

**COMPTE RENDU DE L'OUVRAGE DE STANISLAS DEHAENE,
LES NEURONES DE LA LECTURE, introd. Jean-Pierre Changeux,**

Ed. Odile Jacob, 2007

Sylvie Ferrando

Octobre 2007

L'ouvrage de Stanislas Dehaene (dorénavant SD), titulaire de la chaire de psychologie cognitive et expérimentale au Collège de France et membre de l'Académie des sciences, propose ici d'aborder le processus de lecture sous l'angle des neurosciences. Une telle approche, qui s'appuie sur les plus récentes techniques d'imagerie médicale, permet d'éclairer d'un jour nouveau cette activité propre à l'homme, que la plupart des adultes accomplissent le plus naturellement du monde, et dont l'apprentissage est crucial.

La préface de Jean-Pierre Changeux inscrit la démarche de SD dans la droite ligne de "l'homme neuronal", qui étudie le cerveau de l'homme par l'observation des circuits neuronaux.

C'est dans les vingt dernières années, nous dit SD **dans son introduction**, qu'est née une véritable science de la lecture, susceptible de déboucher sur une neuroscience de l'éducation, à la frontière entre la psychologie et la médecine. En effet, rares sont les chercheurs en sciences sociales qui aujourd'hui ont les connaissances nécessaires pour pouvoir appliquer ce programme. La plupart adhèrent à un modèle implicite du cerveau qui est celui de la plasticité généralisée et du relativisme culturel. Or "notre cerveau n'est pas une table rase où s'accumulent des constructions culturelles, c'est un organe fortement structuré qui fait du neuf avec du vieux. Pour apprendre de nouvelles compétences, nous recyclons nos anciens circuits cérébraux de primates – dans la mesure où ceux-ci tolèrent un minimum de changement."

Si nos gènes n'ont pas évolué pour nous permettre d'apprendre à lire, c'est l'écriture qui a évolué afin de tenir compte des contraintes de notre cerveau. Une question demeure : pourquoi l'espèce humaine est-elle la seule, parmi les primates, à avoir inventé des symboles parlés ou écrits ? Deux concepts récents, celui de "théorie de l'esprit" –c'est-à-dire la capacité d'imaginer ce que pensent nos congénères- et celui d'"espace de travail conscient" –un réseau neuronal où les idées se recombinent en synthèses nouvelles- pourraient contribuer à cerner la singularité culturelle de l'esprit humain au sein de l'évolution biologique des espèces. En effet, la lecture est une invention culturelle récente.

Dans le chapitre 1er, SD détaille les mécanismes de la lecture. Tout lecteur dispose d'un capteur, l'oeil et sa rétine. Seule la région centrale de la rétine, la *fovea*, est riche en cellules photoréceptrices de très haute résolution, les cônes. Cette région, qui occupe environ 15 degrés du champ visuel, est la seule à capter les lettres avec suffisamment de précision pour permettre de les reconnaître. Si cette région rétinienne est détruite, la lecture est impossible. L'étroitesse de cette région explique également pourquoi nous bougeons incessamment les yeux au cours de la lecture. Mais, même au sein de la *fovea*, l'information visuelle n'a pas la même précision : maximale au centre, cette précision diminue vers la périphérie. C'est pourquoi la taille des caractères, sous réserve qu'elle n'excède pas un certain seuil, n'influe pas sur la facilité ou difficulté de reconnaissance des lettres.

Nous n'identifions vraiment que de dix à douze lettres par saccade : trois ou quatre lettres à gauche du centre du regard, et sept ou huit lettres à droite. Au-delà de cette zone, appelée empan

de perception visuelle des lettres, nous ne sommes plus sensibles à l'identité des lettres, mais seulement à la présence des espaces qui délimitent le mot suivant : en nous fournissant des indices de longueur, ces espaces nous permettent de préparer la prochaine saccade afin que le regard atterrisse assez près du centre du prochain mot. De plus, notre fenêtre de perception d'une ligne de mot est asymétrique: chez les lecteurs du français, la perception des lettres est biaisée en faveur de la droite, en sorte que nous percevons environ deux fois plus de lettres à droite du point de fixation du regard qu'à gauche. Cette asymétrie provient de la direction de lecture. Chez le lecteur de l'arabe ou de l'hébreu, dont le regard parcourt la ligne de la droite vers la gauche, l'asymétrie de l'empan visuel s'inverse. Les saccades de l'oeil du lecteur chinois sont plus courtes, et l'empan en est réduit d'autant, en raison de la plus grande densité d'information des caractères chinois. Il suffit de 50 millisecondes de présentation pour que la lecture progresse quasiment normalement (ce qui est très rapide). Si les petits mots grammaticaux comme les auxiliaires, les pronoms ou les articles sont parfois esquivés, presque tous les autres mots essentiels au contenu de la phrase (noms, verbes, adjectifs, adverbes) doivent être fixés du regard. La plupart des bons lecteurs, qui lisent aux alentours de 400 à 500 mots par minute, sont proches de l'optimalité.

La taille et la typographie (graisse, forme du caractère) de la lettre imprimée n'influe pas sur la reconnaissance de cette lettre, qui est invariante. De nombreuses expériences montrent également que, dans un temps très bref, et même inconsciemment, notre système visuel extrait les morphèmes des mots : ainsi, le mot fillette sera décomposé en fille-tte. On parle d'effet d'amorçage, car la lecture d'un mot amorce la reconnaissance des mots reliés, un peu comme on amorce une pompe. Ce phénomène d'amorçage est à la fois morphologique/sémantique (comme mer et maritime, lu et lisons) et morphologique/non sémantique, comme bague et baguette, mandarin et mandarine. De même, notre système visuel décompose plus facilement les mots en constituants syllabiques qu'en phonèmes isolés ou dissociés de leur syllable d'appartenance. Il existe en fait deux niveaux d'amorçage, l'un orthographique, l'autre phonologique, distincts mais dont la conversion de l'un en l'autre est extrêmement rapide. Elle serait plus rapide encore si l'orthographe du français était simplifiée. D'autres langues issues du latin, comme l'italien, ont adopté une orthographe plus phonologique. En revanche, le chinois est une écriture morphologique (caractère "simple", de prononciation syllabique) complétée d'un marqueur phonétique, qui donne l'intonation-accentuation). Tous les systèmes d'écriture oscillent entre l'écriture des sens et celle des sons. La plupart des modèles de la lecture postulent que deux voies de traitement de l'information coexistent et se complètent. La meilleure preuve de l'existence de ces deux voies vient de la neuro-psychopathologie : certains patients atteints d'une lésion cérébrale nommée "dyslexie profonde" ou "dyslexie phonologique" ont leur voie de conversion des lettres en sons sévèrement détériorée et ne parviennent plus à prononcer les mots rares, les néologismes et les mots inventés. D'autres patients atteints d'une "dyslexie de surface" doivent prononcer les mots pour les comprendre.

