement qu'un type de source susceptible de le produire : les blazars. Ce sont des noyaux actifs de galaxies, plus gros et plus turbulents encore que ceux qui contribuent au fond diffus X. Toutefois, les synthèses de population que l'on réalise à partir de ce que nous savons des blazars ne rendent pas compte de tout le flux gamma du fond diffus. De nouveaux relevés, plus complets, seront nécessaires. Des instruments dans les domaines infrarouge, radio et X, devraient bientôt voir le jour, qui nous aideront dans cette tâche.

La clarté nocturne

Il n'y a pas si longtemps, les astronomes se demandaient pourquoi le ciel nocturne est noir. En effet, dans un univers infini empli d'étoiles, toute direction prise au hasard devrait, à un moment ou un autre, rencontrer une étoile. Certes, plus cette étoile est lointaine et plus son éclat nous paraît faible. Toutefois, cet effet est exactement compensé par le fait que, si les étoiles sont réparties de façon assez uniforme dans l'Univers, le nombre d'étoiles vues croît comme le carré de la distance à laquelle on regarde. De ce fait, le ciel devrait être aussi lumineux que la surface du Soleil. En 1848, ce mystère, connu sous le nom de paradoxe d'Olber, fut résolu par... Edgar Allan Poe ! Dans un poème en prose intitulé *Eurêka*, il suggéra que la noirceur de la nuit prouve que l'Univers n'a pas toujours existé et que les étoiles n'ont pas eu le temps de l'emplir de leur lumière. Cette hypothèse a résisté à l'épreuve du temps et elle est considérée, désormais, comme une des grandes observations cosmologiques sur lesquelles repose la théorie du Big Bang. Toutefois, nous savons aujourd'hui que le ciel nocturne est imprégné d'un faible fond diffus constitué de toutes les longueurs d'onde. Grâce, en partie, à la théorie du Big Bang et au modèle standard de la cosmologie, nous avons fait beaucoup de progrès dans l'explication de ce fond diffus... mais il est amusant de penser que, tandis que les penseurs du XIX^e siècle ont expliqué pourquoi la nuit n'est pas d'une clarté aveuglante, nous devons, quant à nous, comprendre pourquoi elle n'est pas totalement noire.

Günther HASINGER est astronome à l'Institut Max Planck de Garching, en Allemagne. Roberto GILLI est astrophysicien à l'Observatoire de Florence, en Italie.

G. HASINGER, R. BURG, R. GIACCONI, M. SCHMIDT, J. TRÜMPER et G. ZAMORANI, *The ROSAT Deep Survey I : X-ray Sources in the Lockman Field*, in *Astronomy and Astrophysics*, vol. 329, n° 2, pp. 482-494, janvier 1998.

R. GILLI, M. SALVATI et G. HASINGER, *Testing Current Synthesis Models of the X-ray Background*, in *Astronomy and Astrophysics*, vol. 366, n° 2, pp. 407-417, février 2001.

G. LAGACHE et B. GUIDERDONI, *La face cachée des galaxies*, in *Pour la Science*, n° 296, pp. 52-59, juin 2002.

La correction des erreurs de raisonnement

OLIVIER HOUDÉ • SYLVAIN MOUTIER • LAURE ZAGO • NATHALIE TZOURIO-MAZOYER

Pour la première fois, on a mis en évidence que les erreurs de raisonnement ont un support cérébral : l'activation des «mauvaises» aires cérébrales entraîne des erreurs. Quand on apprend à inhiber ces activations perturbatrices, la déduction logique se met en place.

Depuis Aristote, on sait que l'essence du raisonnement humain est le *logos*, c'est-à-dire à la fois la raison (logique) et le langage. Toutefois, au XVII^e siècle, René Descartes nous a aussi montré, dans sa *Méthode*, que l'homme doit apprendre à rediriger son esprit, des erreurs de raisonnement vers la pensée logique.

Selon Jean Piaget (1896-1980), psychologue de l'enfant à l'Université de Genève, c'est à l'adolescence, vers 14-15 ans, que se met en place la pensée logique ou formelle, dite hypothético-déductive. Piaget s'est attaché à montrer que la logique est la forme optimale de l'adaptation biologique, construite par étapes successives, du cerveau du bébé à celui de l'adolescent, c'est-à-dire des adaptations sensorielles et motrices élémentaires aux adaptations cognitives, d'abord concrètes, puis formelles. La clé du développement et du fonctionnement cognitifs est alors la coordination logique des informations. Si Piaget, biologiste de formation, mais psychologue de profession, envisageait bien une réalité cérébrale correspondant au stade des opérations formelles, il lui manquait les méthodes d'imagerie cérébrale pour l'observer. Il s'est donc limité à l'étude expérimentale des mécanismes psychologiques des opérations logiques.

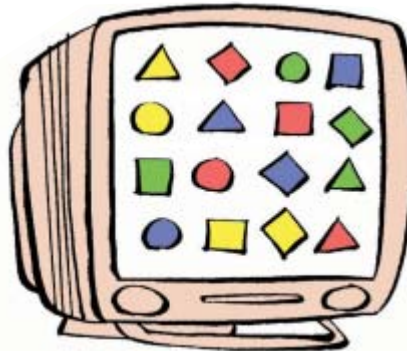
Contrairement à cette théorie, la psychologie cognitive du raisonnement a démontré durant les années 1960-1980 que, dans certaines situations, les adolescents et les adultes – logiques selon Piaget – font systématiquement des erreurs de déduction, nommées biais de raisonnement, ce qu'avait pressenti Descartes. Dès lors, un enjeu important des neurosciences cognitives, de la psychologie du développement et des sciences de l'éducation est l'étude des bases cérébrales des erreurs ou des biais de raisonnement, et celle des mécanismes qui permettent de redi-

ger l'esprit vers la pensée logique. Pour ce type d'étude, on utilise la procédure de l'apprentissage expérimental – une sorte de «pédagogie de laboratoire», qui modifie la capacité à réaliser une tâche sous l'effet d'une interaction contrôlée avec l'environnement.

Du cerveau perceptif au cerveau logique

C'est ce que nous avons entrepris dans des expériences d'imagerie cérébrale fonctionnelle utilisant la technique de la tomographie par émission de positons, laquelle donne accès à l'activité cérébrale. Ces études ont été réalisées dans le Groupe d'imagerie neurofonctionnelle dirigé par Bernard Mazoyer. On demande, par exemple, aux participants de lire, sur un écran d'ordinateur, une règle déductive du type : «S'il y a un carré rouge à gauche, alors il y a un cercle jaune à droite», puis de sélectionner avec la souris de l'ordinateur deux formes parmi diverses figures affichées (des formes géométriques simples de couleurs variées), celles qui rendent la règle vraie : la totalité des personnes placent un carré rouge à gauche et un cercle jaune à droite. On peut aussi introduire une négation dans le conséquent (la deuxième proposition) : «S'il y a un losange bleu à gauche, alors il n'y a pas de carré vert à droite.» Dans ce cas aussi, tous les participants réussissent (voir la figure 2).

