

FRANCIS EUSTACHE
BÉRENGÈRE GUILLERY-GIRARD

LA NEUROÉDUCATION

LA MÉMOIRE AU CŒUR
DES APPRENTISSAGES



Odile
Jacob

FRANCIS EUSTACHE
BÉRENGÈRE GUILLERY-GIRARD

LA NEUROÉDUCATION

LA MÉMOIRE AU CŒUR
DES APPRENTISSAGES



Odile
Jacob

Francis Eustache
et Bérengère Guillery-Girard

LA NEUROÉDUCATION

La mémoire au cœur
des apprentissages



Collection dirigée
par Stanislas Dehaene

© ODILE JACOB, MARS 2016
15, RUE SOUFFLOT, 75005 PARIS

www.odilejacob.fr

ISBN 978-2-7381-6315-8

Le code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5 et 3 a, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4). Cette représentation ou reproduction donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Ce document numérique a été réalisé par [Nord Compo](#).

Introduction

La mémoire est indispensable à toutes les formes d'apprentissage, que ce soit chez le jeune enfant, chez l'enfant d'âge scolaire ou chez l'adolescent. Cette réflexion semble évidente et même totalement aller de soi. Pourtant, les connaissances scientifiques sur la mémoire humaine, qui se sont largement développées ces dernières années, sont encore très mal intégrées au domaine de l'éducation, à l'école ou à la maison. Il nous a semblé indispensable de combler ce fossé, en montrant l'enrichissement que peuvent procurer diverses connaissances scientifiques sur la mémoire à l'éducation de l'enfant et de l'adolescent. Cette démarche, qui relève de la neuroéducation, ne vise pas à changer tous les principes éducatifs et à donner des préceptes intangibles, « scientistes », mais au contraire, elle permet de donner des guides, de répondre à des questions que se posent fréquemment les parents ou les enseignants en s'appuyant sur les données de la science.

Ce livre est ainsi consacré au fonctionnement de la mémoire et à son développement au cours de l'enfance et de l'adolescence. Les neurosciences cognitives permettent aujourd'hui de mieux comprendre l'effet de la maturation cérébrale, en interaction avec l'environnement de l'enfant, sur les mécanismes de la mémoire et de l'apprentissage.

L'organisation de la mémoire (et de ses composantes ; ce qui est appelé les systèmes de mémoire) est particulièrement complexe chez l'enfant puisqu'elle se met en place chez un être en plein développement. Cette organisation est en même temps fragile, car soumise à différents aléas qui occasionnent des difficultés, voire des dysfonctionnements plus ou moins durables avec des répercussions sur les apprentissages. De plus, ces dernières décennies sont marquées par des changements majeurs, comme la place de plus en plus grande prise par les nouvelles technologies de l'information et de la communication qui modifient en profondeur le contexte de ces apprentissages. Enfin, et plus largement, le rapport que l'enfant, l'adolescent, puis le jeune adulte entretiendra avec la connaissance forgera une volonté de savoir. Celle-ci aura des conséquences tout au long de la vie, y compris chez la personne âgée qui sera ainsi mieux armée pour faire face aux effets potentiellement délétères de l'âge sur les fonctions cognitives.

Organisé en six chapitres et agrémenté de nombreux exemples de recherches et de situations concrètes, ce livre propose des données nouvelles et une réflexion d'ensemble sur le développement de la mémoire. Les trois premiers chapitres présentent respectivement l'état des connaissances sur les mécanismes qui interviennent dans le fonctionnement de la mémoire, sur leur mise en place progressive chez l'enfant et l'adolescent, et sur la maturation cérébrale jusqu'à l'âge adulte. Ils procurent au lecteur non initié la terminologie nécessaire pour comprendre l'organisation et le fonctionnement de la mémoire : les grands systèmes de mémoire, les différentes phases de toute activité mnésique, les principaux processus, les bases anatomiques et physiologiques de la mémoire, les mécanismes neurobiologiques à l'origine de la maturation cérébrale et ses grandes étapes. Plusieurs résultats d'études récentes sont détaillés afin d'illustrer les principales avancées qui ont lieu dans ce domaine.

Le quatrième chapitre fournit des indications pratiques en termes éducatifs et pédagogiques, fondées sur les connaissances des processus mnésiques issues de la psychologie et des neurosciences cognitives. L'éducation et la pédagogie doivent s'appuyer sur cette nouvelle science de la mémoire aux applications nombreuses dans notre société. La neuroéducation, qui constitue l'une de ces applications, connaît un fort engouement chez les enseignants qui en perçoivent déjà tout l'intérêt, en particulier de fonder les pratiques pédagogiques sur les acquis de la science. Beaucoup d'enseignants cherchent à intégrer aujourd'hui ces connaissances provenant des neurosciences dans leurs pratiques professionnelles ; à l'inverse, ces situations pédagogiques concrètes intéressent le chercheur en neurosciences qui y voit un terrain d'expérimentation en situation réelle. Le cinquième chapitre porte sur différentes pathologies de l'enfant qui entraînent des troubles de la mémoire. Il vise à mieux comprendre leur grande diversité et à s'y adapter pour mieux intégrer les enfants qui en sont atteints. Enfin, le dernier chapitre présente quelques réflexions sur ce nouveau monde de la mémoire décrypté par une science de la mémoire pluridisciplinaire. Celui-ci concerne toutes les générations, aux prises avec des évolutions notables dans notre mode de vie et dans notre environnement où les changements technologiques et sociaux sont omniprésents. La question de la mémoire et des apprentissages ne se réduit pas à des principes techniques, mais ouvre à de véritables problématiques de société.

Comprendre l'organisation et le fonctionnement de la mémoire humaine

La mémoire tout au long de la vie

Les réflexions sur la mémoire sont ancestrales et ont vraisemblablement accompagné la naissance de l'humanité. Les premières sépultures, les hommages aux défunts, les expressions de l'art rupestre, nombre de monuments et de marques sous des formes diverses, constituent autant de témoignages du raisonnement constant de l'homme sur la mémoire, sur son importance pour l'individu comme pour le groupe social, sur sa diversité, sa fragilité, la peur de la perdre, et aussi sur sa dimension merveilleuse et parfois mystique puisqu'elle nous met en contact avec des situations, des objets et des êtres qui ne sont pas perceptivement présents et qui sont sources d'interrogations, de spéculations, d'émotions, de regrets ou de

désirs. La mémoire est à l'origine d'une pensée consciente et inconsciente, faite d'images et de concepts, d'apprentissages, d'habitudes et de coutumes ; elle est aussi source d'inspiration, d'innovation et de création. La mémoire favorise la survie puisqu'elle permet de se souvenir des lieux, des objets, des personnes, de forger des connaissances et des savoir-faire, de transmettre des apprentissages et de construire des identités individuelles et culturelles. La mémoire et son pendant indissociable, l'oubli, sont présents dès l'origine dans les mythes, aux fondements de notre histoire, sous les traits respectifs de Mnémosyne et de Léthé.

Les contributions des grands philosophes de l'Antiquité ont donné une large place à la mémoire. Elles survenaient à un moment où les écrits étaient peu accessibles et où la tradition orale était encore de mise pour transmettre les connaissances et les savoirs. De façon intéressante, cette réflexion sur l'essence de la mémoire se double alors de moyens mnémotechniques qui visent à conserver les informations en mémoire, à utiliser ses fonctions et ses mécanismes de façon optimale, voire à l'amplifier. Cette façon d'utiliser la mémoire et les différents outils visant à optimiser son fonctionnement a atteint son apogée à la Renaissance ; elle a été appelée l'« art de la mémoire ». Cet art n'est pas une simple réflexion spéculative sur la mémoire, mais bien une volonté pragmatique de la rendre plus efficace et de la développer à des fins diverses. Étant donné la quasi-absence de moyens d'archivage écrits des connaissances, la rhétorique enseignait la meilleure organisation des informations : par exemple, pour structurer un discours, se représenter les différentes pièces d'une maison ou d'un palais pour y situer les différents faits ou arguments. La mémoire est un outil qu'il faut sans cesse perfectionner, pour progresser dans son propre raisonnement, pour enseigner et pour emporter l'adhésion.

La réflexion philosophique sur la mémoire et la bonne utilisation de celle-ci a traversé les siècles, mais la recherche scientifique est beaucoup plus récente et ne date que de la seconde partie du XIX^e siècle, décrite

comme l'« âge d'or » de la mémoire. Plusieurs progrès ont eu lieu à cette période, sur le plan des méthodes (la mesure de la mémoire par le psychologue allemand Ebbinghaus) et des concepts (les différentes formes de mémoire, par exemple les mémoires conscientes et inconscientes). Les travaux portant sur les maladies de la mémoire ont pris d'emblée une place importante, comme ceux de Ribot en France, de Korsakoff en Russie et de Claparède en Suisse, qui ont montré que les amnésiques présentaient des capacités de mémoire préservées dans certains domaines. Ces descriptions cliniques sont à l'origine de conceptions considérant la mémoire comme formée de plusieurs composantes en interaction. De façon intéressante, les travaux de la nouvelle neuropsychologie de la mémoire, qui visait à comprendre son organisation et son fonctionnement à partir de l'examen détaillé de malades, sont accompagnés de réflexions des philosophes comme Bergson en France, Husserl en Allemagne, William James aux États-Unis. Les travaux scientifiques modernes, qui ont commencé il y a une cinquantaine d'années, ont repris nombre des idées développées au cours de l'âge d'or, en utilisant des dispositifs expérimentaux très rigoureux et le cadre conceptuel de la psychologie cognitive qui se prêtait bien à ce type de construction théorique.

Une difficulté dans l'étude et la compréhension de la mémoire, notamment en psychologie et en neurosciences, tient à la diversité des termes utilisés pour qualifier et pour expliciter ses différentes composantes et ses divers mécanismes. La terminologie est importante et renvoie à des niveaux de compréhension différents. Ainsi, certains termes sont descriptifs (mémoire auditive, mémoire visuelle, mémoire olfactive) et font référence à la modalité sensorielle par laquelle l'information a été encodée. Les étapes obligées de toute activité mnésique (encodage, stockage, récupération) et les processus qui les caractérisent doivent aussi être définis. D'autres termes renvoient enfin à des systèmes de mémoire (ou à diverses composantes) qui sont distingués du fait de leur contenu, des processus qu'ils mettent en

œuvre (c'est-à-dire leur mode de fonctionnement) et de leurs représentations cérébrales. Même si ces systèmes peuvent être différenciés les uns des autres, ils fonctionnent en relation étroite et, pour cette raison, il est préférable de parler de mémoire au singulier même si l'on fait référence à des systèmes de mémoire multiples. Tous les auteurs ne partagent pas une vision commune concernant le nombre et les définitions des systèmes de mémoire. Nous adoptons dans cet ouvrage celle que nous avons proposée avec Béatrice Desgranges (Eustache et Desgranges, 2012), elle-même inspirée des conceptions d'Endel Tulving. La description des différents systèmes et, plus largement, la terminologie nécessaire à la compréhension de la mémoire font l'objet de ce premier chapitre.