Quant au lexique mental, à entrées multiples (orthographique, phonologique, grammaticale, sémantique), il se compose pour un individu moyen d'environ 40 000 à 50 000 mots –sans même tenir compte des mots composés.

Le chapitre 2, "Le cerveau au pied de la lettre", décrit les régions du cerveau qui sont impliquées dans la lecture, et leur organisation. Dès 1892, le neurologue français Joseph-Jules Déjerine découvre que la lésion d'une partie des aires visuelles de l'hémisphère gauche entraîne la perte sélective et totale de la capacité de lire. Présente au même endroit chez tous les individus et dans toutes les cultures, confirmée par l'imagerie cérébrale, cette aire détecte automatiquement les

mots écrits, même lorsqu'ils sont présentés trop brièvement pour être consciemment détectés. Elle transmet le résultat de cette analyse visuelle à deux grands ensembles de régions, situés dans des lobes temporaux et frontaux, qui représentent respectivement la sonorité et le sens des mots.

Le neurologue Joseph-Jules Déjerine se trouve confronté en 1887 à un patient qui présente un trouble sélectif de reconnaissance des lettres (il reconnaît toujours les chiffres et son écriture reste à peu près intacte). Il s'agit d'une alexie pure. Des expériences ont montré que c'était la partie arrière de l'hémisphère gauche qui était lésée (la région occipito-temporale gauche).

Il y a au moins trois manières dont les lésions peuvent empêcher le bon fonctionnement de la région de la forme visuelle des mots : lorsqu'une lésion la détruit directement, lorsqu'elle est déconnectée en amont, c'est-à-dire coupée de ses entrées visuelles, ou encore lorsqu'elle est déconnectée en aval, et ainsi empêchée de transmettre le résultat de ses calculs à d'autres régions cérébrales. Selon Petersen et al. (1989), les aires cérébrales mises en évidence pour la première fois en 1988 par la caméra à positons (tomographie par émission de positons) sont les suivantes : par rapport à la fixation d'un point, la lecture muette (en haut à droite) active les processus de reconnaissance visuelle des mots situés dans la partie arrière de l'hémisphère gauche, tout particulièrement les régions occipitales et la région occipito-temporale ventrale. L'information est ensuite transmise, selon la tâche, aux régions impliquées dans la représentation du son (en haut à gauche), de l'articulation (en bas à gauche) ou du sens (en bas à droite).

L'IRM fonctionnelle, autre méthode, permet de localiser les régions activées lors de la lecture. Les participants lisent mentalement des mots présentés à un rythme aléatoire. Parmi le réseau activé, la région de la forme visuelle des mots apparaît systématiquement aux abords du sillon occipito-temporal latéral gauche, sur la bord de la circonvolution fusiforme.

D'après Ishai et al. (2000), et Puce et al. (1996), la lecture, c'est-à-dire la reconnaissance des mots écrits, active une aire occipito-temporale toujours située entre les réponses aux visages et les réponses aux objets. Mais l'IRM et le TEP sont des méthodes d'exploration qui introduisent un délai entre le débit sanguin et sa réception, et donc une imprécision. L'électro-encéphalographie (EEG) et la magnéto-encéphalographie (MEG) permettent d'obtenir des mesures plus précises, à l'extérieur de la boîte crânienne.

D'après Allison et al. (1999), la reconnaissance des visages est traitée préférentiellement dans la région occipito-temporale droite, et les mots dans la gauche.

Quelle que soit leur position sur la rétine, les mots que nous lisons convergent vers la région occipito-temporale de l'hémisphère gauche (invariance spatiale). Dans cette expérience, les participants lisent des mots présentés à gauche ou à droite du point de fixation du regard. On sait que les mots présentés à gauche de l'écran sont traités initialement par l'hémisphère droit, et vice-versa. Vers 150-170 ms après l'apparition du mot, une première onde apparaît du côté opposé au mot et est associée à l'activation d'une région visuelle située en arrière du cerveau et appelée l'aire V4. Vers 180-200 ms, une seconde onde apparaît, toujours du côté gauche. L'IRM confirme la convergence de l'activation vers la région occipito-temporale ventrale de l'hémisphère gauche (le corps calleux, épais réseau de connexions nerveuses). Les mots écrits peuvent être reconnus de façon non consciente ou subliminale. Dans cette expérience un mot est présenté pendant 29 ms et pris en sandwich entre d'autres formes, ce qui le rend totalement invisible (effet d'amorçage). Pourtant, ce mot non conscient accélère les réponses des participants lorsqu'il apparaît ensuite de façon consciente. L'imagerie cérébrale montre que la région occipito-temporale gauche est responsable de cet effet d'amorçage : son activité diminue lorsque le même mot est répété, même quand sa typographie est modifiée (Dehaene et al., 2001). On sait que les neurones sont sensibles à la répétition : leur taux de décharge diminue rapidement lorsque l'on répète plusieurs fois la même image, tandis qu'il remonte à un niveau élevé lorsqu'une

image nouvelle est présentée. Le plus bas niveau, celui du traitement des lettres, est observé dans la partie arrière de la région occipito-temporale, et ce dans les deux hémisphères. A ce niveau, seules sont codées les lettres isolées. Un niveau plus avancé d'invariance perceptive est atteint dans la région immédiatement antérieure de l'hémisphère gauche, un cm plus en avant. Cette région repère la ressemblance entre des mots comme TREFLE et reflet. Toutefois, seule la région occipito-temporale gauche reconnaît l'invariance entre g et G. Son homologue de l'hémisphère droit reconnaît la ressemblance entre les mots de typographie identique SOUK et souk, mais pas entre ERG et erg (en raison de la graphie différente entre capitales et bas de casse). Les Français repèrent plus vite les mots qui ont un sens plutôt que les suites de lettres ou les suites de chiffres. Il y a imprégnation culturelle du cortex lors de l'apprentissage de la lecture. Mais c'est la même région qui est activée quelle que soit la langue écrite (alphabet latin, caractères chinois ou japonais...).