Rien d'étonnant. En revanche, on est davantage surpris par le résultat d'un autre test. La nouvelle règle déductive est : «S'il n'y a pas de carré rouge à gauche, alors il y a un cercle jaune à droite», et l'on doit sélectionner avec la souris deux formes géométriques qui rendent la règle fausse. Les psychologues et les logiciens nomment ce type de test une tâche de réfutation de règles conditionnelles.



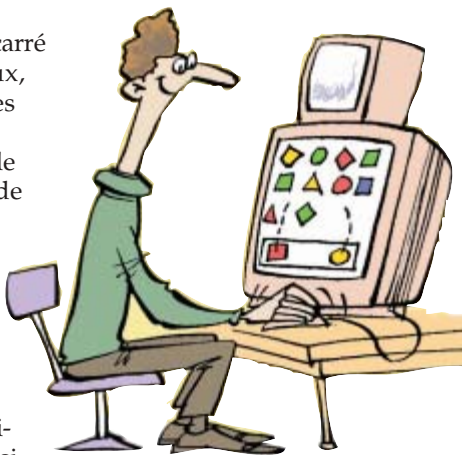
1. LES DIFFÉRENTES EXPÉRIENCES réalisées sur des volontaires par les auteurs utilisent un ordinateur. On doit sélectionner les formes et les couleurs qui répondent à des «règles déductives».

Quelles formes auriez-vous sélectionnées? Un carré rouge à gauche d'un cercle jaune? C'est faux, mais rassurez-vous, plus de 90 pour cent des personnes testées se trompent!

C'est une erreur de logique nommée par le psychologue Jonathan Evans, de l'Université de Plymouth, biais d'appariement perceptif. Pourtant, il s'agit d'un problème élémentaire de déduction. En fait, l'adulte se laisse piéger par la perception des éléments cités dans la règle, ici le carré rouge et le cercle jaune, en oubliant, d'une part, que la première proposition, l'antécédent, est une négation et, d'autre part, que l'on veut rendre la règle fausse. S'il raisonnait selon la table de vérité logique, il choisirait une situation où l'antécédent de la règle est vrai (pas un carré rouge) et le conséquent faux (pas un cercle jaune) : il proposerait, par exemple, un carré vert à gauche d'un losange bleu. Dans ce cas, la réponse logique consiste à aller contre la perception des éléments cités dans la règle, c'est-à-dire contre l'appariement perceptif.

Face à un tel taux d'échec dans une tâche qui ne semble *a priori* pas compliquée, on s'interroge sur les mécanismes aboutissant à ce type d'erreurs de raisonnement. Pour aborder cette question, nous avons postulé que la difficulté pour l'adulte tient ici à ce que deux stratégies de raisonnement entrent en compétition, se télescopant dans «l'espace mental de travail». Nous pensions – et nous verrons comment nous l'avons montré – que l'une des stratégies est «perceptive» et l'autre «logique»; les erreurs surviennent quand on ne parvient pas à inhiber la stratégie perceptive – sans qu'il s'agisse pour autant d'un problème de logique.

Pour le montrer, nous avons d'abord testé par des études de psychologie expérimentale l'efficacité de différentes conditions d'apprentissage (voir l'encadré pages 50 et 51) :



2. LORS DES TESTS HYPOTHÉTIQUE-DÉDUCTIFS, on demande aux volontaires de déplacer des formes colorées présentées sur un écran d'ordinateur pour répondre à des règles déductives du type : «S'il y a un carré rouge à gauche, alors il y a un cercle jaune à droite (*en haut*) ou «S'il y a un losange bleu à gauche, alors il n'y a pas de carré vert à droite (*en bas*)». La totalité des personnes testées réussit ces deux problèmes.



Tous les dessins sont de Jean-Michel Thiriet

3. POUR RÉSOUDRE ce test déductif, on doit rendre fausse la règle : «S'il n'y a pas de carré rouge à gauche, alors il y a un cercle jaune à droite.» Ici, le personnage s'est trompé, mais il est dans la norme, puisque 90 pour cent des personnes testées proposent comme réponse : un carré rouge à gauche d'un cercle jaune. C'est une

erreur d'appariement perceptif. Pour rendre la règle fausse, il faut rendre l'antécédent vrai, c'est-à-dire ne pas mettre de carré rouge à gauche (on met, par exemple, un carré vert) et rendre la conclusion fausse, c'est-à-dire ne pas mettre un cercle jaune à droite (on place, par exemple, un losange bleu à droite).

l'inhibition de la stratégie perceptive, l'explication logique et la simple répétition de la tâche.

Lors de l'inhibition de la stratégie perceptive, on tente d'inhiber les appariements perceptifs impulsifs en prévenant le participant des pièges de raisonnement qui lui sont tendus. On le met en garde afin qu'il ne se laisse pas abuser par les formes ni par les couleurs, mais qu'il porte toute son attention sur la consigne logique. On constate que seul cet apprentissage est efficace : le taux de réussite, initialement inférieur à 10 pour cent, devient supérieur à 90 pour cent. Les deux autres stratégies (la seule explication logique et la simple répétition de la tâche) n'améliorent pas les scores initiaux. Ceci indique que c'est bien le

mécanisme de blocage qui faisait défaut aux personnes interrogées et non pas la logique.

Nous avons alors repris la même procédure en utilisant la tomographie par émission de positons pour observer ce qui se passe dans le cerveau des personnes avant et après l'apprentissage de l'inhibition de la stratégie perceptive. Les résultats révèlent une reconfiguration des réseaux cérébraux, de la partie postérieure du cerveau à sa partie antérieure, préfrontale (voir la figure 4). Il ne suffit donc pas d'avoir atteint, à l'adolescence, le « stade des opérations logiques formelles » défini par Piaget pour être « préfrontal » et logique.

Si la logique est bien la forme optimale de l'adaptation biologique, on constate que dans le cerveau en action, à tout

Les conditions d'apprentissage : une pédagogie expérimentale

Reprenons la tâche mentionnée au début de l'article. La règle déductive est : « S'il n'y a pas de carré rouge à gauche, alors il y a un cercle jaune à droite », et l'on doit sélectionner sur un écran d'ordinateur deux formes géométriques qui rendent la règle fausse. Pour améliorer le mauvais score des participants à ce test (90 pour cent de réponses fausses), on dispose de trois types de stratégies d'apprentissage : l'inhibition de la stratégie perceptive, l'explication logique et la répétition de la tâche.