Depuis longtemps, les études de neuropsychologie ont joué un rôle important pour comprendre l'organisation de la mémoire humaine. Celles-ci portent sur des patients adultes atteints d'un syndrome amnésique : un trouble très grave et sélectif de la mémoire, lié à des lésions du cerveau, affectant à la fois sa composante antérograde (l'amnésie antérograde empêchant l'acquisition de nouvelles informations) et rétrograde (l'amnésie rétrograde empêchant la récupération d'informations qui avaient pourtant été enregistrées avant la survenue de la maladie). Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'études de groupes de malades ou encore d'études de « cas uniques », chez des patients qui présentaient des troubles très démonstratifs. Certains de ces patients, connus souvent par leurs initiales (H. M., K. C., etc.), sont devenus ainsi célèbres car ils ont participé à différentes recherches. Plus récemment, de nombreuses études ont porté sur les maladies neurodégénératives, la maladie d'Alzheimer étant la plus connue, considérée comme un véritable enjeu de santé publique et même de société. L'importance prise par ces maladies, du fait de l'évolution démographique, des problèmes socio-économiques qu'elles entraînent, du drame humain pour la personne qui en est atteinte, mais aussi pour son entourage proche (les aidants), a contribué à la réflexion et à l'importance

accordée aujourd'hui à la mémoire et à son étude. Ces deux problématiques – omniprésence de la neuropsychologie de la mémoire centrée sur les syndromes amnésiques de l'adulte et prévalence accrue des maladies neurodégénératives – ont monopolisé l'attention des chercheurs et des pouvoirs publics et n'ont laissé que peu de place à l'étude de la mémoire de l'enfant.

Le faible nombre de travaux portant sur les liens entre cerveau et mémoire chez l'enfant, jusqu'à une date récente, constitue tout de même une situation surprenante. Ainsi, la neuropsychologie de la mémoire de l'enfant ne date guère plus d'une trentaine d'années, et la prise en compte des connaissances sur le fonctionnement de la mémoire dans les méthodes d'éducation et les pédagogies ne font l'objet que d'expériences très limitées. Ce constat est l'une des justifications de cet ouvrage et, tout au long des pages qui suivent, nous montrerons que les résultats des recherches récentes peuvent être assemblés en un tout cohérent pour construire une neuroéducation de la mémoire et des apprentissages, c'est-à-dire comment les recherches en neurosciences peuvent éclairer les pratiques pédagogiques. Toutefois, de notre point de vue, l'importance de la mémoire de l'enfant est telle que les objectifs doivent aller bien au-delà d'une facilitation de divers apprentissages, à l'école ou en dehors de celle-ci.

La problématique de la mémoire chez l'enfant s'intègre dans le cadre plus large de l'évolution de nos sociétés et de leurs changements les plus marquants. Deux d'entre eux peuvent être cités d'emblée. L'un a trait à l'évolution démographique. De façon inédite, nos sociétés voient cohabiter quatre et parfois cinq générations dans une même famille. La mémoire constitue le lien entre ces générations et la mémoire de l'enfant qui se construit y est décisive pour préserver le lien transgénérationnel et l'inscrire dans la durée. L'autre évolution notable est l'omniprésence des nouveaux moyens technologiques de diffusion de l'information et de communication. Cet état de fait est une chance pour le progrès des connaissances au plan

individuel comme au plan collectif, mais il s'agit d'une innovation rapide et à vaste échelle qui entraîne un changement dans le fonctionnement et l'utilisation de la mémoire. Nous reviendrons ultérieurement sur ces deux points qui ne sont pas étrangers l'un à l'autre.

Les premiers travaux portant sur la mémoire de l'enfant ont d'abord concerné le bébé et le nourrisson et, en conséquence, des processus considérés comme de « bas niveau », proches de conditionnements, encore bien éloignés des processus complexes du fonctionnement de la mémoire de l'adulte. Malgré tout son intérêt, ce champ d'étude relativement spécialisé n'a pas été vraiment intégré aux connaissances plus générales sur la mémoire, directement inspirées des travaux venant de la neuropsychologie de la mémoire chez l'adulte. Le point de jonction entre les études de l'enfant et celles de l'adulte vient d'un autre secteur de la recherche.

Un changement majeur est survenu, il y a une trentaine d'années, dans la neuropsychologie de l'enfant avec des applications dans différents domaines : pathologies développementales du langage oral et écrit (dysphasies, dyslexies), troubles du spectre de l'autisme (TSA), trouble du déficit de l'attention avec hyperactivité (TDAH), etc. La neuropsychologie de l'enfant s'est alors constituée comme une discipline à part entière. Elle a permis de décrire ces différents syndromes avec des outils conceptuels et méthodologiques modernes et a proposé des thérapies innovantes. Pourtant, à quelques exceptions près, et même dans des pathologies où les troubles de la mémoire sont fréquents et handicapants, comme l'épilepsie temporale ou les séquelles des traumatismes crâniens, la description des troubles mnésiques est longtemps restée à l'arrière-plan.

Une publication de l'équipe anglaise de Faraneh Vargha-Khadem, parue dans la revue *Science* en 1997, a permis de vraiment ouvrir le champ à la neuropsychologie de la mémoire de l'enfant. Cette étude, que nous détaillerons plus loin, a consisté à décrire des adolescents qui avaient été victimes, dès leur plus jeune âge, de lésions de la formation hippocampique

(une structure cérébrale très importante pour la mémoire). D'emblée, cette publication a été discutée dans des débats plus larges initiés dans le cadre de la neuropsychologie de l'adulte, notamment la spécificité de certains systèmes de mémoire et leurs interactions, le rôle de différentes régions du cerveau dans la genèse des systèmes et des processus mnésiques. À l'instar des études des syndromes amnésiques de l'adulte qui avaient permis de dissocier et de décrire différents systèmes de mémoire, cette publication de 1997 et de nombreuses autres qui suivirent vont contribuer à comprendre la construction de l'architecture fonctionnelle de la mémoire au cours du développement.

Grâce à cette publication princeps, la neuropsychologie de l'enfant rejoint la neuropsychologie de l'adulte tout en s'en démarquant. Elle pointe ses spécificités tout en intégrant, et parfois en les adaptant, les méthodes et les concepts de la neuropsychologie de la mémoire de l'adulte. Dans ces études portant sur l'amnésie développementale (ou syndrome amnésique de l'enfant), la conception d'une mémoire formée de différentes composantes (ou systèmes) a été globalement acceptée par les chercheurs, mais au-delà il fallait comprendre comment cette construction complexe se mettait en place au cours du développement en lien avec la maturation cérébrale. C'était la véritable plus-value de ces études : contribuer à la description de la genèse des différents systèmes de mémoire chez l'enfant. En plus de cette importance théorique et de l'intérêt clinique de la description d'un nouveau syndrome, ces travaux apportaient des éclaircissements à des problèmes qui n'avaient pas obtenu de réponses satisfaisantes jusqu'alors, comme l'énigme de l'amnésie infantile (ou physiologique), c'est-à-dire le fait que nous ne conservons pratiquement aucun souvenir de notre enfance avant l'âge de 5 ou 6 ans.

Les progrès des connaissances ne sont pas linéaires. La neuropsychologie de la mémoire chez l'enfant, pratiquement inexistante il y a une vingtaine d'années, a bénéficié des acquis antérieurs de la

neuropsychologie de l'adulte, qui ont servi de véritable tremplin, en termes de modélisation des systèmes de mémoire, de méthodologies pour les évaluer, mais aussi d'approches nouvelles comme l'imagerie cérébrale, devenue indissociable de la neuropsychologie. Aux questions scientifiques et médicales, comme la compréhension de pathologies pratiquement ignorées jusqu'à cette date, s'est ajoutée une problématique sociétale nouvelle et majeure, celle de la neuroéducation où mémoire et apprentissage doivent tenir une place de choix.

La situation, esquissée dans les paragraphes qui précèdent, rend compte de l'engouement pour les travaux consacrés à la mémoire chez l'enfant. Les enjeux sont de taille et les thématiques nombreuses : la construction cognitive et cérébrale des différents systèmes de mémoire, les liens entre mémoire et apprentissages, les facteurs qui favorisent ou, au contraire, nuisent à cette organisation progressive et plastique, les liens entre mémoire et construction identitaire au plan individuel, collectif, social, à un moment où l'on prend conscience que la mémoire est un capital précieux.

Cette prise de conscience de l'importance de la mémoire, de sa fragilité et de la nécessité de la renforcer tout au long de la vie, tient à plusieurs états de fait, dont certains ont déjà été évoqués. Même si elle paraît éloignée *a priori* du thème central de ce livre qui est la mémoire de l'enfant, l'omniprésence des maladies de la mémoire chez l'adulte âgé, comme la maladie d'Alzheimer, constitue l'une des grandes voies d'entrée dans l'intérêt porté à la compréhension de la mémoire. L'autre sujet important est celui de la mémoire et des apprentissages chez l'enfant et l'adolescent. Là encore, l'intérêt est accentué par une préoccupation et une recherche de solutions. Les technologies de l'information et de la communication offrent un nouveau paysage qui constitue une opportunité inédite pour enrichir la mémoire. En même temps, cette situation nouvelle est aussi vécue comme une menace pour la mémoire, prenant potentiellement la forme d'un

affaiblissement de ses mécanismes et d'un appauvrissement de ses contenus.

Ces deux grands thèmes – apprentissages chez l'enfant et maladies de la mémoire – pourraient être considérés comme disjoints, ayant simplement en commun la problématique de la mémoire. Des chercheurs, dont nous faisons partie, adoptent aujourd'hui une démarche qui est d'étudier la mémoire « tout au long de la vie », ce qui constitue une façon intégrée de comprendre les mécanismes qui lui permettent de se mettre en place, d'évoluer et de se modifier au cours de l'enfance et de l'adolescence, mais aussi tout au long de la vie adulte et au cours du vieillissement. Un nouveau concept est venu renforcer cet intérêt pour une étude de la « vie entière » de la mémoire : il s'agit de la réserve cognitive. Cette réserve peut être définie comme le capital que l'individu se constitue tout au long de sa vie, et qui va lui permettre notamment de lutter contre les effets délétères de l'âge sur les fonctions cognitives, mais aussi de retarder la survenue des symptômes des maladies neurodégénératives. Cette thématique de la réserve cognitive donne lieu à de nombreux travaux, notamment pour identifier les déterminants de cette réserve : les facteurs qui vont avoir un rôle positif ou au contraire délétère sur sa formation. L'éducation semble être un facteur clé dans l'élaboration de cette réserve ; elle constitue le trait d'union entre les deux grandes thématiques que nous avons identifiées comme source d'intérêt (et de préoccupation) concernant la mémoire humaine. Nous reviendrons en fin d'ouvrage sur ces aspects qui soulignent davantage l'importance et le sens du sujet traité tout au long de ce livre : mémoire, neurosciences et éducation.

*La mémoire déclinée sous toutes
ses formes*

Encodage, stockage, récupération

Une difficulté, déjà signalée, pour comprendre la mémoire et pour expliciter son fonctionnement tient à une terminologie qui renvoie à des concepts nombreux et à des niveaux différents d'analyse. La mémoire peut être définie comme la fonction mentale qui permet d'encoder, de stocker et de récupérer des informations (ce dernier terme doit être pris dans un sens très large). Les trois concepts de cette phrase sont fondamentaux, car ils renvoient aux étapes obligées de toute activité mnésique, qui permettent à des informations d'entrer dans la mémoire, d'y être maintenues et d'être rappelées. Pour autant, les mécanismes incriminés sont différents selon la situation concernée et les systèmes de mémoire sollicités. La complexité de la mémoire tient à la compréhension de ces grandes étapes de l'activité mnésique (et des processus qui les caractérisent) et à leur mise en œuvre spécifique dans les systèmes de mémoire.

Les mécanismes d'encodage sont ainsi diversifiés. Nous pouvons, par exemple, lire une liste de mots en nous intéressant essentiellement à leur graphie ou à leur enveloppe sonore sans même considérer leur signification, ce qui nous permettra difficilement de conserver la trace des mots en mémoire au-delà de quelques secondes. En revanche, si nous lisons ces mots car ils portent sur un de nos domaines d'intérêt et pour lequel nous avons déjà des connaissances, ces nouvelles informations feront alors l'objet d'un traitement dit « profond » (sémantique) et seront intégrées aux connaissances préexistantes et conservées de façon durable. De nombreux facteurs, qui seront précisés dans les chapitres suivants, favorisent le traitement profond de l'information lors de la phase d'encodage et ont en conséquence un effet positif sur la formation d'une trace mnésique durable.

