

## ***Les bases cérébrales d'une acquisition culturelle : La lecture***

Stanislas Dehaene

Unité INSERM 562 « Neuroimagerie cognitive »

4 place du Général Leclerc, 91401 Orsay cedex

Lorsque nous lisons un texte, nous n'avons pas conscience de la difficulté et de la complexité des opérations qui sont réalisées par notre système visuel. En une fraction de seconde notre cerveau reconnaît les mots et accède à leur sens. Cette opération est plus complexe qu'il n'y paraît. D'une part, notre système visuel s'adapte aux multiples variations de forme des mots. Ainsi, nous savons reconnaître le mot « quatre », que celui-ci soit présenté en majuscules ou en minuscules, dans une police inhabituelle, et quelle que soit sa taille. Nous sommes même capables de lire des mots dans lesquels une lettre sur deux apparaît en MiNuScUIEs. D'autre part, nous sommes étonnamment sensibles aux minuscules différences qui, parfois, distinguent deux mots très différents, tels que « deux » et « doux ». Il est clair, enfin, que cette capacité résulte d'un long apprentissage. Ce qui distingue deux mots dans une langue peut n'avoir aucune importance dans une autre. L'apprentissage de la lecture semble inculquer à notre cerveau un sens nouveau, celui de percevoir, en un clin d'oeil, les traits visuels qui sont pertinents pour la lecture et ceux qui ne sont pas. Selon que nous apprenions à lire le chinois, l'hébreu ou les

hiéroglyphes, notre cerveau saura reconnaître sans hésitation ces caractères, ou au contraire n'y verra que des formes abstraites et impossibles à décoder.

La lecture pose au neurobiologiste un paradoxe. Cela ne fait que quelques milliers d'années que l'humanité a inventé l'écriture. L'architecture de notre cerveau n'a donc pas eu la possibilité de s'adapter aux difficultés particulières que pose la reconnaissance des mots. Et pourtant, notre système visuel réalise des prouesses telles qu'il semble remarquablement adapté à cette tâche nouvelle. Comment donc notre cerveau apprend-il à lire ? Comment nos aires cérébrales, issues de millions d'années d'évolution biologique dans un monde sans mots, parviennent-elles à s'adapter aux problèmes spécifiques que pose la lecture ? Plus généralement, comment se fait-il que des objets culturels récents et novateurs tels que les mots écrits soient susceptibles d'être représentés par le système nerveux humain, alors que rien ne semble l'y prédisposer ?

En sciences sociales, la question de l'acquisition des objets culturels est rarement posée en ces termes. La plupart des chercheurs adhèrent implicitement à un modèle que j'intitulerai celui de la plasticité généralisée et du relativisme culturel. Le cerveau y est considéré comme un organe tellement plastique qu'il ne contraint en rien aux acquisitions culturelles, qui sont d'ailleurs d'une très grande diversité. Dans cette hypothèse, la question des bases cérébrales des objets culturels tels que la lecture n'est pas pertinente : libéré des contraintes biologiques, le cerveau humain, à la différence de celui des autres espèces animales, serait capable d'absorber toute forme de culture, aussi variée soit-elle.

L'objet du présent chapitre est de résumer quelques données récentes de neuroimagerie et de neuropsychologie qui réfutent ce modèle simpliste des relations entre cerveau et culture, et jettent une lumière nouvelle sur l'organisation cérébrale des circuits de la lecture. Nous verrons que ces données ne sont pas compatibles avec l'image d'un cerveau isotrope qui se contenterait d'absorber sans filtrage toutes les données de son environnement culturel. Bien au contraire, nous serons amenés à proposer un autre modèle, radicalement opposées au précédent. Selon cette hypothèse, l'architecture de notre cerveau est étroitement limitée. Elle se met en place avec de fortes contraintes génétiques, mais toutefois en laissant une frange de variabilité. Les acquisitions culturelles ne sont alors possibles que dans la mesure où elles s'insèrent dans cette frange, en reconvertissant à un autre usage des prédispositions cérébrales déjà présentes. La variabilité interculturelle est donc réduite, son étendue apparente n'est qu'une illusion liée à notre incapacité d'imaginer des formes culturelles autres que celles que notre cerveau est capable de concevoir.

