

Les grands concepts du développement cognitif

PLAN DU CHAPITRE

- **Anatomie cérébrale et développement**
 - Pendant la vie fœtale
 - Après le terme
 - Un calendrier de maturation différent suivant les régions cérébrales
- **Quelles sont les conceptions actuelles de l'apprentissage ?**
 - L'activité spontanée du cerveau est modulée par les apprentissages
 - Des modèles internes qui s'affinent avec l'apprentissage
 - Des connaissances-noyaux : une première organisation de l'environnement
 - Apprentissage explicite et pédagogie « naturelle »
 - Le langage : un outil crucial pour apprendre
 - Les émotions et la cognition sociale sont aussi des facteurs d'apprentissage
 - Le rôle du sommeil dans l'apprentissage
- **Les trajectoires développementales**
- **Aider l'enfant à grandir**

Anatomie cérébrale et développement

Toutes nos pensées, toutes nos émotions, toutes nos actions sont le résultat de calculs produits par des populations de neurones inclus dans des réseaux spécifiques (par exemple, le réseau moteur, celui du langage oral, celui du calcul, etc.). Il y a de nombreux types de neurones, excitateurs, inhibiteurs, modulateurs, ordonnés en six couches dans la substance grise autour du cerveau et dans les noyaux gris centraux. Leur disposition n'est pas constante à la surface du cerveau. Cette cyto-organisation permet aux neuro-anatomistes de distinguer différentes aires cérébrales et encore aujourd'hui, on décrit de nouvelles subdivisions en se basant sur la densité des neurones dans les différentes couches, leur type, le type de neurorécepteurs, l'expression génique, etc.

À cette description anatomique complexe répond une description fonctionnelle tout aussi complexe, avec des cartes auditives de fréquences, d'intensité, etc., mais aussi des cartes d'activation très spécifiques et reproductibles entre individus à un niveau plus abstrait. Par exemple, dans le gyrus fusiforme (un gyrus de la face ventrale du cerveau), on retrouve une mosaïque de régions répondant à certaines catégories visuelles, comme les espaces, les paysages, les maisons dans la partie la plus interne, bordée par une région répondant aux visages, une autre aux corps et parties du corps, enfin une région répondant aux outils et objets dans la partie la plus externe (figure 1.1). Dans l'hémisphère gauche vient s'insérer entre la région des visages et celle des outils une région qui – après l'accès à la lecture – répond aux mots écrits dans un script connu.

Ce qui est étonnant est que cette organisation fonctionnelle précise est retrouvée chez tous les humains, quel que soit leur environnement naturel et culturel.

Le type d'organisation des couches corticales et les connexions avec les niveaux sous- et sus-jacents expliquent sans doute ces spécifications fonctionnelles. Même la région visuelle des mots qui se développe avec l'acquisition de la lecture est soumise aux mêmes contraintes biologiques alors que la lecture est une invention récente. Notre compréhension de la relation entre fonction et structure reste encore très grossière, même si cette précision architectonique explique comment certains troubles du spectre de l'autisme, ou certains troubles de la lecture peuvent être dus à une mauvaise organisation d'une région limitée du cerveau.

La mise en place de ce puzzle *de régions qui doivent se connecter correctement mais aussi à la bonne vitesse* est évidemment complexe et le développement du cerveau humain est une histoire compliquée qui s'étale sur deux décades. Cette longue enfance, jusqu'à 20-25 ans, facilite les apprentissages, et les apprentissages modifient le développement cérébral. En effet, si le cœur doit pomper le sang, le rein l'épurer, le rôle du cerveau est d'apprendre pour permettre à l'organisme de