Éliminons d'emblée la troisième qui ne donne aucun résultat : la répétition d'une « tâche piège », pour laquelle on ne comprend pas l'origine de l'erreur, ne corrige pas l'erreur.

Dans la condition d'apprentissage de l'inhibition de la stratégie perceptive, on tente d'inhiber les biais de raisonnement, c'est-à-dire les appariements perceptifs sources d'erreur. Pour ce faire, on émet des « alertes » qui préviennent le participant des pièges de raisonnement. On lui explique d'où vient l'erreur, on le met en garde pour qu'il ne tombe pas dans le piège, c'est-à-dire qu'il ne se laisse pas abuser par les formes et par les couleurs en oubliant la consigne logique. Dans la troisième stratégie (l'explication logique), on se contente d'expliquer la logique de la tâche sans expliciter les causes des erreurs. Dans ces procédures, on veille à ce que l'apprentissage ne soit pas simplement une instruction spécifique des bonnes et des mauvaises réponses (un apprentissage de type « perroquet »), mais qu'il porte sur un mécanisme cognitif plus général.

Comment procède-t-on ? Nous présentons quatre cartes (A, D, 3 et 7) chacune ayant, d'un côté une lettre, de l'autre un chiffre. Les quatre cartes sont disposées face aux personnes testées qui doivent indiquer quelle(s) carte(s) il est indispensable de retourner pour vérifier la règle : « S'il y a un A d'un côté d'une carte, alors il y a un 3 de l'autre. » La réponse erronée correspondant à un biais d'appariement perceptif serait A et 3. Ce problème est connu sous le nom de test de Wason.

Pour vérifier la règle, on doit effectivement retourner A pour savoir si oui ou non il y a un 3 au dos, mais il est inutile de vérifier ce qu'il y a au dos du 3 : ou bien c'est un A et la règle n'est pas mise en défaut ; ou bien c'est un D et la condition requise (il y a un A d'un côté) n'est pas remplie : dès lors, la carte 3 ne peut pas rendre la règle fausse. En revanche, la seconde carte à tirer est le 7 : si de l'autre côté du 7, on a un A, la règle est fausse ! Ainsi, la réponse correcte est A et 7, car seules ces deux cartes sont susceptibles de rendre la règle fausse, c'est-à-dire de présenter un cas où l'antécédent est vrai (A) et le conséquent faux (non-3).

Au début de l'apprentissage, tous les participants font l'erreur et proposent la paire A et 3 (voir la figure a). On procède alors aux deux procédures d'apprentissage choisies : l'explication logique (voir le scénario b) et l'apprentissage de l'inhibition de la stratégie perceptive (voir le scénario c). Dans l'explication logique, on explique de façon très « froide » la façon de réfléchir pour réussir ce test (b₁).



Lors des tests d'apprentissage, on demande de choisir parmi quatre cartes celles qu'il faut retourner pour vérifier l'application de la règle : « S'il y a un A d'un côté d'une carte, alors il y a un 3 de l'autre. » Avant l'apprentissage, la quasi-totalité des sujets se trompent.

moment, y compris chez l'adulte, plusieurs stratégies de raisonnement peuvent se télescoper, entrer en compétition, les réponses perceptives prenant alors souvent le pas sur les réponses logiques ; de surcroît, c'est l'inhibition cognitive, déclenchée ici par un apprentissage expérimental, qui se révèle être la clé de l'accès à la logique déductive. Ainsi, la clé de l'énigme du fonctionnement cognitif n'est pas à chercher uniquement dans la coordination logique des informations, mais aussi dans une fonction d'inhibition et de filtrage de certaines de ces informations. À l'issue d'un apprentissage strictement logique – généralement inefficace – on n'observe pas de reconfiguration des activations cérébrales, de l'arrière du cerveau vers l'avant.

Les bases cérébrales de l'erreur humaine

Plus précisément, les régions activées avant l'apprentissage, lorsque les participants font l'erreur d'appariement perceptif dans plus de 90 pour cent des cas, correspondent à un réseau neuronal postérieur bilatéral incluant à la fois des aires unimodales, c'est-à-dire liées à une modalité sensorielle particulière, notamment la vision, et à des aires hétéromodales (où plusieurs sens sont traités). Il s'agit de zones situées à l'arrière du cerveau (régions occipito-temporales) et sur le dessus (régions pariétales) et, enfin, de régions situées dans les gyrus temporaux moyen et supérieur gauches et dans le gyrus angulaire gauche (voir la

Dans l'autre méthode d'apprentissage (c_1), le «professeur» ne se contente pas de cet enseignement froid, mais donne en plus des «conseils d'inhibition», prévient lorsque l'«élève» risque de se laisser abuser par ses perceptions, fait intervenir une dimension émotionnelle dans son enseignement qui n'apparaît pas dans la méthode précédente. La procédure se termine lorsque les sujets atteignent le critère d'apprentissage, c'est-à-dire lorsqu'ils sont capables d'expliquer de façon autonome la résolution correcte de la tâche de

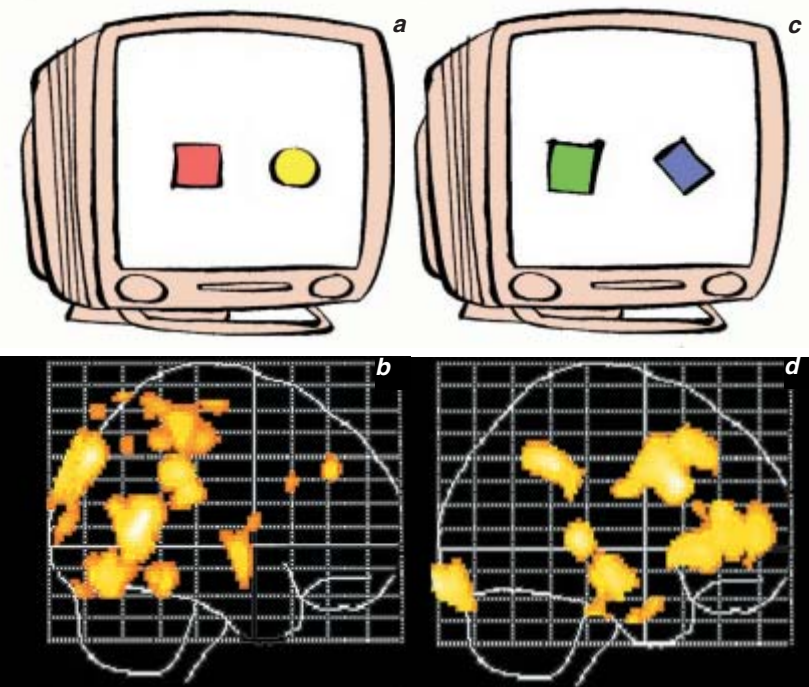
sélection de cartes. Ils finissent par réussir par l'une ou l'autre des procédures (b_2 et c_2). Sont-elles pour autant équivalentes ? Non, car dans la dernière étape de l'expérience, on refait le test avec la tâche initiale (rendre fausse la règle : «S'il n'y a pas de carré rouge à gauche, alors il y a un cercle jaune à droite») et l'on constate que la méthode d'explication logique échoue (b_3) tandis que la méthode d'apprentissage de l'inhibition des biais de raisonnement donne des résultats nettement meilleurs (c_3).