## **L'imagerie cérébrale de la lecture**

L'imagerie fonctionnelle par résonance magnétique (IRMf) permet aujourd'hui de visualiser l'activité du cerveau au cours de nombreuses activités cognitives. Pour visualiser le circuit cérébral de la lecture, il suffit de placer un adulte volontaire dans le champ de l'aimant et de mesurer son débit sanguin cérébral alors qu'on lui présente des mots sur un écran d'ordinateur. La présentation de chaque mot s'accompagne d'une augmentation rapide du débit sanguin dans un vaste réseau d'aires cérébrales qui sous-

tendent les différentes étapes de la lecture. Il serait erroné de penser qu'une seule aire cérébrale se charge d'une opération aussi complexe que la lecture. La reconnaissance visuelle, l'accès au lexique mental, la récupération du sens de chaque mot, leur intégration dans le contexte de la phrase, et enfin leur prononciation mobilisent plus d'une dizaine d'aires cérébrales réparties dans les régions occipitales, temporales, pariétales et frontales.

Dans ce chapitre, nous nous concentrerons exclusivement sur une petite région qui intervient aux étapes les plus précoces de la lecture. Cette région, que l'on appelle l'aire de la forme visuelle des mots, fait partie de la voie visuelle ventrale gauche, une bande de cortex qui s'étend à la base du cerveau depuis le pôle occipital, impliqué dans l'analyse des traits visuels, jusqu'à la région fusiforme antérieure où l'identité des objets est extraite.

Une première surprise est l'étonnante reproductibilité de cette région d'un individu à l'autre. Il est aisé de la repérer : quelques minutes de lecture suffisent à l'activer de façon reproductible chez n'importe quel bon lecteur. On la retrouve systématiquement à la même position chez tous les individus, dans une région du cerveau appelé le sillon occipito-temporal, qui borde le gyrus fusiforme. Dans le système de coordonnées de Talairach, qui permet de repérer toute région du cerveau par ses coordonnées tridimensionnelles, la variabilité de cette région d'un individu à l'autre n'est que de l'ordre de 5 millimètres.

De nombreuses caractéristiques démontrent que cette région joue un rôle particulier dans l'identification visuelle des mots. Tout d'abord, elle ne s'active que pour des mots écrits, pas lorsque les mots sont présentés à l'oral. De plus, elle ne semble pas s'intéresser au sens des mots, mais uniquement à leur forme visuelle. Ainsi, l'on observe exactement la même quantité d'activation lorsque l'on présente des mots qui existent en français ou ce que l'on appelle des pseudo-mots, c'est-à-dire des suites de lettres telles que « plougiston » qui sont prononçables et qui obéissent aux règles du français, mais qui n'appartiennent pas au dictionnaire.

On estime donc que cette région effectue l'analyse des lettres qui composent les mots, et fournit aux autres régions cérébrales une représentation de leur identité et de leur ordonnancement. La lésion de cette région, à la suite par exemple d'un accident vasculaire, entraîne d'ailleurs un syndrome singulier, l'alexie pure, décrite par Joseph-Jules Déjerine dès 1892. Le patient ne parvient plus à lire les mots avec rapidité (a-lexie); tout au plus parvient-il à déchiffrer péniblement l'identité du mot lettre à lettre, souvent en les traçant du doigt. On parle d'alexie « pure » pour deux raisons. D'abord, parce que le patient parvient toujours à *écrire* les mots même qu'il ne parviendra pas à relire quelques instants plus tard (on parle donc aussi d' « alexie sans agraphie »); il n'a également aucune difficulté particulière à comprendre ou à répéter des mots parlés. Ensuite, parce que d'autres formes de reconnaissance visuelle, par exemple l'identification des visages ou la reconnaissance des objets de la vie quotidienne peuvent demeurer largement préservés. Tout ceci montre bien qu'une fraction de la région inféro-temporale gauche joue un rôle très particulier dans l'identification visuelle des mots.