Grâce à la magnéto-encéphalographie, on a pu voir que, selon qu'on entende ou qu'on lise un mot, les voies d'entrée dans le cortex diffèrent, mais l'activité converge ensuite vers les mêmes aires du langage. Durant la lecture, l'activation débute dans le pôle occipital, vers 100 ms, puis vers 170 ms elle s'étend à la région occipito-temporale gauche, siège presumé de l'analyse de la forme visuelle du mot. Survient ensuite une explosion d'activité dans de multiples régions temporales et frontales partagées avec l'audition des mots (Marinkovic et al, 2003).

Les psychologues postulent deux voies de lecture : - les mots réguliers et les néologismes sont reconnus par une voie de traduction des lettres en sons (conversion graphème-phonème) ; - les mots fréquents ou irréguliers sont identifiés dans un lexique mental qui donne accès à l'identité et au sens des mots.

Des expériences récentes montrent que les deux voies de lecture postulées par les psychologues correspondent bien à deux réseaux distincts d'aires cérébrales (celui du son et celui du sens). C'est la région temporale supérieure qui intervient dans la conversion des lettres en sons. L'imagerie cérébrale (IRM) distingue les régions visuelles (dans l'hémisphère gauche) activées par la vision d'une lettre, et les régions auditives activées par l'écoute d'un son (dans l'hémisphère droit). Mais toute une partie du cortex temporal supérieur est multimodale, c'est-à-dire qu'elle s'active autant par l'écrit que par l'oral (dans l'hémisphère droit). Une région supérieure du lobe temporal, connue sous le nom de *planum temporale*, réagit à la compatibilité entre les lettres et les sons : l'écoute d'un son compatible avec la lettre (o et 'o') augmente l'activité de cette région, alors qu'un conflit entre la lettre et le son (a et 'o') se traduit par une réduction d'activité. Grâce à la MEG on sait que cette conversion des lettres en sons débute dès 225 ms après l'apparition de la lettre sur la rétine, et la compatibilité avec le son est reconnue après 400 ms environ. Le *planum temporale* est probablement l'une des aires cérébrales les plus importantes pour le traitement du langage parlé. C'est une région asymétrique : sa surface est plus importante dans l'hémisphère gauche que dans l'hémisphère droit. Chez le bébé, le *planum temporale* est activé par la parole, dans l'hémisphère gauche, dès les premiers mois de la vie. Cette région "apprend" à prêter attention aux sons pertinents et à négliger ceux qui ne seront pas utiles dans la langue. La région pariétale inférieure qui se situe juste au-dessus du *planum temporale* forme vraisemblablement, avec une partie de l'aire de Broca (la région operculaire), un circuit qui s'active lorsque nous prononçons mentalement les mots. Ce circuit fait partie d'une boucle articulaire interne, que nous utilisons lorsque nous nous répétons des sons en mémoire, pour retenir un numéro de téléphone ou pour décrypter, syllable par syllable, un mot compliqué, par exemple le nom scientifique de l'aspirine, 'acide acétyl-salicylique'.

Les régions cérébrales activées lors de l'analyse du sens des mots (l'arrière de la circonvolution temporale moyenne, la face ventrale antérieure du lobe temporal et la partie triangulaire de la

région frontale inférieure) interviennent également lorsque nous réfléchissons aux relations conceptuelles entre les mots parlés ou même entre les images (ex. : association sémantique entre l'image d'un palmier et d'une pyramide, qui font partie du même champ lexical [et non sémantique, comme le dit SD], celui du désert. Une des particularités de ces aires cérébrales du sens est d'être actives avant même que l'on ait demandé au participant d'effectuer un travail mental. La région temporo-pariétale, notamment, est déjà activée dans l'état de repos, et se "désactive" en-dessous de son niveau initial, quand on présente des pseudo-mots dépourvus de sens. La région temporale gauche, elle, est moins active, en réponse à des synonymes (par ex. 'sofa' et 'canapé', dans une expérience où l'un des mots est présenté sous forme d'amorçage subliminal et l'autre visible) qu'à des paires de mots sans lien particulier (comme 'miel' et 'canapé').

Résumons : La région occipito-temporale ne s'intéresse qu'aux chaînes de lettres ; elle diminue en activité dès que les mots se ressemblent sur le plan visuel (ex. chasseur/chasse, mais aussi menteur/menthe) et elle ne change pas d'activité en réponse à des synonymes tels que 'sofa/canapé'. Son activité diminue pour 'sofa/canapé' et pour 'chasseur/chasse', mais pas dans le cas d'une relation superficielle entre les mots présentés (menteur/menthe).

Mon commentaire : bizarre, on pouvait penser que plus les lettres sont différentes entre elles, plus l'activité neuronale doit être importante.

D'autres études confirment que la région temporale moyenne code le sens des mots. Par exemple, chez les lecteurs japonais, elle est la seule à reconnaître qu'un même mot est écrit dans deux notations différentes, en kanji et en kana, alors que leurs formes écrites n'ont rien de commun sur le plan visuel.