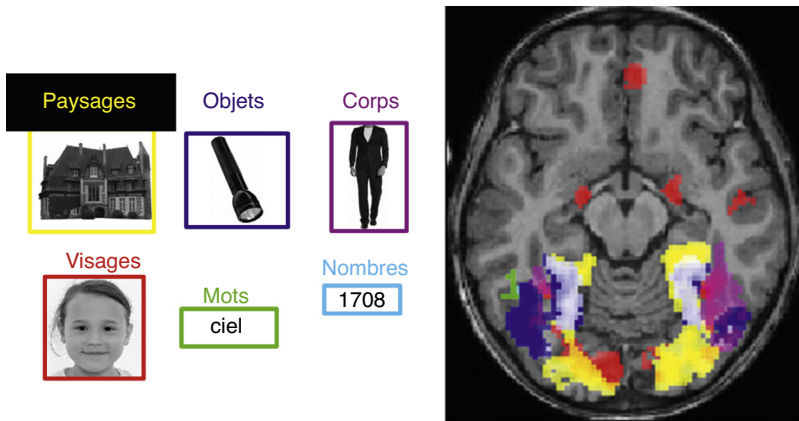


Figure 1.1. La mosaïque fonctionnelle des régions visuelles.

Le cerveau est constitué de multiples régions fonctionnelles, reproductibles d'une personne à l'autre. L'exemple ici montre les réponses visuelles d'un groupe d'enfants de 6 ans, en cours préparatoire (CP), à différentes catégories d'images (objets, corps, visages, maisons, mots et nombres) sur une coupe horizontale du cerveau. Cette organisation avec les maisons au centre (jaune), puis les visages (rouge) et corps (rose) et enfin les objets (bleu) est la même chez tous les humains, et même chez les singes. Cette organisation fonctionnelle est liée à l'organisation cyto-architectonique locale et à la connectivité entre les différentes aires cérébrales. La réponse aux mots écrits (en vert) apparaît très rapidement quand les enfants apprennent à lire et vient s'incruster à une localisation très précise reproductible à travers toutes les écritures et à tous les âges étudiés.

tirer le meilleur parti de son environnement. Il s'adapte donc *en permanence*. Il est plastique et cela se voit dans les modifications permanentes des synapses le long des dendrites. Cette plasticité existe tout au long de la vie mais les périodes de foisonnement synaptiques qui existent pendant l'enfance ouvrent de multiples possibilités.

Faisons un rapide tour des événements cruciaux de ce développement que l'on peut séparer grossièrement en deux périodes distinctes : 1) migration neuronale et mise en place des circuits pendant la vie fœtale ; 2) raffinement des circuits, accélération et automatisation après le terme.

Pendant la vie fœtale

La majorité des neurones naissent et se multiplient au centre du cerveau avant de gagner leur position en périphérie, migrant le long d'une fibre gliale de l'intérieur vers l'extérieur du cerveau. Ils s'entassent en périphérie, les plus récents passant

au-dessus des plus anciens pour constituer les 6 couches présentes chez l'adulte et reconnaissables à partir de sept mois et demi de grossesse.

Deux autres lignes de migration neuronale existent qui s'entrecroisent avec le premier axe de migration. Il s'agit de neurones inhibiteurs, cruciaux pour la régulation de l'activité des circuits. Des signaux chimiques, des gradients d'expression génique, mais déjà aussi l'activité électrique des neurones déjà en place, permettent de guider la mise en place des suivants. Pendant le dernier trimestre de la grossesse, la majorité des neurones se trouvent encore dans la sous-plaque, en dessous de la plaque corticale (figure 1.2), ce qui rend cette période très sensible aux agressions externes.