## **Imprégnation culturelle dans la voie visuelle ventrale**

La région de la forme visuelle des mots ne se contente pas de répondre passivement, dès la naissance, à n'importe quel objet qui aurait une forme proche de celle d'une lettre ou d'un mot. On peut montrer, grâce à l'imagerie fonctionnelle, qu'elle s'adapte activement à la lecture. La preuve en est qu'il ne suffit pas de présenter n'importe quel chaîne de lettres pour l'activer. Chez les français, par exemple, la région répond beaucoup plus fortement aux chaînes de caractères qui forment un mot réel ou plausible comme « MOUTON » ou « PLAUNE » qu'aux chaînes qui violent la structure du français, par exemple des chaînes de consonnes telles que « QFSFZG ». Or, sur le plan strictement visuel, ces stimuli ne sont guère différents. On peut même aller plus loin : La forme des lettres étant arbitraire, il aurait été imaginable que, dans un autre système d'écriture, QFSFZG soit un mot et MOUTON une chaîne dépourvue de sens ! La réponse de notre région n'est donc pas uniquement déterminée par le stimulus visuel, mais surtout par l'histoire culturelle de l'individu qui, en apprenant à lire, a appris à décoder certaines chaînes de lettres mieux que d'autres. Ainsi, chez les sujets japonais, on peut montrer que ce sont les caractères Kanji et Kana qui parviennent à l'activer maximale. Il semble que, dans toutes les cultures, en dépit de formes de surface variées, les mots écrits s'inscrivent toujours dans la même région cérébrale, avec seulement de minimes différences peut-être liées à la forme et à la structure interne des caractères.

Ce processus d'imprégnation culturelle peut être visualisé très directement par imagerie fonctionnelle chez l'enfant à différentes étapes de l'apprentissage de la lecture. Des

expériences longitudinales, menées par Bennett et Sally Shaywitz à l'université Yale, montrent que la région de la forme visuelle des mots ne répond pas immédiatement aux mots plus qu'à d'autres formes visuelles similaires. C'est seulement chez l'enfant de dix ans qu'on commence à y enregistrer des réponses qui ressemblent à celles de l'adulte.

Il est fascinant de constater que même un enfant de 8 ans, qui sait déjà lire depuis plusieurs mois ou années, n'active pas nécessairement fortement la voie visuelle ventrale gauche. Il ne suffit pas de savoir lire : c'est l'*expertise* pour la lecture dans une culture donnée qui entraîne une spécialisation de cette région. Ainsi observe-t-on une corrélation forte entre le degré d'activation de cette région et les performances de lecture. Chez l'adulte dyslexique, qui n'atteint jamais une grande aisance dans l'identification visuelle des mots, la réponse ventrale n'atteint jamais le degré de spécialisation que l'on observe chez l'adulte. Le consensus actuel est que cette absence de réponse n'est pas la cause, mais bien la conséquence d'un mauvais apprentissage de la lecture. Le déficit primaire, chez une majorité de dyslexique, se situerait dans les régions latérales du cortex temporal gauche impliquées dans la représentation de la phonologie des mots parlés. Ce déficit entraînerait de telles difficultés de lecture qu'il empêcherait la spécialisation des circuits qui, chez une personne normale, acquièrent progressivement une expertise pour l'extraction de la forme visuelle des mots.

### ***Invariance et automaticité***

Quelle est la forme exacte que prend cette expertise ? Des expériences récentes, réalisées par Laurent Cohen et moi-même, démontrent que la région visuelle ventrale gauche extrait une représentation visuelle *invariante*, capable de coder l'identité des mots en s'abstrayant des paramètres visuels non pertinents.