Le terme de stockage renvoie également à des mécanismes très divers. Il peut être passif et, dans ce cas, la durée de la rétention est brève. Au contraire, la phase de stockage peut donner lieu à la mise en œuvre de

mécanismes qui permettent une conservation durable de l'information. Le terme de consolidation, utilisé pour en rendre compte, fait référence à des processus variés. La consolidation à court terme renvoie aux processus qui permettent à une information d'être transférée d'un système de mémoire à court terme à un système de mémoire à long terme ; l'échelle de temps est alors de quelques secondes à quelques minutes. De nombreux travaux portent sur la consolidation à plus long terme. Le concept de consolidation est toutefois ambigu, car il ne doit pas être compris comme un maintien figé des informations telle une photographie que l'on archive. Celles-ci sont nécessairement modifiées et subissent différentes transformations, souvent à l'insu du sujet. Là encore, différents facteurs favorisent ce travail de consolidation de la mémoire, la qualité du sommeil étant un élément clé dans le bon déroulement de ces processus.

Les mécanismes de récupération en mémoire sont également très divers. L'information peut être récupérée de façon implicite (ou inconsciente, c'est-à-dire sans que l'individu ait conscience de faire appel à sa mémoire) ou, au contraire, de façon explicite. Dans ce deuxième cas, la récupération peut être suscitée par un indice qui génère, de façon irréprouvable, l'information à rappeler. Dans d'autres situations, la récupération repose sur des mécanismes stratégiques et coûteux en effort. La personne doit alors trouver d'elle-même les indices qui conduisent à l'information recherchée. Le rappel de l'information peut être plus ou moins complet et satisfaisant : la personne peut avoir l'impression de revivre la situation initiale (comme si elle se retrouvait à nouveau dans la scène) ; elle peut au contraire n'éprouver qu'un simple sentiment de familiarité avec un lieu, un visage ou un objet sans identifier précisément l'origine de son souvenir.

Le bon fonctionnement de la mémoire ne tient pas uniquement à l'efficacité des mécanismes d'encodage, de stockage et de récupération des informations. Il est également dépendant des liens et parfois de la similarité entre les processus qui interviennent à ces différentes phases de l'activité

mnésique, tout particulièrement entre l'encodage et la récupération. Ainsi, les indices contextuels présents lors de la récupération sont d'autant plus efficaces qu'ils sont nombreux et ressemblent à ceux qui étaient présents dans la situation d'encodage : par exemple, une ancienne villa avec l'image du paysage qui l'entoure, le cliquetis des drisses dans les mâts des voiliers, l'odeur de salpêtre...

Après avoir défini les étapes obligées de toute activité mnésique, il convient maintenant de s'attarder sur les différentes composantes de la mémoire. Certaines d'entre elles ont été décrites de façon dichotomique, sous la forme d'oppositions, fondées le plus souvent sur les capacités altérées ou au contraire préservées dans les syndromes amnésiques. Certains concepts ont une autre origine. Dans les pages qui suivent, nous définirons les termes les plus importants et terminerons le chapitre par une vision d'ensemble de la mémoire qui sera utilisée dans les chapitres suivants.

Mémoire à court terme *versus* mémoire à long terme

Cette opposition fait référence à l'intervalle de rétention entre le moment où l'on crée le souvenir, c'est-à-dire l'encodage, et le moment où on le récupère. Il n'excède pas quelques secondes ou dizaines de secondes pour la mémoire à court terme, et il porte sur des durées plus longues ou même très longues, comme des années, pour la mémoire à long terme. De plus, la mémoire à court terme est caractérisée par une capacité limitée (réduite à quelques éléments), alors que les capacités de la mémoire à long terme sont considérables. Prenons l'exemple du numéro de téléphone que nous lisons et que nous maintenons en mémoire le temps de le composer dans les secondes qui suivent. Une fois ce numéro de téléphone composé, il s'efface de notre mémoire à court terme pour laisser la place à la

conversation téléphonique en cours. Aujourd'hui, le concept de mémoire à court terme est surtout utilisé pour désigner le maintien passif d'informations en mémoire pendant une durée brève. Le concept de mémoire de travail lui est préféré pour mettre l'accent sur le caractère dynamique et stratégique des opérations qui ont lieu pour manipuler une information qui est présente à la conscience. La mémoire de travail correspond donc à l'espace de travail de la conscience qui maintient, manipule et transforme des informations pendant des durées brèves, telles que les informations de notre conversation téléphonique. Certaines de ces informations sont transférées dans les systèmes de mémoire à long terme. Le concept de mémoire de travail est important, car ce système joue un rôle majeur lors de l'encodage et la récupération en mémoire. Différents processus complexes, de haut niveau d'intégration, nommés fonctions exécutives, sont particulièrement sollicités. Ces fonctions exécutives, qui avaient été décrites par le neuropsychologue russe Alexandre Luria, ont un rôle de coordination et de contrôle des activités complexes. Il est important de noter que leur maturation est particulièrement lente et se poursuit tout au long de l'adolescence.

Mémoire déclarative *versus* mémoire procédurale

La distinction entre mémoire déclarative et mémoire procédurale est utilisée dans de nombreux travaux portant sur la mémoire à long terme. Comme son nom l'indique, la mémoire déclarative correspond à ce qui peut être déclaré. En répondant à une question qui m'est posée, je sollicite ma mémoire déclarative. Celle-ci n'est pas pour autant restreinte au matériel verbal, mais peut être évaluée en utilisant des dessins d'objets ou toutes sortes de matériels. Au contraire, la mémoire non déclarative (ou procédurale) porte sur un matériel difficilement verbalisable. La mémoire

procédurale est un système d'action (elle est indissociable de l'action), ce qui la distingue des autres systèmes de mémoire qui sont considérés comme des systèmes de représentation. La mémoire procédurale est sollicitée quand je fais du vélo, du ski ou toute autre activité qui a été automatisée. La mémoire procédurale est à différencier de l'apprentissage procédural, phase parfois très longue, qui conduit à l'automatisation d'une procédure et qui met en jeu des systèmes cognitifs variés.

Mémoire épisodique, mémoire sémantique, mémoire perceptive

La mémoire déclarative, évoquée plus haut, a donné lieu à son tour à un fractionnement très important sur le plan théorique et clinique : c'est l'opposition entre la mémoire sémantique et la mémoire épisodique.

La mémoire sémantique est la mémoire des connaissances générales sur le monde et sur soi : je sais que Rome est la capitale de l'Italie ; je sais que j'exerce le métier d'enseignant et de chercheur. La mémoire épisodique est la mémoire des souvenirs situés dans leur contexte spatial et temporel d'acquisition.

La mémoire épisodique permet de voyager mentalement dans le temps et donne l'impression de se réinstaller au cœur de l'événement vécu, tout en sachant que celui-ci appartient au passé : je me souviens de ma soirée au restaurant de samedi dernier. J'ai l'impression de revivre certains éléments de la scène. Les mécanismes en jeu dans la mémoire épisodique sont également très proches de ceux qui nous permettent d'envisager des événements plausibles dans le futur : j'irai en Suisse au mois de novembre prochain.

La mémoire perceptive correspond au fait qu'être en contact avec une information perceptive, facilite son traitement ultérieur, même si cette information est présentée sous une forme modifiée ou dégradée. La

mémoire perceptive est souvent sollicitée, à notre insu, de même que la mémoire procédurale. Ces formes de mémoire sont d'une grande aide dans la vie quotidienne car nous réalisons ainsi des tâches sans effort cognitif : la mémoire procédurale me permet de conduire ma voiture et la mémoire perceptive m'aide à me repérer dans un trajet familial. Cette économie cognitive, qui repose sur des traitements relativement automatiques de l'information, favorise la réalisation simultanée de tâches plus complexes : discuter avec mon passager, réfléchir à un problème difficile, mais aussi vagabonder dans mes pensées.

La mémoire et le cerveau

Le cerveau et les troubles mnésiques

Pendant longtemps, la localisation des lésions chez des patients présentant des troubles de mémoire, comme un syndrome amnésique ou une autre pathologie, a été la principale source d'inférence pour décrire les régions du cerveau impliquées dans les différents systèmes de mémoire (Figure 1). Cette « méthode pathologique » a révélé que la mémoire de travail est sous-tendue principalement par le cortex préfrontal (pour la manipulation de l'information et les fonctions exécutives) et par les aires corticales postérieures, proches des régions sensorielles (pour le maintien passif). La mémoire procédurale est affectée dans certaines maladies caractérisées par des lésions sous-corticales (des noyaux gris centraux) comme la maladie de Parkinson ou la maladie de Huntington. La mémoire perceptive est sous-tendue par différentes régions du cortex proches de celles dévolues aux diverses modalités sensorielles (par exemple le cortex occipital pour la mémoire perceptive visuelle). Les mémoires sémantique et

épisode, du fait de leur complexité, ont des localisations corticales très étendues. Les représentations sémantiques impliquent notamment les lobes temporaux dans leur face externe. La mémoire épisodique est sous-tendue par un réseau cérébral distribué comprenant les lobes frontaux et pariétaux ainsi que les hippocampes, situés à la face interne des lobes temporaux. Les hippocampes ont un rôle important aux différentes phases de la mémorisation (encodage, consolidation, récupération), et des lésions des hippocampes entraînent de graves troubles de mémoire, surtout de la mémoire épisodique.

L'imagerie cérébrale

Les méthodes d'imagerie anatomique (scanner à rayons X et imagerie par résonance magnétique, ou IRM) permettent de visualiser les lésions, maintenant avec une grande précision, et conduisent à préciser les rôles de différentes régions cérébrales dans les fonctions mnésiques. Ces méthodes ont aussi changé en profondeur nos connaissances de la maturation cérébrale. De plus, certaines méthodes d'imagerie fonctionnelle peuvent être utilisées quand un participant réalise une tâche de mémoire, chez des participants au développement typique comme chez des patients atteints de troubles de mémoire. Ce domaine de la neuro-imagerie fonctionnelle, utilisant des méthodes de traitement d'images de plus en plus sophistiquées, a donné lieu à un grand nombre de travaux depuis une vingtaine d'années. Ils ont permis d'affiner des résultats déjà entrevus par la méthode pathologique, mais ont apporté aussi des résultats inédits, comme la spécialisation hémisphérique pour les processus d'encodage et de récupération en mémoire. Le cortex préfrontal gauche est davantage impliqué dans les processus d'encodage en mémoire épisodique, alors que son homologue droit l'est davantage dans les processus de récupération en mémoire épisodique. Cette asymétrie fonctionnelle des processus

d'encodage et de récupération en mémoire n'avait pas été mise en évidence par la méthode pathologique car, quand un résultat déficitaire est obtenu à des tests de mémoire, il est difficile de préciser si celui-ci est lié spécifiquement à un trouble d'encodage, de consolidation ou de récupération.

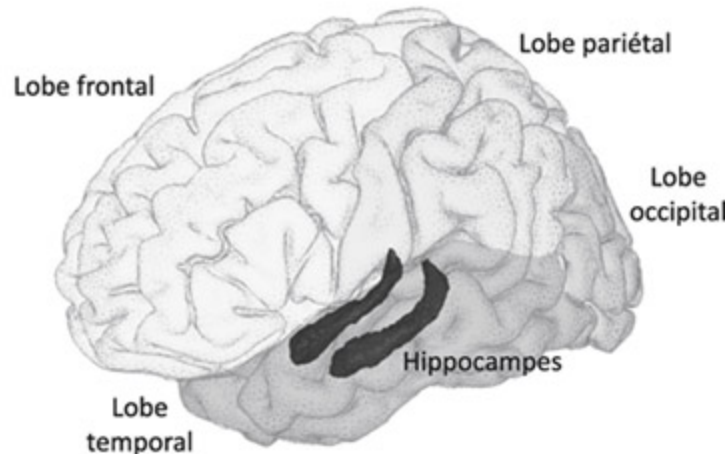


Figure 1. La mémoire et le cerveau

La **mémoire de travail** mobilise un vaste réseau antéro-postérieur impliquant notamment les régions frontales et pariétales.