Pendant l'apprentissage

Après l'apprentissage



Pour améliorer les performances des sujets testés, on utilise soit l'apprentissage logique (b_1 à b_3), soit l'apprentissage de l'inhibition des biais de raisonnement (c_1 à c_3). La seconde méthode, où l'on met en garde contre les erreurs de raisonnement possibles, est plus efficace.



4. L'APPRENTISSAGE de l'inhibition des erreurs de raisonnement se traduit par une modification du débit sanguin cérébral. Lorsque les sujets se trompent quand on leur demande de rendre fausse la règle logique : «S'il n'y a pas de carré rouge à gauche, alors il y a un cercle jaune à droite» (a, mauvaise réponse), le débit sanguin est plus élevé dans les régions postérieures et perceptives du cerveau (b). Quand ils ont appris à inhiber leur erreur (c, bonne réponse), le débit sanguin est modifié, les régions antérieures (préfrontales) étant davantage activées (d).

figure 6). En comparant les images du cerveau avant et après apprentissage, on constate que certaines régions sont plus activées avant l'apprentissage. En faisant la soustraction des images obtenues avant apprentissage et après, on met ainsi en évidence les aires qui seront spécifiquement inhibées par l'apprentissage.

Ce réseau neuronal postérieur, impliqué dans les fonctions perceptives, démontre, pour la première fois, que les biais de raisonnement et les erreurs de logique ont des bases cérébrales. Aujourd'hui, on peut savoir, grâce à l'imagerie cérébrale fonctionnelle, ce qui se passe dans le cerveau humain quand il se trompe.

Ainsi, nous pensons que l'activation de la partie postérieure des gyrus temporaux moyen et supérieur gauches (l'aire de Wernicke) et du gyrus angulaire gauche correspond à la lecture silencieuse de la règle. Toutefois, lors de cette lecture, le sujet se focalise trop sur les mots qui évoquent les formes colorées (le carré rouge et le cercle jaune, par exemple), de sorte que ces régions du cerveau sont plus activées avant l'entraînement qu'après. Ce résultat est particulièrement intéressant, car J. Evans avait fait l'hypothèse selon laquelle, quand nous découvrons un texte lu, dans la vie courante, nous nous focalisons, en présence d'une négation, sur la proposition qui est niée : nous ne retenons que la chose à éviter dans les interdictions (ne pas prendre la première à droite), ou l'objet qui n'est pas disponible (il ne reste plus de glace à la vanille).

De même, l'aire visuelle V4 sur la voie ventrale, spécifiquement impliquée dans la perception de formes colorées, serait activée par une focalisation «visuelle» sur les deux formes, ce qui aboutirait à leur sélection systématique

et erronée (on se focalise sur les deux formes et sur les deux couleurs en oubliant les consignes véhiculées par la règle logique). À cela s'ajoute la participation des régions occipito-pariétales de la voie dorsale, connues pour leur rôle dans le traitement perceptif de l'espace, en l'occurrence lorsqu'il faut distinguer la gauche de la droite. Puisque la règle logique fait appel à ces notions, il n'est pas étonnant que ces aires soient activées. On verra que le traitement logique de ces mêmes relations active, après l'apprentissage, d'autres régions du cerveau.

Autant d'éléments qui nous montrent que, dans une tâche de logique déductive, notre cerveau fonctionne spontanément à l'économie, c'est-à-dire en recrutant un réseau situé dans sa partie arrière, fortement impliqué dans la perception des mots, des formes et de l'espace, plutôt qu'en activant des régions préfrontales. Ceci explique pourquoi nous pouvons commettre des erreurs, tout en croyant répondre correctement. Ainsi, il existe bien une réalité biologique de l'«irrationalité», mais, ici, ce fonctionnement à l'économie, souvent efficace, est inadapté, car il s'agit d'une tâche de logique déductive et non d'appariement perceptif.

La correction des erreurs

Dans nos expériences, on enregistre des images par la caméra à positons avant et après l'apprentissage. Or, après l'apprentissage de l'inhibition de la stratégie perceptive, les participants donnent une réponse logique pour plus de 90 pour cent des tests. La comparaison des régions du cerveau qui sont plus activées après que le participant a appris à inhiber le biais de raisonnement qu'avant révèle, pour les mêmes individus soumis à la même tâche, l'activation d'un nouveau réseau neuronal préfrontal. Plus précisément, les régions activées correspondent à des zones hétéromodales (plusieurs sens sont traités) et à des zones paralimbiques, liées aux émotions (voir les figures 4 et 5). Chaque composante neuroanatomique du réseau activé peut être mise en relation avec une composante psychologique des mécanismes utilisés lorsqu'on apprend à inhiber le biais d'appariement perceptif et que l'on améliore l'accès à la réponse logique.

Ainsi, à droite, le cortex préfrontal ventromédian et le cingulum antérieur sont impliqués dans les rapports entre émotion et raisonnement, lorsque l'on prend conscience de ses erreurs et lorsque se manifestent des conflits entre les réponses possibles (ici l'erreur d'appariement résultant d'un conflit entre la perception et la logique). On reviendra sur ce point en analysant les résultats d'une autre expérience décrite ultérieurement.

Par ailleurs, à gauche, le gyrus frontal moyen, siège de la mémoire de travail, est activé (les informations sont stockées temporairement dans cette partie de la mémoire). Cette activation est imputable, après l'apprentissage, à la manipulation logique des propriétés des objets (formes et couleurs) et de l'espace (à gauche et à droite) ; avant l'apprentissage, le traitement perceptif direct l'emporte sur le traitement logique. Avec l'apprentissage, la stratégie change, le traitement perceptif spontané étant inhibé au profit d'un raisonnement logique. En atteste l'activation de la partie antéro-inférieure du gyrus frontal moyen, connu pour son rôle dans l'inhibition. Enfin, on constate que le gyrus frontal inférieur gauche, qui recouvre l'aire de Broca (l'aire du langage) est activé ainsi que l'insula antérieure gauche.