Une première forme d'invariance est spatiale. Les premières étapes de l'analyse visuelle sont dites « rétino-topiques », parce qu'elles s'intéressent à des points particuliers de la rétine. Chaque neurone des aires V1, V2 ou V4 possède un champ récepteur, c'est-à-dire une petite région rétinienne où les stimuli doivent apparaître pour affecter le taux de décharge du neurone. Cependant, l'imagerie fonctionnelle montre que la région de la forme visuelle des mots est la première région qui, dans l'analyse visuelle, n'est pas rétino-topique. Elle répond de façon identique à des mots présentés à gauche ou à droite du champ visuel, nous permettant de lire les mots quelle que soit leur position.

Cela implique une connectivité particulière. Les mots présentés à gauche sont en effet traités initialement par les régions visuelles de l'hémisphère droit, et vice-versa. L'invariance de position ne peut donc être atteinte par la région ventrale gauche que si cette région collecte les informations visuelles des deux hémisphères. En particulier, les informations visuelles de l'hémisphère droit doivent être véhiculées, par l'intermédiaire d'un faisceau fibre appelé le corps calleux, en direction de la région ventrale gauche. En mesurant l'activité électrique du cerveau par électro-encéphalographie, nous sommes parvenus à visualiser ce transfert. Vers 150 millisecondes après la présentation d'un mot à droite ou à gauche de l'écran, l'activité électrique apparaît sur le scalp du côté opposé à



la position du mot (rétinotopie). Vers 200 millisecondes, cependant, une remarquable convergence anatomique se produit : quel que soit le côté initial de présentation, l'activité électrique converge vers la région ventral gauche. Ces expériences permettent d'estimer que l'identité invariante des mots est extraite en moins d'un cinquième de seconde.

Un second aspect de cette invariance concerne la police de caractères et la casse dans laquelle les caractères sont imprimés. Nous sommes capables de reconnaître le même mot écrit en majuscules ou en MINUSCULES, dans une police Garamond ou Arial. La région de la forme visuelle des mots est responsable de cette capacité. Pour le montrer, mes collègues et moi avons utilisé une méthode d'amorçage subliminal. A chaque essai, nous avons présenté un premier mot en minuscules, par exemple « radio », suivi d'un second mot en majuscules qui pouvait être identique ou non au premier (« RADIO » ou « TABLE »). Le premier mot, présenté très brièvement, était rendu invisible en l'entourant de caractères sans signification. Nous demandions aux volontaires de juger si le second mot représentait un objet manufacturé ou non. La mesure du temps de réponse des sujets montrait une accélération ou « amorçage » lorsque la cible était répétée, même inconsciemment, et même dans une casse différente. Cela prouvait que l'identité abstraite du mot, indépendante de la casse, avait été extraite. L'imagerie cérébrale montra que cette effet trouvait son origine dans la région visuelle ventrale gauche. L'activation de cette région était plus élevée lorsque deux mots distincts étaient présentés (radio-TABLE) que lorsque le même mot était présenté deux fois (radio-RADIO). Cela suggère l'existence, dans cette région, de populations de neurones capables de détecter la

répétition du même mot quelle que soit sa forme, et d'effectuer cette analyse invariante automatiquement, en l'absence de toute conscience du sujet.

Il faut souligner à nouveau que cette effet implique un apprentissage culturel. Nous sommes tellement habitués à associer les lettres minuscules et majuscules que nous ne prêtons plus attention à l'arbitraire de leur forme. Certaines lettres se ressemblent en minuscules et en majuscules (o et O, u et U), mais beaucoup semblent appariées au hasard. Rien ne prédestine la forme « a » à représenter la même lettre que la forme « A ». L'existence, dans la région visuelle ventrale, de neurones capables de répondre de façon identique à « a » et « A » ne saurait être due au hasard ou à l'organisation innée du système visuel. Elle résulte nécessairement d'un apprentissage qui y a imprimé des associations culturelles nouvelles.