La **mémoire perceptive** recrute des réseaux neuronaux dans **différentes régions corticales**, à proximité des aires sensorielles.

La **mémoire sémantique** implique des **réseaux neuronaux disséminés** dans des régions très étendues ainsi que dans les **lobes temporaux**, notamment dans leurs parties les plus antérieures.

La **mémoire épisodique** fait appel à des réseaux neuronaux notamment dans l'**hippocampe** et plus largement dans la **face interne des lobes temporaux**.

Enfin, la **mémoire procédurale** recrute des **réseaux neuronaux sous-corticaux** et dans le **cervelet**.

Les dynamiques de la mémoire

La conception « multisystème » de la mémoire ne doit pas être assimilée à une vision où chaque composante et, plus encore, chaque représentation mnésique serait localisée dans une région précise du cerveau. Il est essentiel de considérer que les représentations mnésiques et les

« traces » qui les sous-tendent sont destinées à se modifier au fil du temps. Ces modifications surviennent à la fois au niveau des synapses, jonctions entre les neurones, mais aussi au niveau des grands ensembles neuronaux. Ainsi, le souvenir de ma soirée au restaurant de samedi dernier est destiné à être en partie oublié et largement modifié. Je vais oublier certains éléments du contexte, mais d'autres que j'ai acquis ce soir-là vont s'amalgamer avec mes connaissances antérieures sur les sujets de conversation abordés et sur les convives présents. Ces nouvelles connaissances constitueront un terreau pour accueillir des informations futures. Nos représentations mnésiques ne sont pas statiques et figées ; bien au contraire, elles sont sans cesse aux prises avec différents processus de consolidation, de reconsolidation, de sémantisation. C'est ce travail de synthèse et d'assimilation de la mémoire qui nous fait toucher du doigt son extrême complexité. La mémoire humaine n'est pas assimilable à la mémoire du disque dur d'un ordinateur et encore moins à une photocopieuse. Même si certains mécanismes peuvent être mis en relation, elle est aussi différente de la mémoire des animaux du fait de l'importance du langage, des capacités de narration et de la diversité de ses niveaux de conscience.

Une vision d'ensemble de la mémoire : *MNESIS*

Pour clore ce premier chapitre, nous présentons le modèle MNESIS qui reprend, de façon synthétique et en les organisant, les concepts présentés plus haut. Ce guide théorique nous accompagnera dans les chapitres qui suivent (Figure 2). Sur la gauche de la figure 2 sont situés les trois systèmes de représentation à long terme : mémoire perceptive, mémoire sémantique, mémoire épisodique (avec un transfert des informations dans ce sens).

MNESIS insiste également sur les rétroactions (à l'extrême gauche de la figure) qui rendent compte des différents processus qui transforment les traces mnésiques (sémantisation, consolidation, reconsolidation), ce qui montre bien que les informations ne sont pas figées dans un système. Par ailleurs, la mémoire de travail se trouve au centre du modèle, avec ses composantes de maintien passif (boucle phonologique, calepin visuo-spatial) et de manipulation (administrateur central et fonctions exécutives) des informations (voir chapitre 2). Le *buffer* épisodique présente une position stratégique pour signifier sa place dans la gestion du présent psychologique. Enfin, la mémoire procédurale est représentée à droite du modèle avec une hiérarchie allant du support d'habiletés motrices et perceptivo-motrices à celui d'habiletés perceptivo-cognitives et cognitives.

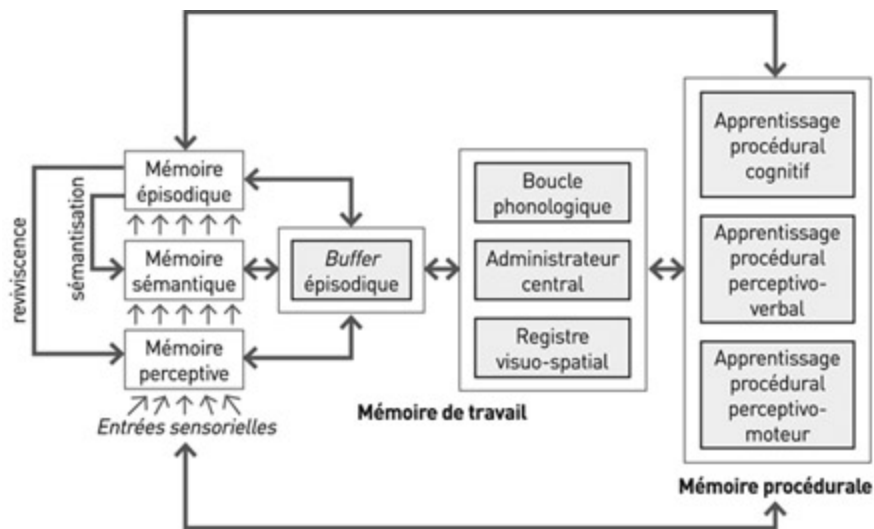


Figure 2. MNESIS

Modèle néostructural intersystémique de la mémoire humaine.
(Eustache et Desgranges, 2008, 2012).

MNESIS présente ainsi cinq grands systèmes de mémoire en interaction : mémoire perceptive, mémoire sémantique, mémoire épisodique, mémoire de travail et mémoire procédurale. D'autres termes seront utiles dans la suite de l'ouvrage et nous les définissons ici succinctement. La mémoire autobiographique, qui s'appuie principalement

sur la mémoire sémantique et la mémoire épisodique, peut être définie comme un ensemble d'informations et de souvenirs particuliers à un individu, accumulés depuis son plus jeune âge, et qui lui permettent de construire un sentiment d'identité et de continuité. La mémoire prospective correspond à la mémoire des activités à réaliser dans le futur. Elle est considérée comme une dimension de la mémoire épisodique qui s'oppose à la mémoire rétrospective (la mémoire des événements passés). Elle est fortement dépendante des fonctions exécutives. Enfin, la métamémoire s'inscrit dans le cadre plus large de la métacognition, c'est-à-dire l'ensemble des connaissances dont l'individu dispose concernant ses processus cognitifs et notamment mnésiques. Ce dernier concept de métamémoire, dont nous soulignons l'importance, s'inscrit bien dans la problématique principale de ce livre : une éducation aux connaissances du fonctionnement de la mémoire et du cerveau.

Le développement de la mémoire

Comprendre le développement de la mémoire est essentiel pour appréhender les apprentissages. Les différentes formes de mémoire interviennent dans de nombreuses activités scolaires, des plus académiques, comme l'acquisition de la lecture et la compréhension de textes, aux plus créatrices comme les arts visuels. Chaque enfant a une progression qui lui est propre et les fonctions cognitives qui apparaissent à un âge donné chez l'un n'apparaîtront pas forcément au même âge chez un autre enfant. Aussi, quand nous évoquons un âge de développement dans les paragraphes suivants, cela reste un âge moyen qui est valable pour la plupart des enfants, mais pas forcément pour tous. Cette diversité, parfois difficile à gérer dans le contexte scolaire, constitue une richesse et un argument pour encourager le partage d'expériences.

Mémoire de travail et fonctions exécutives

L'intérêt pour le développement de la mémoire de travail et des fonctions exécutives est grandissant du fait de leur implication dans de nombreuses activités et dans les apprentissages. Dès que l'enfant doit comprendre une consigne et la maintenir en mémoire le temps de l'exercice, passer d'une consigne à une autre, réaliser plusieurs actions en même temps, comme écouter ce que l'enseignant dit et écrire, il mobilise la mémoire de travail et les fonctions exécutives. En fait, toutes les activités d'apprentissage mobilisent ces compétences ! La mémoire de travail et les fonctions exécutives poursuivent leur développement jusqu'à tard au cours de l'adolescence, voire jusqu'à l'âge adulte, notamment en raison du fait qu'elles reposent sur la maturation de connexions frontopariétales et frontostriatales qui se poursuit tardivement.

Les régions frontales sont importantes pour le fonctionnement de la mémoire de travail, et leur engagement dans les tâches mobilisant ce système est observé chez le jeune enfant, mais leur implication varie avec l'âge. Le développement de la mémoire de travail s'accompagne d'une augmentation du recrutement des régions frontales, qui sont plus efficaces pour traiter les informations complexes. Cette implication grandissante des régions frontales est associée à un désengagement des régions postérieures du cerveau qui ne sont pas essentielles pour réaliser la tâche. Pour de nombreux processus cognitifs, il est possible d'observer, en imagerie cérébrale, une diminution du nombre de régions activées et de l'étendue de ces activations au profit d'une activation plus ciblée et plus efficace : en quelque sorte, activer moins mais mieux !

La question de la différenciation, ou savoir à quel âge les processus cognitifs se distinguent les uns des autres, est au premier plan de plusieurs travaux : à quel âge peut-on différencier les processus qui composent la mémoire de travail et les fonctions exécutives ? Ces fonctions exécutives peuvent être envisagées comme étant à l'interface entre l'enfant et le monde dans lequel il interagit. Elles permettent de s'adapter à ce monde social et

physique, sont essentielles aux apprentissages moteurs, scolaires et sociaux, mais aussi pour réguler nos émotions. Par exemple, plusieurs études se sont intéressées au développement des fonctions exécutives selon le modèle de Miyake qui différencie trois composantes : l'inhibition, la flexibilité mentale et la mise à jour. L'inhibition se traduit par la capacité à supprimer, ou à mettre à l'arrière-plan, les informations (externes ou internes) qui ne sont pas pertinentes pour réaliser une tâche, comme ignorer les commentaires du voisin pour écouter l'enseignant en classe ! La flexibilité mentale se définit comme la capacité à passer alternativement d'une opération cognitive à une autre, à se désengager d'une tâche pour en traiter une autre, pour passer par exemple alternativement de l'addition à la soustraction. Enfin, la mise à jour implique de modifier le contenu de la mémoire de travail en tenant compte de l'information entrante plus récente. Elle est impliquée par exemple dès qu'il faut changer de consigne et maintenir cette consigne en mémoire jusqu'au changement suivant. Ces composantes pourraient partager des processus communs tels que le contrôle attentionnel et la vitesse de traitement. Ces trois composantes semblent encore indifférenciées entre 2 et 5 ans et deviennent très progressivement indépendantes.

Le travail récent le plus important sur ce sujet est celui de Lee et ses collaborateurs incluant un suivi pendant quatre ans de 688 enfants âgés de 6 à 15 ans. Ces auteurs rapportent une amélioration des performances en mémoire de travail et sur la fonction de mise à jour jusqu'à 15 ans. Concernant la spécificité et l'indépendance des composantes évaluées, il semble que, jusqu'à 11 ans, l'inhibition et la flexibilité mentale ne soient pas clairement dissociées, alors qu'entre 11 et 14 ans s'opère une période de transition où se distinguent progressivement les trois composantes qui seront clairement spécifiques à 15 ans. Ainsi, dans une tâche qui requiert de passer d'une consigne à une autre et donc de mobiliser ses capacités de flexibilité mentale, les enfants les plus jeunes solliciteront des mécanismes

assez généraux pour arrêter la tâche en cours, éviter de persévérer sur l'ancienne consigne et réengager son attention dans un autre exercice. Ces stratégies sont plus coûteuses, plus longues et moins précises ou efficaces que celles des adolescents plus âgés qui seront capables de mobiliser directement leurs capacités de flexibilité mentale pour s'adapter rapidement à la situation. Ils pourront ainsi gérer une succession plus importante de changements contrairement aux plus jeunes. Il faut tout de même garder à l'esprit que, même si les adolescents sont capables de mobiliser de plus en plus leurs fonctions exécutives pour améliorer leurs apprentissages, ces fonctions restent encore pour beaucoup indifférenciées. Ce n'est qu'au milieu de l'adolescence que ces fonctions pourront être sollicitées séparément pour un fonctionnement optimal.