Or, dans la tâche proposée, le participant ne parle pas : pourquoi l'aire du langage est-elle activée ? Nous pensons qu'il s'agit de la trace d'un « langage intérieur » régulateur, intimement lié au raisonnement déductif : lorsque l'on est confronté à une tâche logique, on « se parle » pour la résoudre. Ce langage régulateur est sans doute lié ici à l'activité d'inhibition du traitement perceptif. En fait, dans le cortex préfrontal inférieur gauche, langage, logique et inhibition semblent étroitement liés ; la logique déductive exige, dans un cas comme celui qui nous préoccupe, l'inhibition de la perception, c'est-à-dire une abstraction.

Enfin, la pré-aire motrice supplémentaire (pré-AMS), dont on sait qu'elle participe à la sélection d'une réponse motrice en situation de compétition, est activée, car elle assure l'inhibition de la réponse d'appariement perceptif direct (carré rouge à gauche et cercle jaune à droite) et la sélection, avec la souris de l'ordinateur, de deux formes logiquement correctes (carré vert à gauche et losange bleu à droite).

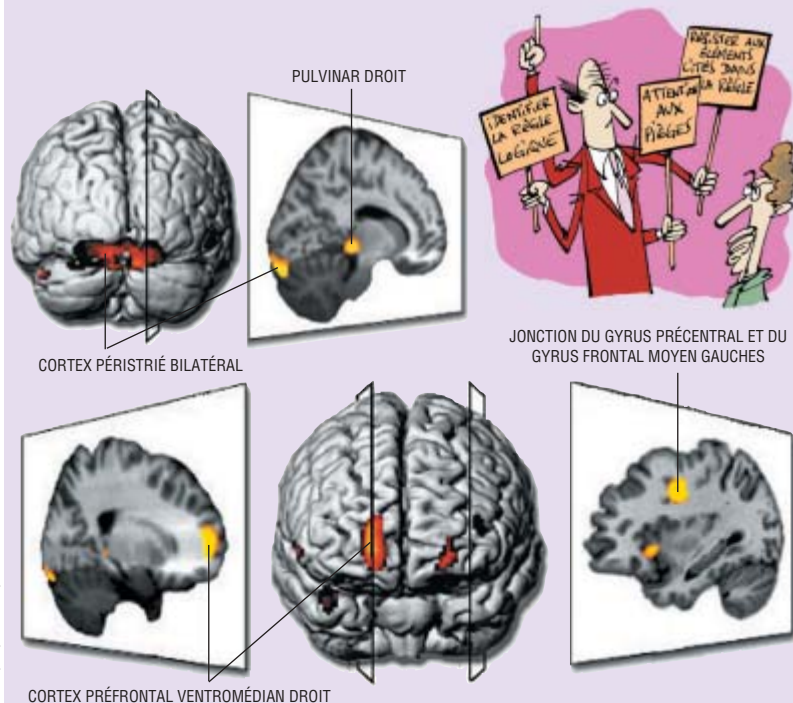
Quant aux autres régions, plus postérieures, notons que le gyrus parahippocampique est très certainement lié à la mémorisation des instructions de l'apprentissage, et le pulvinar, ainsi que le cortex péristrié, au filtrage des informations visuo-spatiales non pertinentes (carré rouge et cercle jaune). On sait qu'une lésion du pulvinar entraîne un déficit spécifique de cette fonction de filtrage.

La nouveauté introduite ici par l'imagerie cérébrale fonctionnelle est d'avoir démontré, pour la première fois, non seulement que les biais de raisonnement ont un support matériel, mais surtout que le cerveau humain, sous certaines conditions d'apprentissage, est capable de surmonter un tel biais. Toutefois, cette première expérience ne permet pas de dissocier, dans l'impact neuronal de l'apprentissage, ce qui relève spécifiquement de la composante exécutive (c'est-à-dire des alertes qui apprennent à inhiber le biais), de ce qui relève de la logique incluse dans toute tâche de raisonnement déductif.

Apprentissage froid et apprentissage émotionnel

Nous avons alors réalisé une nouvelle expérience d'imagerie cérébrale, toujours avec la technique de la tomographie par émission de positons, mais cette fois avec un groupe de personnes soumises seulement à la condition d'explication logique (et non plus à la condition d'apprentissage de l'inhibition de la stratégie perceptive). La condition d'apprentissage était strictement identique à celle de l'étude précédente, mais les alertes (les mises en garde des pièges, notamment) ont été enlevées de façon à soustraire la composante d'apprentissage de l'inhibition. Dans ces conditions, seule restait l'explication logique de la tâche, c'est-à-dire une condition que nous avons baptisée « apprentissage froid » par opposition au caractère émotionnel des alertes de l'apprentissage de l'inhibition.

Dans cette nouvelle expérience, nous voulions déterminer l'image correspondant à l'émotion seule. Nous disposons, par les expériences précédentes, de l'image correspondant à la somme de l'apprentissage à la logique et de la composante émotionnelle. En faisant ensuite la différence des deux, on devait isoler les signaux « émotionnels » spécifiques dus aux alertes émises lors de l'apprentissage de l'inhibition. Dès lors, on compare les