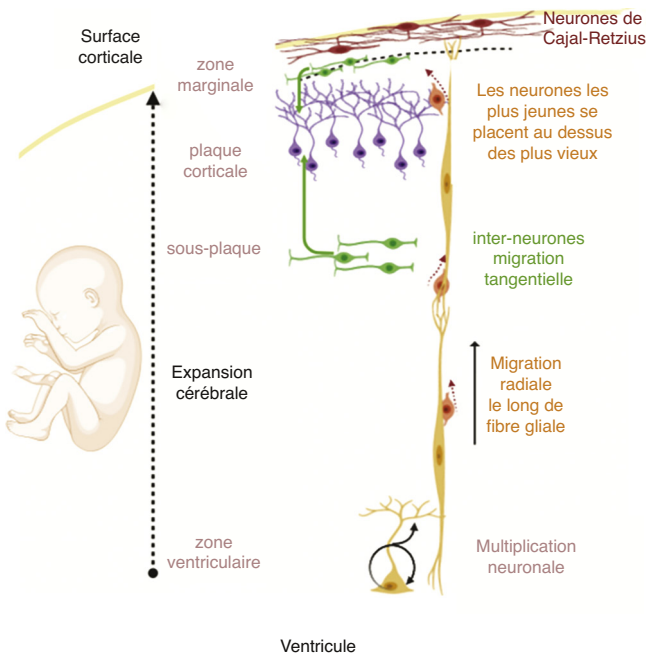


Figure 1.2. Migration neuronale pendant le dernier trimestre de la grossesse.

Migration des neurones le long des fibres gliales de l'intérieur du cerveau vers l'extérieur pendant la vie fœtale. Les interneurones inhibiteurs (~20 % des neurones) migrent, eux, tangentiellement.

Le développement cérébral est très sensible aux toxiques, l'alcool en premier lieu. Des anomalies de la migration sont à l'origine de certaines dyslexies, les neurones ne parvenant pas à leur destination finale sont regroupés en amas (ectopies) dans la substance blanche parfois visible en imagerie par résonance magnétique.

L'IRM

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) a révolutionné notre compréhension du développement neurologique et cognitif de l'enfant. L'imagerie anatomique permet de visualiser :

- d'une part la **morphologie/morphométrie cérébrale** (forme et volumétrie des différents tissus cérébraux, des sillons et gyri du cortex, etc.), qui est obtenue à partir d'images pondérées en T1 ou T2 (IRM conventionnelle) présentant des différences de contraste entre la substance blanche, la substance grise et le liquide céphalo-rachidien (figure 1.3) ;
- d'autre part la **connectivité anatomique** (connexions entre les différentes régions cérébrales par les faisceaux de fibres de la substance blanche) qui est reconstruite à partir d'images sensibles à la diffusion de l'eau et à son orientation en fonction de la microstructure du milieu (IRM en tenseur de diffusion).

En recherche, on utilise également l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) qui apporte une information sur l'**activité cérébrale**, en précisant la localisation fine des augmentations de débit sanguin cérébral consécutives à l'exécution d'une tâche mentale (**activité évoquée**) ou des oscillations de basse fréquence observées dans des réseaux très connectés lors du repos (**connectivité fonctionnelle**). Cette méthode est fondée sur les modifications du signal liées aux variations d'oxygénation sanguine (BOLD Contrast, *Blood Oxygen Level-Dependent*) dues aux propriétés paramagnétiques de la désoxyhémoglobine (figure 1.1).

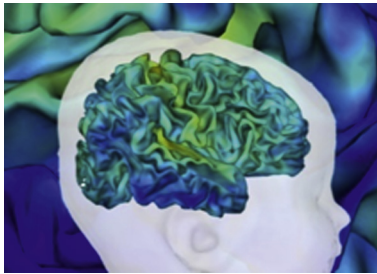


Figure 1.3. Hétérogénéité de la maturation cérébrale.

Variation d'un indice de maturation basé sur les valeurs du signal T2 le long de la surface corticale chez un nourrisson de 2 mois. Les régions les plus matures (régions primaires) apparaissent en jaune et les moins matures en bleu foncé.