Il est possible également de dresser un profil de développement des différents sous-systèmes de la mémoire de travail. Plusieurs études se sont intéressées au modèle proposé par Baddeley (2000) : un administrateur central qui coordonne les systèmes satellites que sont la boucle phonologique, le calepin visuo-spatial et le *buffer* épisodique (Figure 3). La boucle phonologique a pour objet de transformer une information verbale perçue en modalité visuelle ou auditive en un code phonologique. Elle met donc en jeu les processus cognitifs nécessaires à la perception et à la production du langage. Elle est mobilisée lorsque nous répétons un numéro de téléphone le temps de le composer mais aussi dès qu'il faut comprendre une phrase, une consigne ou même suivre un dialogue. Le calepin visuo-spatial, décrit par analogie à la boucle phonologique, est impliqué dans le maintien à court terme et la manipulation de l'information visuelle ou spatiale ainsi que dans la planification de l'action. Il permet l'exécution de mouvements, la poursuite perceptivo-motrice, la génération et la transformation d'images visuo-spatiales. Il intervient donc dans la génération des images mentales, quand nous nous représentons un lieu, une situation et même quand nous laissons libre court à notre imagination. Le

buffer épisodique sous-tend la création de traces multimodales : c'est un espace tampon entre la mémoire de travail et la mémoire épisodique. En ce sens, il est indispensable à l'encodage et à la restitution de souvenirs épisodiques. Il permet d'associer entre eux le quoi (j'ai fait du roller), où (dans la cour de l'école), quand (ce matin), avec qui (l'enseignante, Mme Lemonnier et les enfants de la classe), les couleurs, les odeurs, etc., pour créer un souvenir cohérent. Enfin, le système superviseur (ou administrateur central) coordonne les trois systèmes esclaves, focalise l'attention, change le foyer attentionnel, active les représentations en mémoire à long terme, contrôle la planification et les stratégies de récupération. De par ces fonctions, il renvoie aux fonctions exécutives.

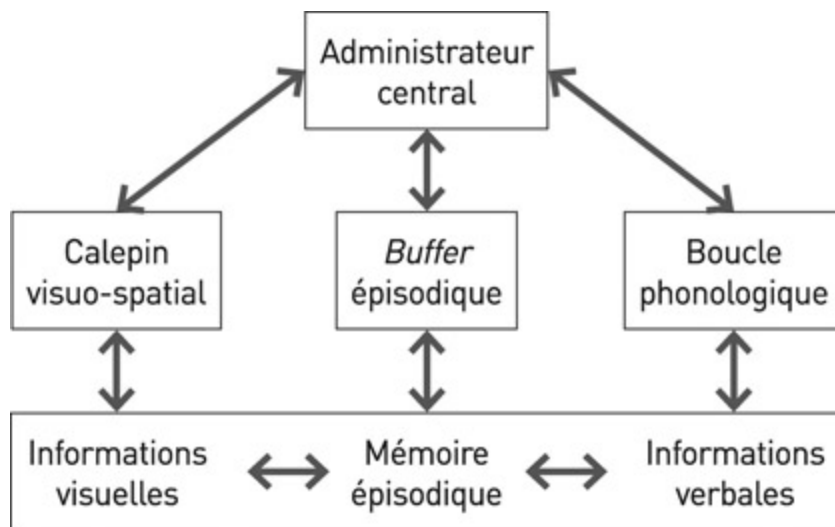


Figure 3. Modèle de mémoire de travail

Le modèle proposé par Alan Baddeley en 2000 comprend un administrateur qui coordonne trois systèmes esclaves, c'est-à-dire le calepin visuo-spatial, le *buffer* épisodique et la boucle phonologique. Ces systèmes esclaves gèrent également le passage en mémoire à long terme.

Vers 6 ans, il est possible de retrouver l'organisation décrite par Baddeley : boucle phonologique, calepin visuo-spatial, *buffer* épisodique et administrateur central. Le développement des capacités de stockage passif, dans la boucle phonologique et dans le calepin visuo-spatial, s'observe principalement jusqu'à 8 ans, avec une évolution plus modérée

jusqu'à 12 ans (Gathercole, 1998). Ces capacités renvoient à la notion d'empan mnésique, c'est-à-dire le nombre d'informations que nous pouvons rappeler juste après les avoir perçues. Ainsi, il est possible d'observer une progression globalement linéaire entre l'âge de 3 ans et l'âge de 13 ans de l'empan de chiffres ou de lettres qui passe de deux à sept éléments en moyenne. L'empan visuo-spatial atteint également le niveau de performances de l'adulte vers 11 ans. Par ailleurs, les enfants âgés de moins de 7 ans n'utilisent pas spontanément la répétition subvocale, c'est-à-dire le fait de répéter en pensée, pour retenir une liste d'objets. À ces âges, la rétention est plutôt passive et, dès que les enfants commencent à utiliser la répétition subvocale, il est souvent possible d'observer des mouvements de lèvres. Aussi, le double codage verbal et visuel que nous utilisons pour mémoriser une information visuelle dénommable comme une photographie d'objet ne peut se faire qu'une fois que l'enfant sait mobiliser ses capacités de répétition subvocale, donc autour de 7 ans. Auparavant, les jeunes enfants s'appuient davantage sur le calepin visuo-spatial pour retenir les informations visuelles. Les capacités de manipulation d'un matériel verbal ou visuo-spatial, impliquant davantage l'administrateur central, évoluent encore après cet âge. Ainsi, chez les enfants plus âgés et chez les adultes, les stratégies changent et des regroupements (ou *chunks*) augmentent la taille de l'empan.

Concernant le calepin visuo-spatial, plusieurs études rapportent que, dès la fin de la première année, les nourrissons sont capables de détecter des changements dans une courte série d'informations visuelles. Il semble également que la mémorisation de localisations émerge vers l'âge de 6 mois. À cet âge, le nourrisson peut déjà retenir un objet et cette capacité augmente, et, vers 12 mois, elle atteint trois à quatre objets. La maturation frontale participe largement à ce développement à la fin de la première année de vie. L'évaluation du fonctionnement de la mémoire de travail chez l'enfant doit tenir compte de plusieurs facteurs : l'intérêt pour l'information,

l'attention, la sensibilité à la distraction et les traits de caractère de l'enfant. Tous ces facteurs ont bien sûr un impact sur la capacité à mobiliser sa mémoire de travail.

Des études plus récentes s'intéressent au *buffer* épisodique par le biais d'exercices de mémorisation d'associations d'informations différentes, telles qu'un dessin placé dans une grille (« quoi » associé à « où ») et mettent également en évidence une évolution tardive. La capacité à créer des relations entre deux informations ou plus (un objet placé à un endroit précis par exemple), évolue jusqu'à l'âge adulte. Ces compétences sont particulièrement importantes, car elles interviennent dans la formation et la restitution des souvenirs en mémoire à long terme. La capacité à relier deux informations verbales présentées dans deux modalités différentes, l'une visuelle et l'autre auditive, est également essentielle à l'apprentissage de la lecture. De récents travaux utilisant notamment la technique d'*eye-tracking* (ou oculométrie) qui permet d'enregistrer les mouvements du regard, mettent en évidence des capacités associatives dès 9 mois ; d'autres travaux ont même retrouvé des capacités associatives (couleur et localisation spatiale) dès 7 mois et demi, et, lorsqu'on oriente l'attention avec des indices spécifiques, les nourrissons de 5 mois seraient même capables d'associer la couleur d'un objet à sa localisation spatiale. Cette mémoire relationnelle se développerait rapidement entre 0 et 2 ans, puis progresserait plus lentement durant les quatre années suivantes, notamment en raison de la maturation importante de l'hippocampe (structure importante pour la mémoire associative) pendant les deux premières années postnatales, qui ralentirait par la suite.

Le développement des capacités d'association est également dépendant du type d'information utilisé. Ainsi, l'amélioration des capacités d'association d'un matériel verbal (plusieurs mots dans une phrase) peut s'observer avant la capacité à retenir des informations de modalités

différentes, verbale et spatiale par exemple, comme un plan comprenant des noms de rue par exemple.

Mémoire implicite et mémoire explicite : regards croisés

Après s'être arrêté sur le développement de la mémoire de travail, il est important de détailler l'évolution de la mémoire à long terme. Cette mémoire à long terme a tout d'abord été abordée sous l'angle de la dichotomie implicite/explicite : ce que nous faisons automatiquement et ce qui nécessite un effort conscient de récupération en mémoire. La mémoire implicite est essentielle aux apprentissages, comme l'apprentissage des régularités dans la lecture ou l'écriture. Le fait de rencontrer plusieurs fois une même information permet à l'enfant de retenir certaines règles, et cela à son insu, comme le doublement de certaines consonnes telles que « m » ou « p » et non « h », et que ce doublement se fait en milieu de mot et non à la fin. Au-delà, la mémoire implicite intervient dans l'apprentissage de nouvelles connaissances sémantiques que nous détaillerons ci-après. Elle est la première forme de mémoire à se mettre en place chez le bébé avec une certaine stabilité, contrairement à la mémoire explicite impliquant le rappel conscient d'informations (souvenirs et connaissances) dont le développement est plus tardif et prolongé. En effet, la mémoire implicite est beaucoup moins associée à la métamémoire, c'est-à-dire la connaissance de son propre fonctionnement mnésique, et au développement des stratégies mnésiques en comparaison à la mémoire explicite. Son fonctionnement est donc observable très tôt dans le développement. Les travaux sur le conditionnement opérant de l'équipe de Rovee-Collier ont notamment démontré que, dès 2 mois, les nourrissons étaient capables de faire bouger

un ruban attaché à leur pied pour faire remuer un mobile et de s'en souvenir vingt-quatre heures après.

Il est possible d'aborder la mémoire implicite sous l'angle de l'amorçage, c'est-à-dire le fait que la présentation d'une information modifie le traitement ultérieur de cette même information ou d'une information très proche d'un point de vue perceptif ou sémantique et cela, à notre insu. Prenons l'exemple des courses en supermarché. Nous détectons très rapidement les articles que nous avons l'habitude d'acheter sans nous rappeler consciemment leur apparence. Ces phénomènes implicites nous permettent de former des représentations et des connaissances de façon automatique, par exposition et imprégnation, et qui vont en retour modifier notre comportement. Nous pouvons distinguer deux formes d'amorçage, l'une basée davantage sur les propriétés perceptives (images, dessins, lettres, sons) et l'autre sur des propriétés sémantiques (signification des mots). L'exemple du plagiat littéraire involontaire illustre bien ce phénomène d'amorçage sémantique. Les travaux de recherche s'intéressant à l'amorçage perceptif observent peu de variations entre des enfants de 3 ans et des enfants plus âgés, soulignant le développement précoce de la mémoire implicite. Toutefois, il est important de moduler ces résultats en tenant compte de la complexité de l'information. En effet, il est possible d'observer une amélioration des performances d'amorçage perceptif avec l'âge pour des informations complexes et il en est de même avec l'amorçage sémantique. Dans ce cas, le développement semble encore plus tardif et cette sensibilité à l'âge pourrait être liée à l'évolution du réseau de connaissances tenant compte de l'enrichissement du vocabulaire et des concepts.