### ***Que code la région visuelle ventrale avant d'apprendre à lire ?***

Nous sommes maintenant en mesure d'explicitier le paradoxe de la lecture. Lire comporte de nombreux aspects culturels arbitraires. La forme de l'écriture varie grandement entre l'alphabet latin, le syllabaire du Kana, et l'écriture Kanji. Nous n'avons pas pu naître avec une connaissance des séquences de lettres qui constituent des mots, et de celles qui ne signifient rien. D'ailleurs, la lecture est une invention culturelle trop récente pour que notre cerveau ait pu s'y adapter au cours de son évolution. Et pourtant, chez tous les individus, dans toutes les cultures, les mécanismes de l'identification invariante des mots reposent sur la même région cérébrale, à quelques millimètres près. Tant dans sa connectivité que dans ses mécanismes intimes, cette région paraît remarquablement

adaptée à la fonction d'identifier les mots. Elle le fait avec une rapidité surprenante et une invariance pour la position et la forme des lettres sans laquelle nous ne pourrions pas lire. Une telle adéquation aux spécificités de la lecture ne saurait être due au hasard, mais comment l'expliquer sans non plus faire appel à une pré-adaptation cérébrale, impossible compte tenu de la lenteur de l'évolution des espèces?

Pour échapper à ce cercle vicieux, il nous faut considérer quelle peut être la fonction de cette région chez l'animal, ou chez l'homme avant l'apprentissage de la lecture. Chez le primate, la région inféro-temporale dans sa totalité est consacrée aux opérations d'identification visuelle. Elle fait partie de la voie visuelle « ventrale », dite voie du « quoi », qui s'oppose anatomiquement à la voie « dorsale » dite voie du « comment » et du « où », impliquée dans l'action et la localisation spatiale. Chez l'homme également, la région ventrale répond à toute sortes de stimuli visuels autre que des mots : visages, objets, lieux. Même au pic de la réponse aux mots, la présentation de dessins au trait évoque toujours une réponse importante. Il apparaît donc clairement que la région de la forme visuelle des mots s'insère dans un tissu cortical plus vaste dont l'implication dans la reconnaissance visuelle est ancienne sur le plan phylogénétique.

Chez le primate, les neurones du cortex inférotemporal présentent des formes élaborées d'invariance. Leurs champs récepteurs sont vastes, incluant souvent la plus grande partie du champ visuel. Ils répondent sélectivement à certains objets, et ce dans une très large éventail de tailles et de positions. Tel neurone pourra, par exemple, répondre à la vue d'une tête de chat, que celui-ci soit proche ou loin, tourné vers la droite ou vers la gauche.

Certains neurones répondent même à des vues très différentes du même objet, par exemple son profil et sa vue de face. Enfin, ces neurones sont dotés d'une grande plasticité qui leur permet d'associer des images arbitraires. Les circuits dans lesquels ils s'insèrent paraissent donc particulièrement adaptés à l'identification invariante des lettres et à l'apprentissage de leurs formes multiples, majuscules ou minuscules. Simplement, cette adaptation n'a rien de spécifique aux lettres, elle existe parce qu'elle contribue à la reconnaissance visuelle de façon générale.