Dans le domaine du sens, la neurologie n'en est qu'à ses balbutiements et l'humilité est de mise. La sémantique fait vraisemblablement appel à de très vastes populations de neurones distribuées dans toutes les régions du cortex, et qui fonctionneraient comme des "zones de convergence" (Antonio Damasio). Ainsi, le mot 'mordre' évoque les parties du corps qu'il mobilise, l'action ou le mouvement, peut-être le cri et le sentiment de douleur chez la victime. La région temporale latérale joue un rôle essentiel dans cette médiation entre forme des mots et éléments de sens qu'ils évoquent. Elle se subdivise vraisemblablement en de multiples sous-régions, selon la région particulière de mots à laquelle nous accédons –visages, personnes, animaux, outils... Toutes ces catégories sont associées à des territoires distincts, chargés de collecter des fragments de sens d'origine différentes, eux-mêmes répartis ailleurs : dans la région pariétale pour les nombres ou les parties du corps, dans le cortex occipital pour les couleurs (V4), dans la région V5 pour les mouvements, dans le cortex précentral antérieur pour les actions et les gestes, dans l'aire 10 de Brodmann pour l'interprétation des intentions et des croyances d'autrui, dans le pôle temporal pour les noms propres, etc. C'est l'imagerie cérébrale appliquée à la neuropathologie qui a permis de mettre en évidence les localisations particulières de telle ou telle compétence. La MEG permet aujourd'hui (Panegidis et al.) de montrer que les pseudo-mots ('traphe' ou 'glos'), les pseudo-homophones ('graut' [et non 'grau' qui a un sens en français] ou 'taite') et les mots authentiques et fréquents à la prononciation irrégulière, tels 'oignon' ou 'femme', après un traitement initial semblable, activent des aires différentes : les pseudo-homophones et les pseudo-mots activaient principalement la région temporale supérieure et particulièrement la *planum temporale*, siège des aires auditives et notamment de la prononciation des sons du langage. Les mots irréguliers, quant à eux, activaient la région temporale moyenne, siège des "zones de convergence" sémantiques, et c'est seulement ensuite qu'ils donnaient lieu à une seconde vague d'activité dans les aires auditives. Les régions sémantiques ne s'activaient guère en face de pseudo-mots ; en revanche, elles s'activaient fortement, quoique tardivement, lors de la

présentation d'homophones de mots existants, tels que 'taite'.

L'imagerie cérébrale permet de répondre à l'une des questions fondamentales de la psychologie de la lecture : doit-on toujours prononcer les mots mentalement avant de les comprendre ? Ou peut-on passer directement des lettres à la signification des mots sans qu'il soit nécessaire de les prononcer ? En fait, ces deux voies de lecture coexistent. Selon les mots que nous lisons, nous (notre cerveau) empruntons de préférence l'une ou l'autre de ces voies.

En relation avec la transparence orthographique de la langue (par ex. l'italien, langue phonologique, par rapport à l'anglais, à l'orthographe opaque, où la même suite de lettres 'ough' peut se prononcer très différemment selon les contextes), l'italien facilite l'accès direct aux aires auditives du lobe temporal, alors que l'anglais sollicite un peu plus la région de la forme visuelle des mots et la région frontale inférieure gauche. A l'un des extrêmes de cette échelle de transparence figurent les écritures chinoises et japonaises (très peu de correspondance grapho-phonologique).

Toutefois, il ne s'agit que de modulations des mêmes circuits universels. Les écritures qui dénotent principalement les mots, et non les sons (dont le kanji et les caractères chinois) conduisent à une activation supérieure des régions impliquées dans la représentation du sens (en particulier la région temporale postérieure gauche). D'autres écritures, qui dénotent principalement les sons – écritures alphabétiques, pinyin, kana-, tendent à activer plus directement les régions auditives où sont représentés les sons du langage (particulièrement la région temporale supérieure gauche et le gyrus angulaire). Mais la même différence se retrouve au sein des écritures alphabétiques. Et, au sein du français, entre les mots irréguliers tels que 'choeur', qui amplifie l'usage de la voie lexico-sémantique, et les mots réguliers ou nouveaux, comme 'acide acétyl-salicylique', où nous empruntons la voie de conversion graphème-phonème qui passé par le lobe temporal supérieur, comme le ferait un lecteur italien.

Dans le **chapitre 3**, SD se demande si notre cerveau est "prédisposé" à la lecture, alors que l'invention de l'écriture est bien trop récente pour que notre génôme s'y soit adapté. Chez nos cousins primates, à quoi servent les régions cérébrales que nous dévouons à la lecture ? On sait que l'homme a une évolution parallèle à celle du singe. Or le cortex temporal inférieur du singe macaque abrite une hiérarchie de neurones qui répondent à des fragments de scènes visuelles. Certains neurones répondent même déjà à des formes proches de celles des lettres (T, Y, L), invariants utiles à la reconnaissance des contours des objets. Lorsque nous, humains, apprenons à lire, une partie de cette hiérarchie neuronale se reconvertit afin de reconnaître la fin des lettres et des mots.

Ainsi, on ne peut comprendre les circuits de la lecture qu'en les rapprochant des réseaux de neurones qui, chez les autres primates, servent à la vision. Ces réseaux ne sont pas fondamentalement différents chez l'homme, mais nous les recyclons en vue d'un autre usage. Les singes macaques ont des neurones spécialisés dans la reconnaissance d'objets : ainsi, il n'est pas rare qu'un neurone ne réponde qu'à un seul visage ou à un seul objet parmi plusieurs dizaines. Les neurones marquent ainsi des préférences. Le problème de l'invariance visuelle semble résolu au niveau des neurones du cortex temporal inférieur, c'est-à-dire que l'activité neuronale ne change guère lorsque l'objet préféré s'éloigne, se déplace, change d'éclairage ou d'orientation. Ces mécanismes pré-existent à l'apprentissage de la lecture – ce sont eux qui nous permettent de reconnaître un mot indépendamment de sa position sur la page.

Selon un modèle hiérarchique (l'image mentale est progressivement recomposée par une pyramide hiérarchique de neurones), le code neural d'un objet est constitué d'une mosaïque hiérarchique de neurones qui élisent cet objet parce qu'ils en ont reconnu certains traits. Ainsi des

neurones voisins sur la surface du cortex ont tendance à coder pour des formes similaires, par exemple des variantes de la forme en T, des formes en 8, en étoile, au profil élémentaire d'un visage... Ces formes simples forment des protolettres, elles sont profondément inscrites dans nos cerveaux de primates. Ces formes sont non accidentelles et invariantes (comme les droites parallèles).

La reconnaissance des objets repose donc sur un code combinatoire, un alphabet cortical de formes. Cet alphabet est-il inscrit dans les gènes ou résulte-t-il d'un apprentissage ? les visages, les yeux, les jonctions en T pourraient faire partie d'un lexique inné de formes. D'un point de vue évolutif, elles confèreraient à l'organisme, dès la naissance, un immense avantage dans l'interaction rapide avec son environnement et son entourage.