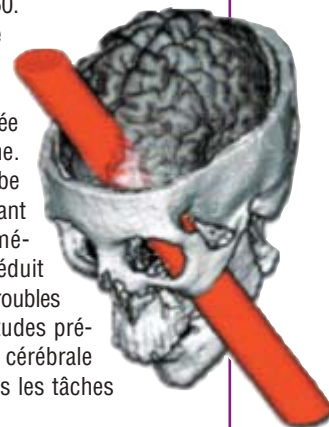
O. Houdé, GIN, UMR 6095, CNRS/CEA

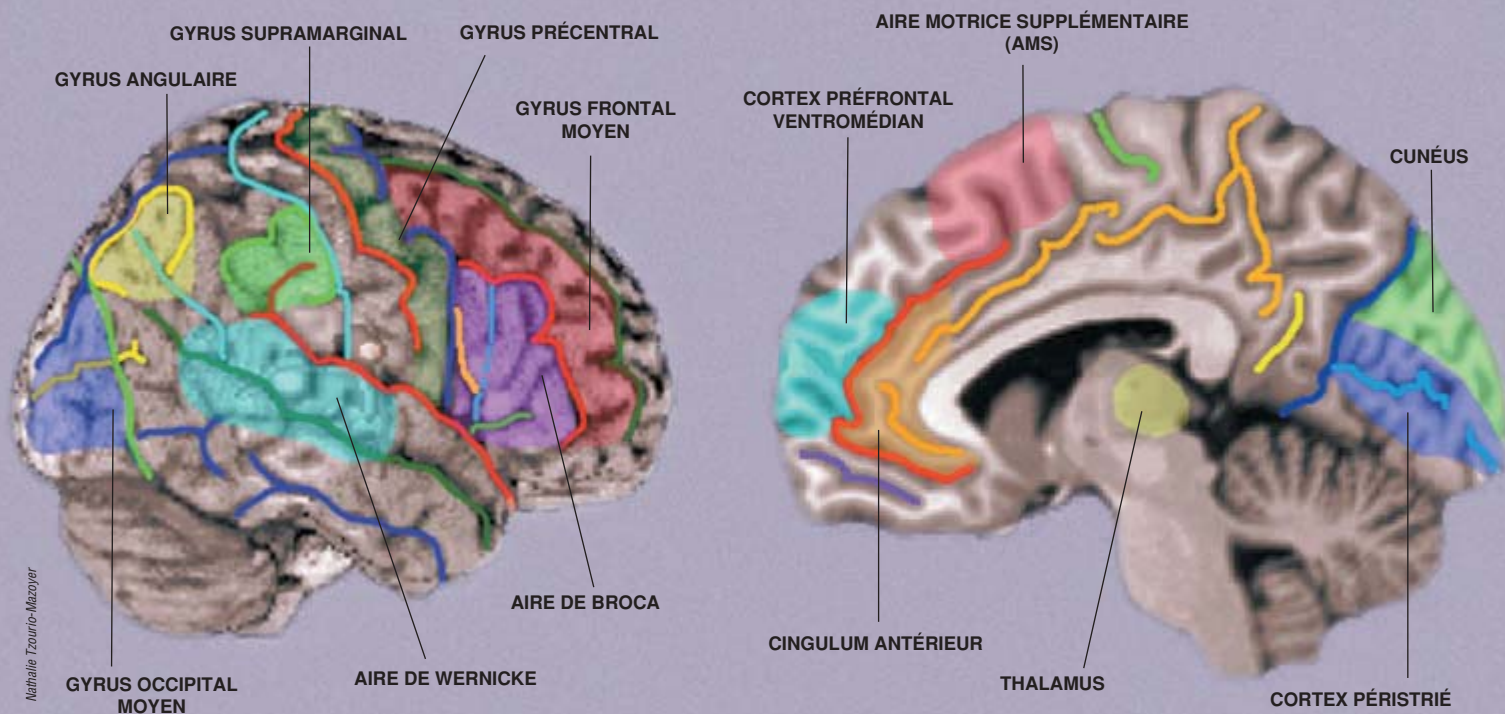
5. LES IMAGES obtenues par tomographie par émission de positons confirment que l'émotion joue un rôle important dans l'apprentissage, notamment lorsqu'il s'agit d'apprendre à corriger les erreurs de raisonnement. Ces cartographies de l'activation cérébrale ont été enregistrées sur des personnes ayant reçu l'apprentissage de l'inhibition de la stratégie perceptive, comparées aux personnes n'ayant reçu que l'apprentissage logique. Elles révèlent que certaines zones sont spécifiquement activées chez les sujets qui subissent le premier type d'apprentissage (chez les personnes recevant un apprentissage strictement logique et « froid », ces zones ne sont pas activées). Il s'agit du cortex préfrontal ventromédian droit, de la jonction des gyrus précentral et frontal moyen gauches, du pulvinar droit et du cortex péristrié bilatéral.

Un accident plein d'enseignements

En septembre 1848, Phineas Gage travaillait à la construction d'une voie ferrée en Nouvelle-Angleterre ; il fut victime d'une explosion au cours de laquelle une barre à mine de près de deux mètres de longueur lui transperça le crâne et le cerveau. Il survécut et, très rapidement après l'accident, Gage retrouva sa motricité, ses capacités linguistiques, sa mémoire et son intelligence générale. Toutefois, malgré cet apparent retour à la normale, il devint très vite irresponsable, grossier et capricieux, alors qu'il était auparavant responsable, socialement bien intégré et apprécié. Tout se passa comme s'il ne ressentait plus les émotions qui lui permettaient, avant son accident, de choisir les comportements appropriés. Il perdit son emploi et passa les 12 années qui suivirent à vagabonder, à s'exhiber dans un cirque, avant de mourir en 1860.

Dans les années 1990, à partir du crâne de Gage conservé à l'Université de Harvard, Hanna et Antonio Damasio ont reconstitué, grâce aux techniques d'imagerie assistée par ordinateur, le trajet de la barre à mine. Le résultat de cette autopsie d'outre-tombe est que Gage présentait des lésions touchant notamment le cortex préfrontal ventromédian droit. L'équipe d'A. Damasio en a déduit qu'une lésion de cette région provoque des troubles des émotions et du raisonnement. Les études présentées ici renforcent l'idée que cette aire cérébrale participe aux émotions mises en jeu dans les tâches de déduction logique pure.





6. UNE MODIFICATION DE L'ACTIVITÉ CÉRÉBRALE lors de l'apprentissage de l'inhibition a été mise en évidence par les auteurs. Dans les tests proposés, l'activité est plutôt localisée, avant l'apprentissage, dans les régions occipito-temporales (gyrus lingual gauche et gyrus fusiforme bilatéral ou aire visuelle V4), occipito-pariétales (gyrus occipital moyen bilatéral, cunéus droit, gyrus angulaire gauche, ou GA, et gyrus supramarginal bilatéral, ou GSM) et, enfin, temporales (gyrus temporal moyen gauche, gyrus temporal supérieur gauche ou aire de Wernicke). Toutes ces régions sont plus activées avant l'apprentissage qu'après. Au contraire, après l'apprentissage, on constate une reconfiguration de

l'activité cérébrale qui passe des régions postérieures dédiées en grande partie à la perception des mots, des formes, des couleurs et de l'espace, à des régions préfrontales, davantage liées aux émotions, à l'inhibition et à la logique. Les zones activées sont alors essentiellement, à droite, le cortex préfrontal ventromédian, le cingulum antérieur et, à gauche, le gyrus frontal moyen, le gyrus frontal inférieur (l'aire de Broca), l'insula antérieure, l'aire pré-AMS et le gyrus parahippocampique. On note aussi une activation bilatérale du cortex péristrié impliqué, avec le pulvinar (une région du thalamus), dans le filtrage visuel des informations. En couleur, les sillons qui séparent les territoires cérébraux.

résultats obtenus sur un groupe de participants soumis à l'apprentissage de l'inhibition (groupe inhibition) et un groupe soumis à l'apprentissage logique (groupe logique) et l'on fait la différence des deux.