Des expériences menées par les électrophysiologistes Keiji Sakata, et plus récemment Manabu Tanifuji, à Tokyo, permettent d'aller plus loin. Chez le primate, la réponse des neurones du cortex inférotemporal aux objets peut être analysée en composantes élémentaires. Lorsqu'un neurone répond, par exemple, à l'image d'une tête de chat, le chercheur va chercher à simplifier progressivement l'image afin d'identifier quels sont les indices minimaux qui suffisent à évoquer une réponse. Pour tel neurone, ce pourra être le contour de la tête et des oreilles, pour tel autre la présence de deux disques blancs sur fond noir (les « yeux »), etc. Une partie du cortex inférotemporal semble composée d'une mosaïque de tels détecteurs élémentaires. Or, il est remarquable que certains de ces indices minimaux, qui sont spontanément présents chez le primate, ressemblent à nos caractères. On trouve, par exemple, des neurones qui répondent optimalement à deux disques superposés formant un 8, d'autres qui répondent à deux barres se rejoignant pour dessiner un T, d'autres encore qui déchargent lors de la présentation d'une astérisque. Ces formes élémentaires ont été sélectionnées parce qu'elles constituent un répertoire de formes qui permettent de coder, par leur combinatoire, l'immense variété des objets et

des scènes visuelles que nous sommes susceptibles de rencontrer. La forme en T, par exemple, est utile à repérer car elle signale fréquemment l'occlusion d'un contour derrière une autre partie de l'objet. La réponse de cette région aux caractères écrits n'est donc pas un accident, elle s'inscrit dans l'histoire évolutive de cette région et a été simplement découverte et réutilisée par nos systèmes d'écriture.

On peut, enfin, mieux comprendre la reproductibilité remarquable du positionnement de l'aire de la forme visuelle des mots lorsque l'on prend en compte l'organisation topographique innée du cortex inférotemporal. Par imagerie cérébrale, Alumit Ishai et ses collègues ont montré que les régions latérales du cortex visuel ventral répondent préférentiellement aux objets et aux mots, tandis que les régions plus proches de la ligne médiane répondent avec une préférence progressivement plus marquée pour les visages et pour les scènes d'extérieur. Ravi Malach et ses collaborateurs ont montré que ces préférences coïncident avec un gradient de sélectivité pour l'excentricité de l'image : les régions latérales répondent préférentiellement aux petits détails de l'image présents dans la fovea, tandis que les régions médianes répondent préférentiellement à la configuration globale et à donc à la périphérie du champ visuel. Un tel gradient, qui traverse l'ensemble du système visuel depuis le pôle occipital jusqu'aux régions antérieures, pourrait être mis en place au cours de la formation du cortex, peut-être sous le contrôle d'un gradient chimique d'expression de « morphogènes » (modèle de Turing). Ce gradient pourrait expliquer que le codage visuel des mots, qui requiert une grande précision visuelle et donc une fovéation, soit systématiquement associé aux régions latérales du cortex inférotemporal, et soit donc tellement reproductible d'un individu à l'autre. Sa

latéralisation dans l'hémisphère gauche pourrait s'expliquer de la même manière par la présence de connections privilégiées, mises en place par un programme génétique, avec de multiples régions de l'hémisphère gauche et en particulier les régions temporale et frontale inférieure qui sont impliquées dans la perception et la production du langage parlé.

### ***L'hypothèse de la reconversion neuronale***

Résumons les données empiriques : notre histoire évolutive a doté notre système visuel d'une région dans laquelle les neurones sont sensibles à des combinaisons élémentaires de traits visuels présentés dans la fovea, sont capables d'apprendre des combinaisons nouvelles, ont des propriétés d'invariance de position, de taille et de forme, et projettent en direction des autres aires de l'hémisphère gauche. Cette région est précisément celle qui acquiert, au cours de l'apprentissage de la lecture, un code invariant des mots propre au système d'écriture qui lui est inculqué. Ainsi, l'apprentissage de la lecture reconvertit ou « recycle » un réseau de neurones dont la fonction initiale est suffisamment proche. Le cerveau n'a ni la possibilité matérielle, ni le besoin de créer *de novo* une aire cérébrale aux propriétés originales. Aucune aire cérébrale n'a évolué pour la lecture. Au contraire, on peut spéculer que ce sont les systèmes d'écritures eux-mêmes qui, au cours de l'évolution culturelle, ont subi une pression sélective visant à les adapter aux contraintes de notre système visuel (ainsi, bien sûr, qu'à d'autres contraintes mécaniques ou matérielles de l'écriture). Dans toutes les cultures où elle est apparue, l'évolution de l'écriture a débuté par des représentations pictographiques immédiatement reconnaissables par n'importe quel primate (le mot « taureau », par exemple, étant