Il est néanmoins probable que la majorité des neurones responsables de la reconnaissance des objets reçoivent leurs propriétés d'une interaction forte avec le monde extérieur, et donc d'un apprentissage. Il n'est donc certainement pas fortuit d'enseigner la lecture à un âge où le cerveau est très plastique. En immergeant les enfants dans un environnement artificiel fait des lettres et des mots, nous réorientons bon nombre de leurs neurones du cortex temporal inférieur afin qu'ils codent de façon optimale l'écriture. De nombreuses expériences ont effectivement montré que, lorsqu'un singe est entraîné à discriminer des objets nouveaux, de nombreux neurones se mettent progressivement à y répondre de façon préférentielle. A l'intérieur du répertoire des formes possibles, seules celles que nous avons rencontrées par le passé sont représentées explicitement par des "neurones de conjonction". Les autres combinaisons restent disponibles, mais à l'état de simples potentialités : tant que l'apprentissage n'a pas eu lieu, ces combinaisons ne sont pas rendues explicites par des neurones de niveau supérieur. L'acquis s'appuie ainsi sur l'inné, et est limité par lui. Ainsi, pendant l'enfance, des mécanismes génétiques rigides ouvrent, brièvement, une étroite fenêtre de plasticité dans le système visuel. Cette période, qui dure quelques semaines chez le chat, quelques mois chez les primates non humains et quelques années chez l'homme, permet aux neurones de détecter l'apparition de la même image à des points suffisamment proches de l'oeil gauche et de l'oeil droit. A la fin de cette période critique, le circuit est figé. Les enfants qui louchent durant cette période perdent définitivement l'usage de la stéréopsie, c'est-à-dire l'exploitation du décalage des images issues des deux yeux pour voir en trois dimensions. La plasticité du cortex temporal inférieur, qui nous permet d'apprendre de nouveaux objets, n'est pas fondamentalement différente, même si elle s'étend tout au long de notre vie.

Notre cerveau est construit afin que certaines coïncidences suspectes –alignement de plusieurs barres sur la rétine, présence de jonction en T ou en L, sequences reproductibles d'images, etc.- soient extraites et internalisées dans l'architecture du cortex temporal ventral.

Le cerveau du jeune enfant, lorsqu'il arrive à l'école, est déjà préparé à la reconnaissance des lettres et des mots. Il sait déjà reconnaître des "protolettres". Notre cortex n'est ni une ardoise vierge, ni un organe rigide qui, au cours de l'évolution, aurait dédié un "module" à la lecture. Il ressemble plutôt à un kit de bricolage. Le concept darwinien qui vient à l'esprit est celui d'"exaptation" (Steven Jay Gould), qui désigne la réutilisation, au cours de l'évolution des espèces, d'un mécanisme biologique ancien dans un rôle complètement différent de celui qu'il possédait initialement. Le concept d'exaptation a été développé par François Jacob dans un article célèbre : l'évolution y est envisagée sous les traits d'un bricoleur inventif qui accumule dans son garage un bric-à-brac de planches, de ferrailles et de rouages, et les assemble pour former une machine nouvelle. L'invention culturelle relèverait d'un mécanisme similaire, à une vitesse bien plus grande que celle de l'évolution biologique : l'invention d'objets culturels ne prend que quelques semaines ou quelques mois. SD introduit le concept de "recyclage neuronal", qui joue un rôle essentiel dans la stabilisation de ce que nous appelons la culture, c'est-à-dire

l'ensemble des représentations mentales partagées qui caractérisent un groupe d'humains. Selon l'évolutionniste Richard Dawkins, la culture est transmissible, sous la forme de "briques" d'informations culturelles. Mais ce modèle "mémétique" est caricatural (Dan Sperber), essentiellement lamarckien, et présuppose que l'enfant ne fait qu'imiter son entourage. La sélection culturelle est amplifiée, dans l'espèce humaine, par son caractère intentionnel. Comme le souligne le primatologue David Premack, *Homo sapiens* est le seul primate capable de pédagogie, dans la mesure où lui seul sait prêter attention aux connaissances et aux états mentaux d'autrui à des fins d'enseignement. Selon Dan Sperber, la propagation d'une invention culturelle s'apparente plus à une épidémie qu'à une imitation. L'écriture est l'une de ces "épidémies culturelles". Ce n'est pas notre cortex qui a évolué pour permettre la lecture, ce sont les systèmes d'écriture qui ont évolué pour permettre à notre cerveau de primate de s'y adapter.

La géographie détaillée des neurones du lecteur reste à découvrir, les techniques actuelles d'imagerie ne permettant pas de descendre à l'échelle minuscule du neurone. Il est probable que la combinaison de lettres la plus utile à détecter, après la lettre, est le bigramme –une paire ordonnée de lettres, comme 'en'. Le modèle de SD prédit donc l'existence de neurones très particuliers, les "neurones bigrammes", qui devraient présenter la particularité de répondre à tous les mots qui contiennent une certaine paire de lettres, même lorsqu'il y a une ou deux lettres intermédiaires qui sont insérées dans la paire ou lorsque les lettres sont interverties. Pour que le bigramme soit déchiffré et reconnu, il faut également que l'espacement entre les lettres soit modéré (moins de deux lettres).

Combien de neurones pour la lecture ? Sachant qu'il y a 26 lettres en français et une vingtaine de positions rétinienne où les lettres sont reconnaissables, on arrive au chiffre approximatif de 500 détecteurs corticaux de lettres (un demi-cm² de cortex). Si l'on prend en compte les 200 bigrammes les plus fréquents et les quelque 500 combinaisons de bigrammes du français, on triple cette surface de cortex.