Du point de vue comportemental, les résultats obtenus ont confirmé ceux de nos expériences psychologiques antérieures, à savoir que l'apprentissage strictement logique est inefficace, les participants continuant à se tromper, dans 90 pour cent des cas, après l'apprentissage. Cet apprentissage, trop «froid», ne déclenche pas une remise en question de la stratégie initiale de raisonnement ni la correction des erreurs perceptives.

Raison et émotion

Par la tomographie par émission de positons, nous avons montré que certaines zones sont spécifiquement activées dans le groupe ayant subi l'apprentissage de l'inhibition et qui, après cet apprentissage, réussit la tâche dans 90 pour cent des cas. Ces zones sont le cortex préfrontal ventromédian droit, la jonction des gyrus précentral et frontal moyen gauches, le pulvinar droit et le cortex péristrié bilatéral. Ces aires ne sont pas activées chez les participants qui reçoivent l'explication logique et qui persistent dans l'erreur (voir la figure 5).

Au regard de ces nouveaux résultats, plus circonscrits que les précédents, rappelons que, depuis le cas de Phineas Gage au XIX^e siècle jusqu'aux patients suivis aujourd'hui

par Antonio Damasio, à l'Université de l'Iowa, les données neuropsychologiques indiquent qu'une lésion du cortex préfrontal ventromédian droit provoque des troubles du raisonnement, de la prise de décision, des émotions et du «sentiment même de soi», selon l'expression d'A. Damasio. C'est en référence à ces données cliniques que ce dernier a suggéré que le bon usage de la raison, en particulier de la logique, dépend des émotions et du sentiment de soi. Selon lui, dans le fonctionnement normal, les émotions interviennent dans le raisonnement, notamment lors des tâches à connotation personnelle ou sociale qui impliquent des risques et des conflits. Toutefois, A. Damasio n'a jamais démontré l'implication directe du cortex préfrontal ventromédian droit dans une tâche de pure logique déductive, réellement cartésienne, réalisée par des sujets neurologiquement sains.

Compte tenu de la structure spécifique de la procédure d'apprentissage utilisée dans nos expériences, tout porte à croire que cette région du cerveau est ici impliquée dans l'émotion et le «sentiment même de soi» associés à la prise de conscience de l'erreur de raisonnement et au conflit qui naît entre perception et logique déductive. Autant d'éléments «infralogiques», déclenchés par les alertes de l'apprentissage, qui semblent indispensables pour inhiber le biais d'appariement perceptif, comme en atteste l'absence systématique d'activation du cortex préfrontal ventromédian droit chez tous les individus du groupe logique avec apprentissage «froid», où l'erreur n'est pas corrigée.

Du point de vue de la psychologie évolutionniste, ce résultat neurofonctionnel est à rapprocher du rôle classiquement imputé à l'émotion dans la survie, à savoir que la peur face à un danger conduit les animaux, dont l'homme, à fuir et à l'éviter. On peut dès lors avancer, en termes darwiniens, que l'évolution a dû façonner un cerveau qui ressent des émotions nécessaires pour inhiber les comportements inadaptés, y compris lorsqu'il s'agit de logique déductive. Contrairement à ce que pensait Piaget, le cerveau humain n'est pas, à l'image d'un ordinateur, un calculateur froid et logique.

Les résultats de cette seconde expérience d'imagerie cérébrale, associés à ceux de l'équipe d'A. Damasio, indiquent que l'émotion peut aider le raisonnement. L'un des rôles essentiels de l'hémisphère droit, fortement impliqué ici, résiderait dans le «traitement spatial des émotions», c'est-à-dire dans une sensibilité aux relations entre les émotions qui détermine le comportement approprié à une situation particulière.

De l'imagerie cérébrale à la pédagogie

Soulignons que ces résultats ne sont que les tout premiers sur les bases cérébrales de la correction d'erreurs et du changement de stratégie dans le raisonnement humain. Toutefois, ils apportent déjà quelques éléments de réponse aux trois questions clés débattues en psychologie cognitive du raisonnement : raisonnons-nous logiquement ? Pourquoi commettons-nous des erreurs de raisonnement ? L'émotion peut-elle aider le raisonnement ? À propos des deux premières questions, nous avons

constaté que, dans certains cas, le cerveau fonctionne spontanément à l'économie, en recrutant par exemple un réseau neuronal fortement ancré dans la perception, ce qui démontre la matérialité des biais de raisonnement. L'imagerie cérébrale a ici permis de comprendre comment le cerveau humain, si sophistiqué soit-il, peut commettre des erreurs de logique. Nos résultats ont également conduit à découvrir la plasticité du cerveau, en l'occurrence sa capacité à inhiber un biais de raisonnement pour accéder à la logique déductive : pour que nous raisonnions correctement, des stratégies d'inhibition du fonctionnement «spontané» du cerveau doivent se mettre en place. Il s'agit de la démonstration neuronale de la flexibilité intellectuelle. Quant à la dernière question, celle du rôle de l'émotion, on y répond en montrant que certaines régions cérébrales dédiées aux émotions et au sentiment de soi participent à l'inhibition d'un biais de raisonnement, ce qui permet d'accéder à la logique.

Comme l'a récemment souligné Mark Johnson, de l'Université de Londres, les nouvelles données d'imagerie cérébrale fonctionnelle sur l'apprentissage chez l'adulte nous apportent des indications intéressantes sur les mécanismes qui sont sans doute à l'œuvre dans le développement neurocognitif de l'enfant. De ce point de vue, les résultats exposés ici nous conduisent à tenir compte, en psychologie de l'enfant et en pédagogie, de deux mécanismes sous-estimés par la théorie de Piaget : l'inhibition des stratégies compétitives et l'émotion, indispensables au cerveau pour qu'il corrige ses erreurs de raisonnement.

Olivier HOUDÉ, professeur de psychologie cognitive à l'Université Paris-5 (Sorbonne) et à l'Institut universitaire de France (IUF), est responsable de l'équipe Développement et fonctionnement cognitifs dans le Groupe d'imagerie neurofonctionnelle, UMR 6095, CNRS-CEA, Universités de Caen et Paris-5, dirigé par Bernard MAZOYER, et où travaillent également Sylvain MOUTIER, Laure ZAGO et Nathalie TZOURIO-MAZOYER.

Antonio DAMASIO, *L'erreur de Descartes*, Éditions Odile Jacob, 1995.