Bien que conceptualisées comme deux formes de mémoire distinctes, il existe de nombreuses interactions entre la mémoire implicite et la mémoire explicite. L'amorçage favorise la reconnaissance explicite par des phénomènes de fluence perceptive, c'est-à-dire que le fait d'avoir traité une

information, par exemple un mot, un dessin ou même un objet, facilite son identification ultérieure et cela de façon automatique comme dans l'exemple du supermarché cité ci-dessus. En effet, les informations qui sont reconnues comme ayant été mémorisées sont identifiées plus rapidement chez les grands enfants (c'est cette vitesse d'identification qui traduit l'amorçage). Ces interactions ne semblent s'observer qu'à partir de 5 ou 8 ans selon les études. Plus les enfants grandissent, plus ils ont conscience du lien entre ce sentiment de familiarité et le fait d'avoir vu l'information au préalable. Ils intégreront donc cette information dans leur jugement de reconnaissance. Nous pouvons donc voir en ces mécanismes les prémices de la métamémoire, c'est-à-dire la capacité que nous avons à réfléchir sur le fonctionnement de notre propre mémoire et à adapter nos stratégies en conséquence.

Mémoire sémantique

La mémoire sémantique est centrale dans le fonctionnement cognitif, fondamentale pour la production et la compréhension du langage, la lecture et l'écriture, mais aussi la perception des objets et des visages, etc. Elle participe également à notre identité par le biais des connaissances autobiographiques comprenant à la fois des informations personnelles, telles que notre adresse ou les noms de personnes de notre entourage, et des événements généraux, comme savoir que nous allons en vacances en Bretagne chaque année. Elle se met en place globalement plus tôt que la mémoire épisodique.

Deux périodes peuvent être distinguées dans le développement des connaissances sémantiques : les périodes préverbale et verbale. Les connaissances sont dépendantes des interactions avec l'environnement (fréquence d'exposition et contexte). Lors de la période préverbale, le bébé

détaille progressivement ses connaissances, de la catégorie aux exemplaires. Ainsi, il va par exemple appeler tous les fruits des « pommes » puis, progressivement, identifier les pommes en tant que telles et les différencier des oranges et des autres fruits. Il prend en compte les informations perceptives essentielles (par exemple, les yeux), les mouvements et les relations spatiales (sur, dans, etc.), puis les associations conceptuelles (les animaux boivent, par exemple) selon deux processus : attentionnel (différenciation) et automatique (en lien avec l'émotion notamment). Ainsi, dès 7 mois, le nourrisson est capable de différencier des catégories telles que les animaux *versus* les véhicules. Ce n'est qu'autour de 8 mois que le jeune enfant parvient à se représenter mentalement un objet et à agir sur le monde qui l'entoure, étape caractérisée par la mise en place de ce qu'on appelle la « conscience noétique », propre à la mémoire sémantique, qui se définit par la capacité à manipuler des représentations mentales d'objets indépendamment de leur présence, à créer et à réfléchir sur des savoirs et des connaissances. À partir de 16 mois environ, il peut généraliser et faire des inférences. Le langage favorise enfin l'acquisition de concepts non spatiaux (couleurs par exemple). Ces connaissances sont utilisées pour faciliter l'acquisition et la rétention de nouvelles informations. Dans l'acquisition d'un stock lexico-sémantique, il est important de dissocier le nom (ou l'étiquette lexicale) du concept, à la fois dans le développement normal et dans différentes pathologies, tel que nous l'avons montré au sein de notre laboratoire. Les enfants acquièrent jusqu'à 10 mots par jour avec environ 60 000 mots à disposition au lycée. De façon générale, les enfants acquièrent le sens des mots au travers de différents supports oraux et écrits en comprenant leur relation avec le contexte d'utilisation. Les discussions et la lecture ont ainsi un impact direct sur l'acquisition du vocabulaire.

Le développement du réseau de connaissances a des répercussions sur d'autres activités cognitives : les capacités d'inférence par exemple qui

peuvent conduire dans certains cas à la création de faux souvenirs. Par exemple, penser que, comme nous avons vu des oranges et des pommes dans une corbeille, il devrait y avoir également d'autres fruits de saison comme des clémentines. Ce phénomène est tout à fait normal et peut être induit de façon expérimentale : si nous apprenons une liste de mots appartenant à la catégorie « bonbon », tels que « guimauve », « sucette », etc., mélangés à d'autres mots et qu'au moment de la phase de reconnaissance, nous représentons ces mots ainsi que « bonbon » qui n'a pas été proposé initialement, nous aurons tendance à reconnaître ce mot comme déjà vu, et donc faire une « fausse reconnaissance ». Ce paradigme a été adapté à l'enfant et les données montrent que les jeunes enfants font moins de fausses reconnaissances que les adultes, car leur réseau sémantique ou réseau de connaissances n'est pas suffisamment détaillé et organisé pour activer automatiquement des concepts proches. En revanche, ces résultats peuvent s'inverser si nous utilisons comme support une vidéo sur des événements de la vie quotidienne : les enfants font alors plus de fausses reconnaissances que les adultes. Les informations présentées pourraient à elles seules activer de façon inconsciente et rapide tout le thème qui est évoqué par la vidéo, ce qui pousserait les enfants à reconnaître des détails qui ne sont pas présentés en réalité. Prenons l'exemple d'un film sur une fête d'anniversaire : quelques images pourraient activer en mémoire de nombreuses représentations sur les fêtes d'anniversaire et encourager l'enfant à reconnaître certains détails comme faisant partie de la vidéo, tels que la présence de bonbons, alors qu'ils n'ont pas été présentés.

La mémoire épisodique sous l'angle de l'amnésie infantile

Les souvenirs épisodiques sont des souvenirs d'événements et d'expériences autobiographiques spécifiques en lien avec soi et au sujet desquels nous pouvons avoir des émotions, des pensées, des réactions et des réflexions. Les souvenirs autobiographiques renvoient à des événements survenus une seule fois (et non récurrents), que l'on peut exprimer verbalement, et qui persistent dans le temps. La mémoire autobiographique se définit par la capacité à construire une suite de souvenirs d'événements courts liés temporellement, tels que ceux que l'on retrouve dans une histoire de vie ou une autobiographie. Cela implique que le rappel en mémoire autobiographique repose sur une conscience autobiographique définie comme la conscience de soi dans le présent qui est différente, mais liée temporellement, du soi dans le passé qui a vécu l'événement. Ce n'est vraiment qu'à l'adolescence que l'on observe des récits spontanés qui marquent cette différence.

Une fois adulte, il est quasiment impossible de se souvenir d'événements survenus avant l'âge de 3 ans. Faites l'expérience et recherchez dans votre mémoire le premier souvenir que vous avez, en évitant les événements qui sont souvent évoqués en famille ou ailleurs. Quel âge aviez-vous au moment de cet événement ? Les souvenirs d'événements survenus entre 3 et 7 ans sont peu nombreux. Le plus souvent, les souvenirs qui seront rappelés à ce moment ont une connotation émotionnelle particulière. Ce phénomène a été décrit par Freud sous le terme d'« amnésie infantile » (Freud, 1905/1935). Depuis, plusieurs hypothèses explicatives ont été formulées :

1. Les expériences des enfants seraient non verbalisables et ne peuvent être accessibles à la conscience en tant que représentation mentale. Il est vrai que le langage permet de reformuler et de réactiver les souvenirs autobiographiques dans les échanges avec les parents le plus souvent ; il permet de structurer le souvenir qui sera plus accessible une fois adulte. En ce sens, le langage est un élément essentiel du développement de la

mémoire autobiographique (voir Nelson et Fivush, 2004 ; Fivush, 2011 ; Figure 4). Lorsque des parents échangent le soir avec leurs enfants sur la journée écoulée à l'école, le plus souvent, ils proposent d'emblée une structure temporelle en évoquant les activités du matin puis le repas et, enfin, l'après-midi. Ces échanges permettent d'organiser les souvenirs selon une certaine chronologie, avec un début de l'action puis une fin, et d'y associer des détails ou des impressions. Ces mêmes détails pourront être repris dans d'autres échanges pour évoquer d'autres souvenirs et créer une certaine continuité.

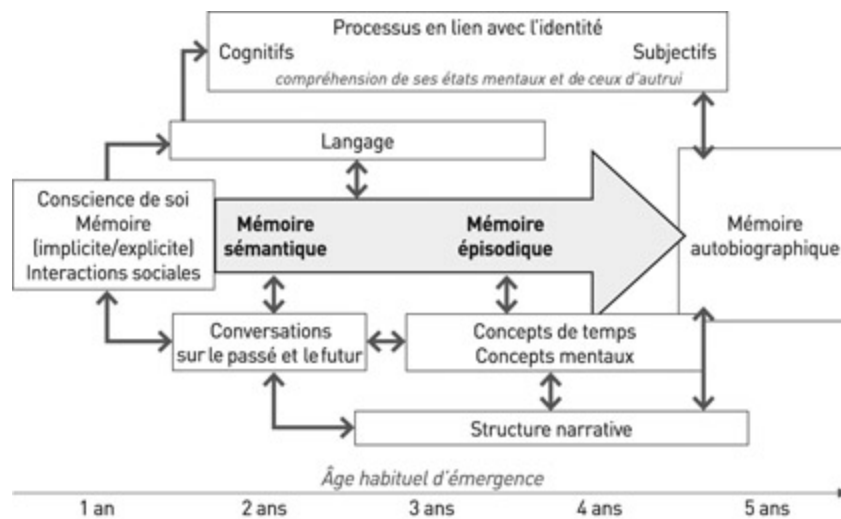


Figure 4. Modèle développemental de la mémoire autobiographique

Ce modèle simplifié (inspiré de Nelson et Fivush, 2004) reprend les différents facteurs intervenant dans l'émergence de la mémoire autobiographique en tenant compte de l'âge de l'enfant. Les facteurs sont représentés du plus exogène (en bas) au plus endogène (en haut). Tous ces facteurs entretiennent des relations entre eux mais seules les principales sont représentées ici par des flèches.

2. La maturation cérébrale des régions dévolues à la mémoire consciente, et notamment les régions frontales, n'est pas suffisante pour maintenir les traces des expériences ; elle ne permettrait pas d'encoder et de restituer le souvenir et sa source (c'est-à-dire où et quand l'événement s'est déroulé). Ces régions préfrontales suivent en effet une lente maturation jusqu'à la fin de l'adolescence.

3. Le contexte perceptif des premières années de vie est très différent de celui de l'adulte et, en conséquence, ne peut être rappelé une fois adulte. Faites l'expérience du terrain de football ! Nous avons tous fréquenté un lieu quand nous étions enfant, comme un terrain de football, que nous avons redécouvert une fois adulte, après plusieurs années. Nous constatons que les dimensions que nous avons en mémoire sont bien différentes de celles perçues aujourd'hui que nous sommes adulte et c'est ainsi que notre terrain qui semblait faire plusieurs hectares dans notre souvenir d'enfant se transforme en terrain de moins de 5 000 mètres carrés...

4. Pour la psychanalyse, quand l'enfant est face au principe de réalité, il refoule dans son inconscient tous ses souvenirs en désaccord avec ses représentations de lui-même. Ce mécanisme de défense permet d'assurer la protection du moi en évitant la réactivation de souvenirs et sentiments dérangeants. Ces souvenirs seraient donc soit effacés, soit déformés ou incomplets.