Pendant le dernier trimestre, les lésions anoxiques, notamment chez le prématuré, provoquent une rétraction des fibres gliales, ce qui empêche les neurones encore en migration de monter à leur place définitive. Ces anomalies de la migration finale expliquent en partie l'augmentation du risque de troubles cognitifs chez les enfants nés prématurément. Ces nouveau-nés sont également exposés à un environnement très différent du fœtus du même âge. Par exemple, les bruits intempestifs et stridents des alarmes en service de soins intensifs, le bruit blanc de l'incubateur, mais

La prématurité

10 % des naissances sont trop précoces, soit ~50 000 à 60 000 nouveau-nés chaque année. La prématurité expose à un risque accru de troubles cognitifs du fait des lésions cérébrales anoxiques qui peuvent être bien visibles sur l'échographie et l'IRM. Mais une imagerie normale peut être trompeuse. La désorganisation des réseaux mais aussi l'environnement *ex utero* du prématuré peuvent avoir des conséquences initialement peu visibles, qui se révéleront à l'entrée à l'école. Les prématurés les plus nombreux sont ceux nés près du terme (après 35 semaines) qui ont initialement peu de problèmes, ce qui rassure faussement l'entourage. Un déficit d'attention, une dyscalculie, des difficultés linguistiques ou sociales ne deviendront visibles, car invalidants, qu'à l'école. Il faut donc garder un œil sur leur développement cognitif jusqu'à l'adolescence (figure 1.4).

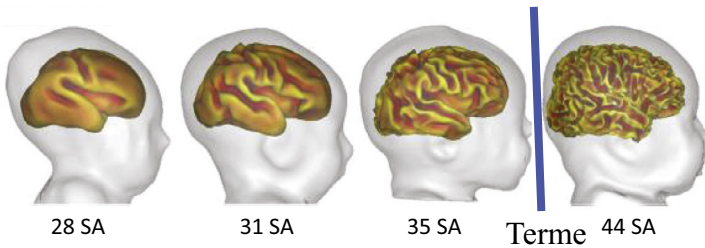


Figure 1.4. Développement cérébral durant le dernier trimestre de la grossesse.

aussi, à l'inverse, une atmosphère trop silencieuse sans parole, ont des effets délétères sur la mise en place des circuits linguistiques. Les enfants nés prématurément ont un risque augmenté de déficits cognitifs généraux (déficience intellectuelle) et spécifiques (autisme, troubles du langage, différents troubles dys), qui imposent un suivi prolongé de ces enfants pendant leur scolarité.

Après le terme

À la naissance à terme, les neurones sont en place (ou quasi tous). Les faisceaux de substance blanche qui relient les différentes régions ont atteint leurs cibles. Le plan d'ensemble du cerveau humain est donc formé.

Le développement cérébral consiste maintenant à affiner ce plan et à accélérer la transmission de l'information grâce à la myélinisation des axones.

Par exemple, la première réponse dans le cortex visuel mesurée après la présentation d'une image se produit après une latence de 300 ms environ à la naissance et de 100 ms, la latence adulte, à 3 mois, une accélération plutôt brutale ! Parallèlement

les arbres dendritiques se complexifient, devenant de plus en plus « chevelus » et les contacts synaptiques augmentent. Puis, certains contacts sont éliminés (élimination sélective).

La myélinisation, l'explosion des contacts synaptiques et leur élimination sélective ne sont que les phénomènes les plus visibles, mais beaucoup d'autres modifications plus discrètes sont évidemment présentes. L'IRM permet de suivre ces grands changements. Grâce à la combinaison de plusieurs types de séquences, plus ou moins sensibles à la teneur en eau des tissus (séquences pondérées en T1 et T2) ou à sa diffusion (imagerie en tenseur de diffusion), il est possible d'avoir une image, certes grossière, de la maturation des différentes régions cérébrales et bien sûr de détecter certaines anomalies de la migration neuronale et de ses conséquences.

Ce qu'il est important de savoir est que ces phénomènes ne se passent pas au même moment dans tout le cerveau.