Dernière énigme : pourquoi la région de la forme visuelle du mot se sépare-t-elle d'autres régions consacrées aux visages ou aux objets et pourquoi se retrouve-t-elle chez tous les individus dans le sillon occipito-temporal ? enfin, pourquoi dans l'hémisphère gauche ? Il se trouve qu'un vaste gradient de spécialisation corticale traverse l'ensemble du cortex visuel ventral : les régions latérales répondent mieux aux images présentées au centre de la rétine, la *fovea*, tandis que les régions situées au centre du cerveau répondent mieux aux images présentées en périphérie de la rétine. De plus, les régions les plus antérieures du cortex visuel préfèrent les objets complexes et structurés (ce qui explique la localisation dans le pôle occipital). Enfin, le système visuel de l'hémisphère gauche est meilleur pour la discrimination des petites formes locales, tandis que le droit préfère les formes globales. Il se pourrait aussi que l'apprentissage de la lecture sélectionne les régions visuelles dont les projections vers les aires du langage (situées dans les régions temporales et frontales de l'hémisphère gauche) sont les plus nombreuses et les plus directes, donc les plus rapides (*i. e.* la région occipito-temporale). En cas d'ablation chirurgicale de la région occipito-temporale gauche au cours des années d'apprentissage de la lecture, c'est la région symétrique de l'hémisphère droit qui prend le relais.

Le chapitre 4, 'L'invention de la lecture', narre la façon dont l'écriture humaine a pu s'adapter aux neurones de la lecture. Il existe des traits de parenté entre toutes les écritures : la forme des lettres ou des caractères permet à notre cerveau de les déchiffrer.

Quelques traits communs :

- toutes les écritures présentent à la *fovea* de la rétine une haute densité de traits contrastés, souvent noirs sur fond blanc ;

- toutes les écritures utilisent un petit répertoire de formes de base, dont la combinatoire hiérarchique génère des sons, des syllabes et des mots ;
- toutes les écritures considèrent comme acquis que la taille et la position absolues des caractères n'ont pas d'importance, mais les caractères doivent toujours être orientés dans le même sens ;
- la plupart des écritures, enfin, dénotent à la fois des éléments de son et de sens, la taille de l'unité sonore pouvant aller du mot ou de la syllabe tout entière jusqu'au phonème.

Une régularité majeure des systèmes d'écriture est que presque tous les caractères sont formés d'environ 3 traits (des segments de droites ou des courbes que l'on peut dessiner sans s'arrêter ni lever le crayon). En français, T ou P ont deux traits, F ou N trois traits, M ou W quatre traits. Sur le plan visuel, toutes les écritures semblent fondées sur une grande pyramide hiérarchique dont le nombre d'or est 3, plus ou moins 1.

Les cultures sélectionnent des objets dont l'apprentissage requiert le minimum de reconversion cérébrale. Des "protolettres" codées au plus profond du cortex temporal des primates, aux caractères d'aujourd'hui, reconnus par l'homme, le recyclage neuronal a fonctionné. Notre cerveau de primate n'admet qu'un petit jeu de formes écrites. En effet, l'écriture picto ou logographique, où chaque mot possède son propre symbole, a bien souvent évolué pour devenir morpho-phonologique, en raison de l'impossibilité à mémoriser une telle quantité de symboles (chacun d'entre nous maîtrise au moins 50 000 mots). Dans la Chine contemporaine, ce sont plusieurs milliers de caractères que le lettré chinois doit apprendre, ce qui en fait l'une des écritures les plus difficiles au monde. Les premières écritures alphabétiques datent de 1700 avant notre ère, et elles ont essaimé tout autour du bassin méditerranéen.

Le chapitre 5, 'Apprendre à lire', détaille les étapes de l'apprentissage de la lecture du jeune enfant. Celui-ci passe par trois grandes phases : l'étape picturale, brève période où l'enfant "photographie" quelques mots ; l'étape phonologique, où il apprend à décoder les lettres en sons ; et l'étape orthographique, où s'automatise la reconnaissance des mots. L'imagerie cérébrale montre que plusieurs circuits cérébraux se modifient, notamment ceux du cortex occipito-temporal gauche. L'apprenti lecteur se livre à un processus de "tâtonnement cérébral", qui reproduit en quelques années les essais et erreurs qui ont ponctué l'évolution culturelle millénaire de l'écriture. Les circuits visuels et linguistiques de l'enfant sont stimulés, et ce depuis sa naissance. La lecture devrait progressivement converger vers la région occipito-temporale gauche.

Selon la psychologue Uta Frith, la première étape de la lecture, qui survient vers 5 ou 6 ans, est logographique ou picturale. L'enfant parvient à reconnaître son prénom, son nom de famille et d'autres mots (comme des marques publicitaires à la forme visuelle saillante). Mais il a du mal à reconnaître ces mêmes mots dans une typographie différente. Pour progresser, l'enfant doit développer la deuxième voie de lecture, celle qui associe chaque chaîne de lettres à sa prononciation par une procédure de conversion des graphèmes en phonèmes. C'est l'étape du b-a ba, avec une attention particulière portée aux graphèmes complexes (ch, eau, str, sp, ct, etc.). L'enfant acquiert alors une conscience phonémique. Celle-ci est acquise également par les petits Chinois, lorsqu'ils apprennent le pinyin, l'écriture phonétique de leurs caractères. La troisième étape, l'étape orthographique, permet à l'enfant de mettre en place un vaste répertoire d'unités visuelles de taille variable. A cette étape, les mots rares sont lus plus lentement que les autres, déjà connus.

Selon le modèle du recyclage neuronal, on devrait voir apparaître, à chacun de ces trois niveaux, une spécialisation grandissante du système visuel. Les obstacles à la validation de cette hypothèse sont de nature expérimentale (manque de précision des outils et jeunesse du patient). Toutefois,

on sait que les résultats obtenus par l'adulte expert en matière de lecture ne sont atteints par le cerveau de l'enfant lecteur qu'au début de l'adolescence – à condition bien sûr que l'enfant lise suffisamment pour devenir expert.

Des expériences menées sur une population illettrée montrent que l'alphabétisation modifie l'anatomie du cerveau : le corps calleux s'épaissit dans sa partie postérieure qui connecte les régions pariétales des deux hémisphères. Ce phénomène est lui-même responsable de l'augmentation de l'empan de mémoire : l'apprentissage de la lecture augmente la mémoire.

Une question sans doute pertinente, mais à laquelle on n'a pas de réponse fiable est : que perdons-nous lorsque notre cerveau apprend à lire ? Avons-nous acquis des compétences au détriment d'autres, que possédaient nos ancêtres chasseurs-cueilleurs ?