5. Le *self* (ou l'identité) serait encore immature, et un développement suffisant du *self* est nécessaire, car il procure un réseau personnel de référence pour organiser les souvenirs autobiographiques. En effet, le petit enfant ne se reconnaît dans un miroir que vers l'âge de 18 mois, il ne pourra se décrire physiquement que vers 4 ans environ et un peu plus tard les traits de son caractère. Il en est de même avec la théorie de l'esprit qui renvoie à la capacité à attribuer et à comprendre ses propres états mentaux et ceux des autres (*Theory of Mind*, ou ToM) : un développement suffisant de la ToM est nécessaire pour rappeler un souvenir comme personnellement vécu et non simplement n'en conserver qu'un sentiment de familiarité. Nous reviendrons sur ce point lorsque nous détaillerons le développement de la métacognition.

6. Les souvenirs d'enfance seraient plus facilement oubliés : l'oubli est d'autant plus important que l'enfant est jeune. Les études chez l'animal montrent que ce résultat ne semble pas dû à une richesse d'encodage

moindre (force de l'apprentissage d'origine) et que l'entraînement ne permet pas de compenser totalement cet oubli plus marqué chez les plus jeunes. Ces travaux suggèrent également qu'il existerait des difficultés de restitution d'importance différente à l'origine de l'oubli infantile. Des difficultés modérées de restitution pourraient être compensées par un renforcement, par la concordance des contextes d'encodage et de restitution. En revanche, des difficultés plus importantes pourraient induire un oubli sévère et rendre les traces de moins en moins accessibles, même en présence d'indices.

De la mémoire événementielle à la mémoire épisodique

La mémoire sémantique est essentielle au développement de la mémoire épisodique. Il est classique de constater que la mémorisation est meilleure quand les informations reposent sur des connaissances déjà acquises et que l'information est porteuse de sens pour l'enfant. Pour créer un souvenir épisodique, il est indispensable d'associer entre eux tous les aspects du souvenir : les perceptions, les sensations, les pensées, la localisation spatiale et temporelle... l'enfant doit être capable de retenir le contenu de l'événement (« j'ai joué au loup »), mais aussi le contexte dans lequel celui-ci s'est produit (« dans la cour de l'école, avec Charlotte, à la récréation de midi, hier, juste avant d'aller à la cantine »). La mémoire épisodique est par conséquent extrêmement complexe et fait intervenir de nombreux processus cognitifs qui nécessitent d'être suffisamment matures pour fonctionner. Aussi, elle est le système mnésique qui se met en place le plus tardivement chez l'enfant. Même si les enfants sont capables d'imitation différée dès la première année de vie (à 6 mois, les enfants peuvent rappeler un événement

vingt-quatre heures après l'avoir vécu et à 9 mois, un mois après l'avoir vécu), ils ne peuvent pas faire le lien avec une information temporelle spécifique nécessitant un voyage mental dans le temps, et leur capacité de réexpérimenter ou de revivre l'épisode reste encore largement immature. Il faut attendre environ 5 ans pour parler véritablement de souvenir épisodique.

En revanche, il est bien sûr possible d'observer avant 5 ans des capacités de rappel pour certains contenus d'événements personnels. Il devient alors possible de parler de « mémoire événementielle ». Néanmoins, ce type de mémoire n'est pas identique à la mémoire épisodique, en cela qu'elle n'implique pas la « conscience autoérotique », c'est-à-dire la conscience que nous avons de nous-même au travers du temps, qui nous permet de voyager mentalement dans le temps tout en gardant un sentiment de continuité. L'enfant ne peut pas fournir des détails sur l'événement. La reviviscence d'un événement par l'enfant suppose l'émergence et l'efficacité de processus mnésiques spécifiques (par exemple, la mémorisation d'informations factuelles, spatiales et temporelles) en interaction avec d'autres capacités cognitives (le langage, la mémoire, la théorie de l'esprit). Ainsi, ce n'est que vers 5 ans qu'émerge véritablement la mémoire épisodique avec un développement rapide jusqu'à 10 ans, puis plus modéré jusqu'à l'âge adulte. Par ailleurs, il semble que ce développement ne s'opère pas de façon linéaire. En effet, des travaux rapportent une diminution des performances au cours de l'adolescence. Cette diminution des performances est observée dans certains contextes expérimentaux précis comme la mémorisation d'une liste de mots. Il est donc difficile d'en faire une généralisation à l'ensemble du fonctionnement mnésique. Cette diminution des performances pourrait traduire à la fois des modifications neurobiologiques et cognitives. À cette période, il existe encore une maturation de la connectivité neuronale qui pourrait perturber temporairement le fonctionnement de certains réseaux

cérébraux. Concernant la dimension cognitive, des modifications dans les stratégies de mémorisation, favorisant la conceptualisation ou la synthèse par exemple, pourraient s'opérer au détriment de certaines conditions d'apprentissage. Enfin, il est indéniable que l'intérêt qu'un adolescent porte à la mémorisation d'une liste de mots est réduit, ce qui pourrait également participer à cette baisse de performances. Ces différents arguments soulignent déjà l'importance de certains facteurs tels que les stratégies de mémorisation, l'intérêt ou la motivation face au matériel à retenir.

Ces données démontrent que le profil de développement est différent selon le matériel et les conditions expérimentales utilisées. Par exemple, de façon générale, les capacités de reconnaissance d'une information déjà vue (« je t'ai montré le chien ou le chat ? »), moins coûteuses d'un point de vue exécutif, sont observées chez l'enfant plus tôt que les capacités de rappel en l'absence d'indice de récupération (« qu'est-ce que je t'ai montré ? »). Le rappel auto-initié d'un souvenir épisodique pourra s'effectuer lorsque les connaissances sémantiques seront suffisantes et que l'enfant aura atteint un niveau de développement exécutif lui permettant d'aller rechercher en mémoire son souvenir.

De la même façon, l'évolution des performances avec l'âge est différente en fonction du type de contenu à mémoriser (Figure 5). Dans notre laboratoire, nous avons mené une étude auprès d'enfants âgés de 6 à 10 ans et d'adolescents de 11 à 23 ans. Ces participants devaient mémoriser des paires d'items différentes : même modalité (photographies d'animaux associées à une caractéristique, habitat ou nourriture : quoi), associée à une modalité spatiale (photographies d'animaux positionnées dans une grille : où) et temporelle (photographies d'animaux présentées dans un ordre spécifique : quand). Les résultats obtenus mettent en évidence trois profils de développement : les performances progressent rapidement pour le contenu de même modalité, elles sont plus linéaires pour le contenu spatial et nous observons une amélioration brusque des performances entre 9 et

10 ans pour le contenu temporel. Cette composante temporelle est celle qui évolue encore tardivement. Il est donc essentiel de tenir compte du type d'information à mémoriser chez l'enfant d'âge scolaire et du contexte qui lui est associé, ce que nous détaillerons ci-dessous.

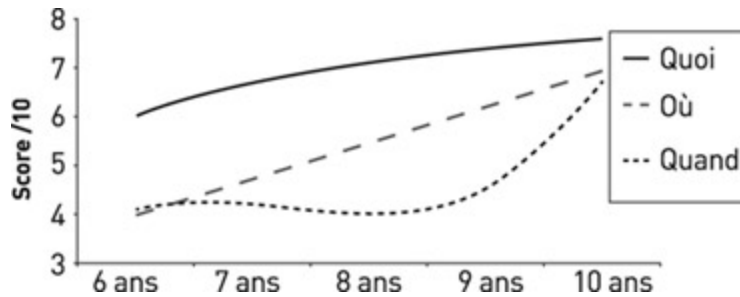


Figure 5. Développement de la mémoire épisodique

Une étude menée dans le laboratoire auprès d'enfants de 6 à 10 ans montre que l'évolution des capacités de mémorisation varie en fonction du type d'information à mémoriser : « quoi » (paires d'images), « où » (position spatiale d'images) et « quand » (ordre de présentation d'images). Alors que la mémorisation du « quoi » atteint un plateau assez rapidement, la mémorisation du « où » évolue de façon linéaire et, pour le « quand », les performances s'améliorent de façon marquée entre 9 et 10 ans.

La mémoire contextuelle

La mémoire contextuelle fait référence à toutes les informations sur les circonstances dans lesquelles un événement est mémorisé (spatiales, temporelles, etc.). Elle nécessite donc de relier des informations entre elles pour créer un souvenir spécifique et détaillé d'un épisode de vie. Elle se met en place plus tard que la mémoire de l'information isolée, comme de l'objet lui-même. La mémorisation d'informations liées se développe considérablement entre 3-4 ans et 7-8 ans. À partir de 7-8 ans, les enfants bénéficient davantage des consignes, favorisant la création de ces liens entre les informations. Cette mémoire contextuelle continue à se développer au-delà de 10 ans, bien après les capacités de mémorisation d'informations

isolées, notamment en raison de ses liens avec la mémoire de travail et les fonctions exécutives.

L'importance du temps

Le contexte temporel présente un statut particulier et sa maîtrise progresse lentement au cours du développement. La situation temporelle d'un événement personnellement vécu est souvent inférée à partir des informations non temporelles retrouvées (« je portais un short donc cela devait être l'été »), associées à des connaissances générales temporelles d'ordre social (fêtes, périodes de vacances), personnel (« mes années de lycée »), conventionnel (calendrier) et certains moments de référence (mariage, naissances, etc.). Jusqu'à 4 ans, les enfants s'appuient sur la distance temporelle par rapport à l'événement pour situer ce dernier. En revanche, plusieurs études montrent qu'à partir de 4 ou 5 ans et aidés de l'entourage, les enfants sont capables de réaliser un véritable acte de reconstruction et de rappeler le moment de la journée pour un événement survenu plusieurs semaines auparavant. En revanche, il faut attendre l'âge de 6 ans environ pour que les enfants soient capables de faire des inférences sur une échelle temporelle plus importante. Au-delà de la perception du temps, il est indispensable que les enfants aient un niveau de connaissances sur le temps suffisant : jours de la semaine, mois, saisons. Aussi, à 6 ans, les enfants peuvent ordonnancer les saisons, voire les jours de la semaine, mais ce n'est qu'un peu plus tard que les mois qui composent une année sont récités correctement et, sans doute à l'adolescence, que ces connaissances deviennent flexibles et manipulables avec aisance. Aux connaissances sur le temps, il faut ajouter les fonctions exécutives qui participent à reconstruire l'échelle temporelle et à restituer des événements passés. Elles aussi suivent un développement progressif et tardif.

Une autre dimension temporelle est également essentielle dans le souvenir épisodique : l'organisation au sein de l'événement. La narration ou le fait d'évoquer le déroulement de l'élément dans une histoire facilitera son rappel ultérieur. Le rappel du déroulement de l'événement peut également être facilité par des inférences (« Théodore arrive toujours avant que je parte, donc il devait être présent »), des scripts généraux (le déroulement type d'un repas au restaurant) et des connaissances sémantiques personnelles. Vers 2 ou 3 ans, les enfants produisent des phrases simples sur les événements qu'ils ont vécus. Progressivement, ils introduisent des marqueurs temporels, par exemple avant/après, puis une situation temporelle plus précise. Ce n'est qu'entre 7 et 10 ans que les enfants rappellent spontanément quand l'événement s'était déroulé. La mention aux références temporelles dans les souvenirs continue à évoluer jusqu'à l'âge adulte.