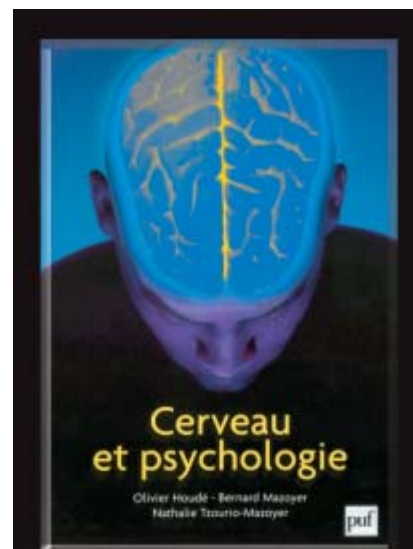
Antonio DAMASIO, *Le sentiment même de soi : Corps, émotions, conscience*, Éditions Odile Jacob, 1999.

Olivier HOUDÉ, *Inhibition and cognitive development : Object, number, categorization, and reasoning*, in *Cognitive Development*, vol. 15, pp. 63-73, 2000.

Olivier HOUDÉ et al., *Shifting from the perceptual brain to the logical brain*, in *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol. 12, pp. 721-728, 2000.

Olivier HOUDÉ et al., *Access to deductive logic depends on a right ventromedial prefrontal area devoted to emotion and feeling*, in *NeuroImage*, vol. 14, pp. 1486-1492, 2001.

Olivier HOUDÉ, Bernard MAZOYER et Nathalie TZOURIO-MAZOYER, *Cerveau et psychologie*, PUF, 2002.



614 pages - 28 €

"La première synthèse française des données d'imagerie cérébrale et de psychologie expérimentale.

Splendides images.

Un ouvrage qui a sa place dans la bibliothèque de tout homme cultivé.

Indispensable à lire et à méditer."

Jean-Pierre Changeux,
La Recherche

"Une brillante réussite. L'ouvrage est cohérent,

le style clair et précis, les références toujours pertinentes."

Michel Imbert,
Pour la science

"Tous ceux qui s'intéressent aux énigmes du cerveau apprécieront l'exhaustivité de l'ouvrage."

Kheira Betayeb,
Science et vie

"Un événement !"

Hervé Ponchelet,
Le Point

"Un livre très richement illustré. Une référence."

Impact Médecin

puf

La taxonomie des courbes

MARCEL BERGER

Des mathématiciens explorent la diversité des courbes à la recherche de caractéristiques de classement. Vladimir Arnold a enrichi leur tâche en identifiant une nouvelle spécificité des courbes : l'«étrangeté».



L'univers des courbes a été profondément restructuré : le mathématicien russe, Vladimir Arnold, a découvert des liens de parenté insoupçonnés entre les courbes qui en précisent le classement.

De quelles courbes s'agit-il ? De celles que l'on peut dessiner à la main sur une feuille sans s'arrêter et qui se referment sur elles-mêmes ; par exemple, un cercle, un huit, un trèfle à quatre feuilles..., en bref les courbes fermées planes sans «angle». Ainsi les rectangles, les polygones, ou toute figure possédant un angle sont exclus, car pour leur tracé il faut stopper le crayon aux points angulaires. Il existe bien entendu une infinité de telles courbes fermées que les mathématiciens cherchent à classer.

Comme les entomologistes trient les espèces animales, les mathématiciens ont commencé par explorer l'espace des courbes à la recherche de caractéristiques communes : le nombre de fois où la courbe se recoupe, le nombre de régions qui la composent..., mais ces renseignements se sont révélés insuffisants pour singulariser les courbes. Les mathématiciens ont tenté alors une autre approche : transformer géométriquement les courbes afin d'identifier celles qui recèlent une similarité. Ainsi est apparue la notion d'«invariant», une propriété de la courbe conservée lors des transformations autorisées. L'invariant sert à identifier ces courbes ; c'est en quelque sorte leur nom de famille.

À la fin du XX^e siècle, les invariants mis au jour ne suffisaient pas à pleinement distinguer l'ensemble des courbes

planes. À partir de 1994, V. Arnold a fait progresser la discipline en élaborant un nouvel invariant, «l'étrangeté». Grâce à lui, les courbes ont gagné une nouvelle identité ; elles portent désormais un nom et un prénom.

Les cercles et les autres

Imaginons un quincaillier d'un genre un peu particulier qui vendrait les courbes fermées planes précédemment définies. Ses clients seraient des publicitaires à la recherche de sigles ou des architectes en mal d'inspiration. Afin de satisfaire rapidement ses clients, le quincaillier range l'infinité de courbes qu'il a en stock en catégories de même forme, ou «classes». Selon lui, deux courbes ont la même forme si en déformant l'une, on retrouve l'autre. En mathématique, ces déformations relèvent de la topologie, la branche des mathématiques où l'on ne se soucie pas du détail des formes, comme par exemple leur longueur ou leur courbure, mais où l'on veut déterminer si les formes sont transformables les unes dans les autres.

Quelles déformations le quincaillier-mathématicien autorise-t-il ? Seulement certaines, sinon toutes les courbes seraient équivalentes. On pressent, par exemple, qu'un huit et un cercle sont deux courbes différentes. Deux courbes ne seront pas équivalentes quand on ne peut passer de l'une à l'autre que par une étape de déformation interdite – une courbe à angle ou à point de rebroussement (voir la figure 2). Cette interdiction

s'applique aussi aux courbes de départ ; en termes mathématiques, elles doivent avoir une dérivée non nulle par rapport aux deux variables du plan.

Par quelle catégorie de courbes le quincaillier commence-t-il ? Par celle dont nous avons le sentiment qu'elle est la plus simple : le cercle. L'ensemble des figures géométriques fermées qui ne se recoupent pas, tel le cercle, sont dites «simples». Camille Jordan, en 1900, en démontrant qu'«une courbe fermée simple possède un intérieur, qui est du point de vue de la forme, le même que celui d'un cercle, à savoir un disque», a mis un point final à leur étude. Ce qui est vrai pour l'intérieur des courbes l'est aussi de leur pourtour : si la surface intérieure est de la même forme qu'un disque, la courbe est de même forme que le cercle. Conclusion : il n'existe qu'une seule forme possible pour les courbes simples, celle du cercle.

Attaquons maintenant le cas général des courbes qui se croisent. Nous ramènerons le problème à des courbes particulières, que nous dénommerons «stables». Cette notion est fortement suggérée par un résultat dû au mathématicien américain Hassler Whitney en 1937 : toute «petite» déformation (aussi petite que l'on veut) déforme

1. AFIN DE CLASSER l'ensemble infini des courbes planes, les mathématiciens ont élaboré, à partir des caractéristiques des courbes, des «invariants», des nombres qui se conservent lorsqu'on transforme une courbe en une autre. Toutes les courbes qui ont les mêmes invariants se rangent dans la même catégorie, le même tiroir.