Un calendrier de maturation différent suivant les régions cérébrales

Le cerveau est modulaire, c'est-à-dire que chaque région cérébrale a une organisation différente (épaisseur des 6 couches, types de neurones, densité des neurotransmetteurs, connectivité) et doit effectuer une tâche différente. Elle a aussi son propre calendrier de maturation et pour certaines régions comme les régions frontales, les modifications sont encore très importantes jusqu'à l'adolescence. *Cette hétérogénéité de maturation* a deux conséquences :

- la première est qu'à un âge donné, certaines régions sont déjà matures et d'autres encore très immatures, expliquant que la cognition de l'enfant n'est pas celle de l'adulte (figure 1.3). Non seulement, l'enfant a moins de connaissances mais aussi certaines compétences qui reposent sur des régions cérébrales au développement plus tardif ne peuvent pas être aussi élaborées. Par exemple, la prise de risque chez l'adolescent s'expliquerait en partie par le fait que la réorganisation du « système de récompense » dopaminergique (cortex orbito-frontal, amygdale, etc.) se produit avant la maturation des structures de contrôle cognitif (cortex préfrontal) ;
- la seconde conséquence de cette hétérogénéité de maturation est que des difficultés à un âge donné peuvent se résoudre ultérieurement grâce à des ressources supplémentaires. Par exemple, à l'adolescence, la maturation frontale permet une meilleure prise en compte du contexte, et une fluidité de planification et de contrôle, et donc de déployer des stratégies plus efficaces basées sur le contexte textuel chez l'enfant dyslexique par exemple. Il faut donc adapter les prises en charge et réévaluer les besoins de l'enfant/adolescent chaque année.

Le métabolisme cérébral

Le cerveau humain est gros, notamment chez l'enfant. Chez l'adulte, il ne représente que 2 % du poids du corps mais consomme 20 % de l'énergie disponible au repos. Chez l'enfant, cette consommation énergétique cérébrale est encore beaucoup plus importante pour atteindre un pic à 5 ans où le cerveau consomme 60 % des besoins en glucose et 43 % des besoins énergétiques quotidiens. Ces besoins sont liés à la création des synapses sur les arbres dendritiques, qui sont les supports biologiques de l'apprentissage, à la myélinisation des axones, qui permet d'accélérer la transmission de l'influx nerveux, à la différenciation des neurones, et au fonctionnement neuronal lui-même, potentiel d'action et potentiels synaptiques consomment la moitié de l'ATP (adénosine triphosphate) cérébrale. « Un ventre vide n'a pas d'oreille » mais n'a pas non plus de ressources pour apprendre. Il ne s'agit pas seulement de quantité mais de qualité. Si la pauvreté en iode n'est sans doute plus un problème actuellement, d'autres oligoéléments et vitamines sont cruciaux pour permettre un développement cérébral et cognitif adéquat. Il faut se méfier notamment d'un passage trop rapide au lait de vache ou de l'utilisation de laits végétaux chez le nourrisson de moins de 1 an. Si la maman n'allaite pas, ces laits, contrairement aux laits de suite, n'ont pas été enrichis pour répondre aux besoins très spécifiques des nourrissons.

Quelles sont les conceptions actuelles de l'apprentissage ?

Nos conceptions sur l'apprentissage ont considérablement changé cette dernière décade grâce à un triple apport provenant des sciences cognitives, de l'imagerie cérébrale et de l'intelligence artificielle¹.

L'apprentissage n'est plus réduit à l'apprentissage formel de connaissances abstraites enseignées explicitement à un être ignorant mais est plus généralement défini comme *le processus adaptatif d'un organe plastique, le cerveau, à un environnement complexe* dans le but de diminuer l'écart, ou signal d'erreur, entre le modèle interne et la réalité externe. Une telle définition s'applique donc à tout cerveau, humain ou animal, et aussi bien sûr aux réseaux de neurones artificiels. Ces derniers arrivent désormais à des performances étonnantes, leur permettant de battre les humains à leurs propres jeux, comme les échecs ou le go.

L'activité spontanée du cerveau est modulée par les apprentissages

Le cerveau est donc constitué de multiples réseaux neuronaux qui, en permanence, déploient une activité électrochimique qui n'aura de cesse qu'à la fin de la

1 Les lecteurs qui veulent approfondir ce sujet peuvent se rapporter à Dehaene S. Apprendre ! Les talents du cerveau, le défi des machines. Paris : Odile Jacob ; 2018.