Selon certaines données, l'apprentissage de la lecture entre en compétition avec d'autres représentations corticales ? Par exemple, les synesthésies, c'est-à-dire le fait que les modalités sensorielles ne soient plus étanches, mais s'activent l'une l'autre (voir des couleurs ou des mouvements lorsqu'on entend des voix ou de la musique, associer un halo de couleur à certaines lettres ou certains chiffres...). La plupart des synesthètes sont des personnes équilibrées parmi lesquelles on trouve aussi bien des artistes (Rimbaud, Baudelaire, Kandinsky, Messiaen, Nabokov) que des scientifiques (Richard Feynmann, Nikola Tesla). Dans ce cas, le recyclage neuronal est "imparfait", et l'activation de certaines aires corticales n'est pas dissociée : la reconnaissance des lettres ou des chiffres active également l'aire V4 dédiée aux couleurs. Peut-être tous les enfants sont-ils synesthètes, cette compétence disparaissant avec l'expertise en lecture.

La querelle des méthodes de lecture a permis de mettre en évidence récemment l'illusion d'une lecture globale. Un article récent recense au moins quatre observations fallacieuses concernant la lecture globale.

1. Le temps de lecture d'un mot ne dépend pas du nombre de lettres qu'il contient. Nous mettons autant de temps à lire les mots de 3 lettres que ceux de 8 lettres, mais ce n'est pas parce que nous traitons les mots comme des ensembles, mais parce que nous avons la capacité de traiter simultanément les lettres de mots de ces longueurs. De plus, chez l'enfant, pendant la période d'apprentissage, le temps de lecture est strictement proportionnel au nombre de lettres.

2. La reconnaissance d'un mot peut être plus rapide ou plus efficace que celle d'une lettre seule. Cet "effet de supériorité lexicale" n'est plus considéré comme la preuve que la reconnaissance globale du mot précède l'extraction de ses lettres. "Au contraire, la lecture d'un mot dans du bruit se déduit directement du taux de reconnaissance de chacune de ces lettres."

3. La lecture des mots en minuscules est légèrement plus rapide que celle des mots en majuscules. Celui-ci est probablement dû à la moindre familiarité du lecteur avec les majuscules, il n'y a aucune raison d'ordre neurologique.

4. Les erreurs typographiques qui respectent le contour global du mot sont moins faciles à déceler que celles qui le violent. Ex. : l'orthographe erronée 'tesf' mieux détectée que 'tesg', à la place de 'test'. C'est l'extrême automatisé de notre processus de lecture qui nous donne cette illusion. En réalité, cela joue peu.

La lecture globale n'est plus aisée que la décomposition syllabique que pour les 20 ou 30 premiers mots reconnus par un système cortical, enfant ou adulte (l'expérience a été faite sur des adultes avec un nouvel alphabet). L'identification des lettres et des graphèmes, si elle demande initialement plus d'efforts, donne de meilleurs résultats à moyen et long terme. De plus, l'imagerie cérébrale met en évidence que la lecture globale active une région de l'hémisphère droit, région inappropriée, diamétralement opposée à celle de la lecture experte.

Les régularités de l'orthographe, ainsi que la généralisation de la procédure de lecture à des mots

nouveaux, ne peuvent être apprises que grâce aux correspondances établies entre graphèmes et phonèmes. Plus vite l'étape du décodage est automatisée, mieux l'enfant peut se concentrer sur le sens du texte.

La transparence grapho-phonologique d'une langue est un indicateur de rapidité d'apprentissage de la lecture pour la population : en quelques mois, un enfant finlandais ou italien sait lire n'importe quel mot de sa langue, il ne fera pas de dictée ni n'apprendra à épeler les mots. A l'inverse, les enfants français, danois et surtout anglais mettront plusieurs années à converger vers une lecture efficace. "Même à 9 ans, un enfant français ne lit pas aussi bien qu'un petit Espagnol de 7 ans, et il faut près de deux ans d'enseignement supplémentaire pour qu'un petit Anglais atteigne enfin le niveau d'un enfant français."

Le chapitre 6 étudie le cerveau dyslexique. La majorité des cas de dyslexie est liée à un défaut de manipulation mentale des phonèmes. Le cerveau des enfants dyslexiques présente plusieurs anomalies caractéristiques : l'anatomie du lobe temporal est désorganisée, sa connectivité est altérée, son activation au cours de la lecture est insuffisante. Une forte composante génétique est impliquée et quatre gènes de susceptibilité ont été identifiés, dont on suppose qu'ils affectent la mise en place des neurones du cortex temporal au cours de la grossesse. Mais la dyslexie n'est pas incurable.

Aujourd'hui, on estime qu'entre 6% et 8% des enfants français de CE1 souffrent de dyslexie. Ce chiffre semble alarmant, mais la frontière entre lecture 'normale' et 'anormale' est difficile à tracer. La dyslexie se définit comme une difficulté disproportionnée d'apprentissage de la lecture, qui ne peut s'expliquer ni par un retard mental, ni par un déficit sensoriel, ni par un environnement social ou familial défavorisé. Ainsi, tous les mauvais lecteurs ne sont pas des dyslexiques. Il y a une origine cérébrale à ce handicap, et des familles "à risques". La dyslexie possède sans doute de fortes bases génétiques, mais ce n'est pas une maladie monogénique, liée à la mutation d'un seul gène. La majorité des enfants dyslexiques souffre en fait de troubles du traitement des phonèmes et de la conscience phonémique, donc d'un déficit de l'analyse des sons du langage parlé. Les enfants dyslexiques présentent des différences très prononcées aux tests de conscience phonémique qui évaluent, par exemple, la sensibilité aux rimes ou la segmentation en phonèmes. En effet, la mesure précoce des compétences phonologiques permet de prédire les scores ultérieurs de lecture des enfants. Chez certains enfants, le déficit linguistique (retard de parole ou retard de langage) est si manifeste que l'on parle de dysphasie. Parfois, on observe aussi des déficits de la perception visuelle chez les enfants dyslexiques (ordre temporel, perception du mouvement ou du contraste), mais ce dysfonctionnement est souvent additionnel, et moins représentatif de la dyslexie que les troubles de la discrimination auditive. Enfin, chez les enfants chinois, la dyslexie est liée à des troubles de la mémoire grapho-motrice, en raison du nombre élevé de caractères distincts (au moins 3000) à mémoriser pour la lecture, mémorisation qui a lieu par le tracé des caractères.