représenté par un croquis d'une tête de taureau). Progressivement, les caractères se sont épurés, un peu comme le neurophysiologiste simplifie progressivement le dessin de la tête du chat, afin d'arriver à un dessin minimal, rapide à tracer, mais toujours reconnaissable par notre système visuel. Notre lettre A dérive ainsi du alpha  $\alpha$  qui lui-même, après rotation, dérive de la tête de taureau, animal dont l'ancien nom sémitique est « 'aleph ». En bref, l'organisation de notre cerveau a contraint l'évolution culturelle de la lecture, tandis que la lecture n'a pas eu la possibilité matérielle de modifier la structure génétique de notre cerveau.

Peut-on généraliser l'exemple de la lecture à d'autres activités culturelles humaines ? Je voudrais proposer en conclusion que bon nombre de nos inventions culturelles subissent probablement des contraintes neurophysiologiques comparables à celles identifiées dans le cas des mots. Dans cette hypothèse, radicalement opposée à celle de la plasticité généralisée et du relativisme culturel évoqué en introduction, les inventions culturelles ne sont adoptées que dans la mesure où elles envahissent des régions cérébrales initialement vouées à des fonctions suffisamment proches. Cette hypothèse évoque la notion du « bricolage évolutif » proposé par François Jacob, ou de l'« exaptation » chère à Stephen Jay Gould – la réutilisation, au cours de la phylogénèse, d'organes ou de mécanismes anciens pour des fonctions nouvelles. Dans le cas des objets culturels, cependant, ce recyclage a lieu à l'échelle des quelques semaines ou années, et concerne l'épigénèse et la flexibilité des réseaux neuronaux plutôt que l'évolution du génôme. Il me paraît donc approprié de lui consacrer un nouveau terme : l'hypothèse de la *reconversion neuronale*, selon laquelle chaque objet culturel doit trouver sa « niche écologique » dans le cerveau –

un circuit ou un ensemble de circuits dont le rôle initial est approprié et dont la flexibilité est suffisante pour être reconverti à cette fonction nouvelle.

Soulignons deux prédictions de ce mécanisme de reconversion neuronale. Premièrement, il implique que l'enveloppe génétique de l'espèce humaine définit une architecture cérébrale qui délimite un espace d'objets culturels accessibles. Les variations culturelles que notre espèce est susceptible d'inventer ne sont donc pas illimitées. Au contraire, elles sont étroitement contraintes par les représentations et les mécanismes cérébraux que nous héritons de l'évolution et qui définissent notre nature humaine. Deuxièmement, la difficulté d'apprentissage de tel ou tel concept ou technique nouvelle doit s'expliquer, pour partie, par la difficulté plus ou moins grande de la reconversion cérébrale. Dans le domaine de l'apprentissage de la lecture, par exemple, l'étape de l'écriture en miroir, au cours de laquelle tous les enfants éprouvent à distinguer les lettres p, q, d, et b, pourrait s'expliquer par le fait que notre système visuel calcule automatiquement une invariance de rotation, qui nous est utile pour reconnaître un objet sous tous ses angles, mais qui nous dessert dans le domaine de la lecture. Plus généralement, selon une hypothèse initialement avancée par Jean-Pierre Changeux, le succès instantané, ou au contraire la difficulté d'apprentissage de tel ou tel objet culturel, pourrait s'expliquer par leur adéquation plus ou moins étroite avec les pré-représentations que façonne notre cerveau. Peut-être pourra-t-on, d'ici quelques années, exploiter ces idées afin de mieux comprendre les difficultés scolaires des enfants, par exemple en mathématiques, et de leur proposer des stratégies éducatives mieux adaptées à la structure de leur cerveau.