Tous ces dysfonctionnements sont le fait d'une sous-activation du lobe temporal gauche : le cortex temporal latéral et une région temporale plus inférieure qui appartient à la voie visuelle ventrale. La première région, siège du traitement des informations phonologiques du langage parlé, entraînerait une sous-activation de la seconde, siège de la forme visuelle des mots. Mais d'où viennent ces déficits ? Il serait possible que la migration neuronale ait été altérée chez les dyslexiques et que les neurones aient migré vers la surface du cortex, dépassant leur position normale (présence d'ectopies). Grâce à un modèle animal, on a pu mettre en évidence que, autour du sixième mois de grossesse de la femme, des perturbations de la migration neuronale chez le fœtus entraînaient en cascade des anomalies secondaires des régions sensorielles du thalamus.

Bien que génétiques, de telles anomalies peuvent être corrigées par la rééducation orthophonique et l'accompagnement psychologique et pédagogique de l'enfant dyslexique. Ainsi, maximiser chez l'enfant l'attention et les émotions positives peut amplifier l'apprentissage. Les jeux sur ordinateur sont recommandés.

Le chapitre 7, 'Lecture et symétrie', étudie comment la symétrie, qui fait partie des compétences essentielles du système visuel en facilitant la reconnaissance des objets indépendamment de leur orientation, doit être "désapprise" pour permettre la lecture.

Les enfants, dont le système visuel est très tôt performant pour la reconnaissance des formes en miroir, peuvent avoir des difficultés à écrire les lettres dans le bon sens. En fait, une étape de l'évolution corticale montre que vers 5-6 ans chaque enfant peut écrire son prénom dans les deux sens à partir d'un axe de symétrie central. Cette étape est normalement transitoire et le sens de l'écriture est acquis à partir de 6 ans chez les petits Français scolarisés. Mais des difficultés de repérage lors de la lecture peuvent subsister. Si l'architecture de notre système visuel est, en règle générale, favorable à la lecture, la symétrie est en revanche une propriété qui gêne la lecture en nous faisant confondre les lettres 'p' et 'q', 'b' et 'd' [ou encore 'd' et 'q' ou 'b' et 'p' ; pour ma part, ma main confond encore parfois –rarement- 'd' et 'q']. Cela n'est pas spécifique à l'espèce humaine : les animaux aussi "confondent" la droite et la gauche, sur une partie de leur corps par exemple. Lorsque nous humains reconnaissons une image, nous savons aussi reconnaître sa forme inversée symétriquement. Le modèle de la vision que proposait Orton en 1925 est toujours valable sur un point : les cartes visuelles qui occupent les régions occipitales des hémisphères gauche et droit sont bien organisées en miroir l'une de l'autre. Mais là où il se trompait, c'est que dans la région visuelle primaire il n'y a pas de duplication dans les deux hémisphères des images perçues : on sait aujourd'hui que la moitié gauche du champ visuel se projette dans l'hémisphère droit, et la moitié droite se projette dans l'hémisphère gauche. Ainsi, lorsque nous voyons un 'p' dans la partie droite du champ visuel, c'est seulement l'aire visuelle primaire de l'hémisphère gauche qui code ce 'p' (son homologue dans l'hémisphère droit est inactive). L'enfant doit désapprendre le fait que 'b' et 'd' sont les deux représentations inversées du même objet. Les dyslexiques n'échappent pas à cette confusion entre lettres 'en miroir', qui peut durer plus longtemps.

On suppose que c'est le corps calleux qui, en reliant les deux hémisphères, assure la permanence ou l'invariance de l'objet symétrique. On pense qu'il y a deux systèmes visuels dans notre cerveau : la voie occipito-temporale, qui s'intéresse à la reconnaissance des objets, à leur identité, à leur forme et à leur couleur (la voie du 'quoi'), et la voie occipito-pariétale, qui s'intéresse à la programmation de l'action, à la distance, à la position, à la vitesse et à l'orientation des contours de l'objet (la voie du 'comment').

Le chapitre 8, 'Vers une culture des neurones', avance l'hypothèse que l'espèce humaine est la seule qui s'invente une culture et est ainsi capable de 'recyclage neuronal', le cerveau humain disposant d'un nouvel "espace de travail conscient", un vaste système de connexions corticales qui brise la modularité cérébrale et permet la recombinaison flexible des circuits existants pour créer de nouveaux outils mentaux. Ainsi, "[l]es cultures humaines ne sauraient être ces immenses espaces d'infinie diversité et d'arbitraire invention que nous décrivent certains chercheurs en sciences humaines." Notre capacité d'invention n'est pas infinie, elle repose sur un jeu de construction neuronal qui nous est imposé. Reprenant l'hypothèse de la structure modulaire de l'esprit humain de Jerry Fodor, Dan Sperber envisage l'esprit comme une série de "modules spécialisés" qui ont évolué pour répondre à un domaine précis de compétences (modules de

reconnaissance des visages, etc.). Tous les individus disposeraient de la même liste de modules, fixée une fois pour toutes au cours de l'évolution du cerveau humain. Selon SD, le terme de 'module' est un peu rigide, suggérant l'image de cases figées. Le cerveau humain semble avoir connu une évolution particulière, avec l'accroissement d'un vaste réseau de connexions impliquant particulièrement le cortex préfrontal. SD fait l'hypothèse que l'existence de ce réseau, l'apparition d'une conscience réflexive et la compétence culturelle de l'espèce humaine sont des phénomènes étroitement liés. L'invention de la lecture est la mise en connexion de signes avec les aires auditives, phonologiques et lexicales responsables de la compréhension du langage parlé. Si l'idée de cette connexion n'est jamais venue à d'autres grands singes, c'est peut-être parce que l'architecture de leur cerveau ne le leur permet pas, en gros parce qu'ils ne possèdent pas le langage parlé. Selon plusieurs psychologues du développement, l'enfant apprend à aller au-delà de la modularité initiale de son cerveau.

En **conclusion**, SD souhaite promouvoir une approche cognitive et scientifiquement validée de la lecture, au-delà des engagements et querelles politiques.