Connaître l'origine du souvenir

Il existe un type particulier d'information contextuelle qui est l'origine de l'événement et qui renvoie à ce que l'on nomme la « mémoire de la source » : d'où je tiens cette information ou qui me l'a fournie. Rappeler la source met en jeu une série d'inférences à partir des représentations mnésiques, des connaissances sur le monde et sur le fonctionnement de notre pensée. La plupart du temps, nous enregistrons et rappelons la source de façon automatique à partir de détails perceptifs (« le timbre de voix de la personne qui m'a aidé à retrouver mon chien »), contextuels (temporels ou spatiaux), sémantiques (le contenu de la conversation avec cette personne), émotionnels (la réaction de surprise de cette personne) et des pensées que nous avons eues à ce moment. Ainsi, si le souvenir de l'événement est très détaillé, il sera plus facile d'en rappeler la source. Des indices peuvent également être proposés dès la phase d'encodage, comme les consignes

fournies pour comprendre un texte, qui seront réutilisées par la suite automatiquement pour rappeler la source de l'événement. L'encodage en mémoire peut également être intentionnel et nécessiter des processus plus contrôlés, comme générer une phrase ou une image mentale à partir des mots à retenir. Se rappeler comment nous avons généré l'image mentale de ce mot nous permettra de préciser si ce mot a été lu ou prononcé. Ce type de situation est particulièrement intéressant dans un contexte d'apprentissage et de correction des erreurs. Elle permet de faire prendre conscience à l'enfant des situations et des opérations qui sont à l'origine de l'erreur produite à la séance précédente. Avec l'aide de l'enseignant, il pourra corriger l'erreur pour s'orienter vers la solution optimale.

La mémoire de la source est également liée à la nature de la représentation mnésique qui change de façon importante entre 3 et 5 ans. Initialement, les enfants pensent que ce que nous voyons est identique à ce que nous avons en mémoire. Leur représentation est une copie de l'expérience perceptive qu'ils ont du monde. Cela est dû en partie au fait qu'ils ne sont pas encore capables de voyager mentalement dans le temps. Nous reviendrons sur ces aspects lorsque nous aborderons la métacognition. Aussi, un enfant de 3 ans a des difficultés à différencier ce qu'il pense de ce qu'il rêve ou de ce qu'il souhaite. Il peut faire la confusion entre un rêve comprenant de nombreux détails perceptifs et la réalité, par exemple, penser qu'un terrible monstre est dans sa chambre alors qu'il l'a imaginé. L'adulte peut également avoir ce type d'impression, mais son fonctionnement exécutif et ses connaissances font qu'il raisonnera et fera la différence entre la réalité et la fiction. Le développement progressif de la mémoire de la source permettra également de retrouver l'origine de l'événement, à savoir s'il est vécu ou imaginé. La mémoire de la source se développe jusqu'à l'adolescence en parallèle des capacités attentionnelles de contrôle cognitif, mais aussi métacognitives. Par exemple, les enfants de 5 ans sont capables de différencier une source interne (« je l'ai imaginé ») d'une source externe

(« quelqu'un me l'a dit »), mais il faut attendre un peu plus tard pour qu'ils réussissent à distinguer deux sources internes (lue ou imaginée).

Les projections dans le futur

La plupart des travaux scientifiques concernent la composante passée de la mémoire autobiographique, mais il est intéressant de considérer également les capacités à se projeter dans le futur ou la « pensée future » qui nous permet d'anticiper le déroulement de certains événements. La capacité à penser à une action future marque une évolution entre 3 et 5 ans. Les jeunes enfants peuvent utiliser leurs connaissances générales pour imaginer un événement futur, mais pas encore des détails épisodiques. Dès 3 ans, ils sont donc capables d'imaginer un événement futur simple, mais leur capacité est influencée par leurs compétences en mémoire de travail et de raisonnement par inférence. Avec le développement de ces dernières compétences, ils peuvent progressivement imaginer des actions de plus en plus complexes impliquant plusieurs objectifs. Son évolution suit globalement la même trajectoire développementale que la composante passée de la mémoire autobiographique et s'appuie sur la capacité à construire une représentation mentale de scènes reposant notamment sur la mémoire associative, la mémoire spatiale et les fonctions exécutives.

La mémoire prospective

La mémoire prospective se distingue de la mémoire rétrospective par le fait qu'elle concerne la capacité à se souvenir de réaliser une ou plusieurs actions dans le futur, malgré l'interférence que produiront les activités qui

auront lieu avant la réalisation de cette action (par exemple, aller chercher du pain après sa journée de travail). La mémoire prospective est indispensable au quotidien, y compris dans un contexte d'apprentissage. La pensée future serait un précurseur de la mémoire prospective et cette dernière évolue jusqu'à l'adolescence. Son développement dépend de différents facteurs revus par l'équipe de Mahy en 2014 :

1. La capacité à se souvenir du contenu de l'action à réaliser (« ce que je dois faire ») évolue avec l'âge. Aussi, les difficultés que les enfants de 2 ans ont pour réaliser une action planifiée en amont peuvent être dues à un oubli de ce qu'ils doivent faire.

2. La métacognition, ou métamémoire, c'est-à-dire les connaissances que nous avons sur notre mémoire, influence nos stratégies cognitives.

3. La capacité de se projeter dans le futur facilite la préparation d'une action.

4. Les fonctions exécutives permettent de manipuler, de modifier des représentations et de s'adapter de façon optimale aux situations nouvelles. Les auteurs insistent sur ce dernier point en soulignant l'importance de la mémoire de travail, de la planification, de la flexibilité mentale et du contrôle cognitif à différentes étapes du fonctionnement de la mémoire prospective. La mémoire de travail serait particulièrement impliquée dans le maintien de l'intention, alors que l'inhibition permettrait d'interrompre l'activité de routine pour réaliser l'action prévue, comme s'arrêter de faire du vélo quand nous passons devant la boulangerie pour acheter du pain. Aussi, il serait nécessaire que les enfants aient un niveau de développement exécutif suffisant pour qu'émerge la mémoire prospective, c'est-à-dire à partir de 3 ans. Son développement est important entre 3 et 5 ans puis se poursuit jusqu'à l'adolescence.

Plusieurs facteurs ont un impact sur le fonctionnement de la mémoire prospective : l'intérêt ou la motivation à réaliser l'intention, le nombre d'intentions dont il faut se souvenir, la complexité de ces intentions et

l'emphase portée sur ces intentions. La motivation permet de réduire le coût cognitif en mémoire de travail et de faciliter le fonctionnement précoce de la mémoire prospective. Ainsi, des enfants de 2 à 4 ans sont capables de rappeler une action si elle est motivante, comme rappeler à leur mère de leur acheter une glace à la fin de leur activité. L'importance du délai ainsi que le type d'activité réalisée lors de ce délai influent également sur les performances. Enfin, le type d'indice utilisé pour récupérer l'intention est également important. Un indice extérieur, comme le passage devant la boulangerie, est généralement plus efficace chez l'enfant qu'un indice temporel comme aller chercher du pain dans deux heures. Plus cet indice sera saillant, moins l'enfant aura à mobiliser des capacités attentionnelles pour s'engager dans l'action à réaliser. Les « pense-bêtes » sont également intéressants, car ils permettent de rappeler régulièrement l'action à réaliser et contribuent donc au maintien de l'intention en mémoire.

La métacognition

La mémoire épisodique implique la capacité de voyager mentalement dans le temps afin de revivre l'épisode d'encodage, mais non à l'identique, car tout souvenir est une reconstruction de l'événement originel (avec toute notre subjectivité). Ce voyage mental dans le temps implique donc de comprendre nos états mentaux et fait référence au concept de théorie de l'esprit. En effet, la théorie de l'esprit se définit comme la capacité à attribuer des états mentaux à soi-même et aux autres, et à interpréter un comportement en termes d'états mentaux (« je ris donc je suis content »). Les capacités de théorie de l'esprit évoluent progressivement, avec un développement marqué entre 4 et 6 ans. L'expérience princeps de Wimmer et Perner (1983) illustre ce développement. À l'aide de marionnettes et de jouets, le scénario met en scène un personnage (Maxi) qui range du

chocolat dans un tiroir bleu. Une fois rangé, il quitte la pièce. Un autre personnage vient alors déplacer le chocolat à l'insu de Maxi dans un tiroir rouge. L'enfant, témoin de la scène, doit prédire où Maxi ira chercher le chocolat à son retour. Environ 57 % des enfants âgés de 4 à 6 ans comprennent que Maxi va regarder dans le tiroir bleu, là où il croit que se trouve le chocolat et non à sa place réelle. Ce n'est qu'à partir de cet âge que le concept de soi ne se limite plus au présent, mais que l'enfant prend conscience des liens entre le présent et le passé lui permettant de retrouver l'expérience à l'origine de ses connaissances. Aussi, il va progressivement accompagner son souvenir d'un sentiment de réexpérience (ou reviviscence).

Tulving propose, dès les années 1980, une tâche de laboratoire intégrant une mesure introspective du sentiment de reviviscence, qui sera reprise dans de nombreuses recherches. Dans un premier temps, les participants doivent mémoriser une liste de mots. Puis, lors de la reconnaissance de ces mots, il est demandé de préciser quel est le jugement qui accompagne la reconnaissance des mots déjà vus : 1) s'ils se rappellent du moment où ils ont appris ces mots, c'est-à-dire quelques détails qui feront émerger l'impression de revivre l'événement ; 2) si leur reconnaissance est plutôt basée sur un sentiment de familiarité, c'est-à-dire s'ils savent qu'ils ont vu le mot, mais n'ont pas de souvenir précis du contexte d'encodage. Les enfants sont capables de répondre à ces questions illustrées de plusieurs exemples vers 6 ans, âge à partir duquel la compréhension des états mentaux est suffisamment développée. D'autres travaux, dont certains réalisés dans notre laboratoire, montrent que la proportion de rappels associés à un sentiment de reviviscence augmente tout au long de l'enfance, jusqu'à une dizaine d'années, alors que le sentiment de familiarité reste plus stable et évolue très peu à partir de 6 ans. Là encore, ce développement très progressif des capacités de reviviscence est lié à la complexité de ce processus qui est propre à l'homme et qui mobilise de nombreuses

fonctions cognitives dont certaines, telles que les fonctions exécutives, ont une maturation tardive.

Au-delà, les fonctions exécutives affectent également le développement de la métamémoire, c'est-à-dire les connaissances que nous avons sur le contenu et le fonctionnement de notre mémoire. La métamémoire facilite l'utilisation de stratégies et a un impact direct sur les performances de mémorisation. Les capacités de métamémoire sont peu développées jusqu'à une dizaine d'années, âge qui marque une amélioration significative. Auparavant, les enfants possèdent déjà des connaissances métacognitives, mais ont souvent des difficultés à organiser le contenu de leur mémoire, à évaluer les ressources nécessaires pour réaliser une tâche, à choisir les stratégies appropriées pour une tâche donnée et à gérer leurs apprentissages, ce qui peut parfois entraîner un excès de confiance en leur réponse et l'illusion de savoir. Aussi, il sera nécessaire d'accompagner l'enfant dans l'explicitation de ses stratégies, sous forme de verbalisations, de schémas... En effet, le jeune enfant a tendance à utiliser des stratégies de manière implicite sans attribuer l'amélioration de ses performances à leur utilisation. Par exemple, nous proposons de retenir deux listes de dix mots, l'une composée de noms de fruits, de meubles et d'animaux alors que l'autre comprend dix mots de catégories différentes. Le jeune enfant retiendra plus de mots de la première liste car il aura implicitement regroupé les fruits, les meubles et les animaux, même s'il n'attribue pas spontanément ses bonnes performances à ce regroupement. Progressivement, le développement de la métacognition lui permettra d'analyser explicitement l'exercice afin d'engager les traitements les plus appropriés. Le développement de la métamémoire se poursuit jusqu'à la fin de l'adolescence : les connaissances s'acquièrent progressivement par l'expérience, les interactions sociales et le feedback apporté par l'entourage et les enseignants. Les enfants découvrent les conditions qui leur seront les plus adaptées : lecture silencieuse, lecture à haute voix, copie, schéma, etc. Les échanges de procédures avec les autres

enfants sont intéressants et permettent à l'enseignant de reprendre différentes techniques adaptées à la situation d'apprentissage en cours. Ces dialogues procurent à l'enfant des connaissances sur son propre fonctionnement mental, en tenant compte du contexte donné. Ces expériences lui permettent progressivement de devenir autonome et efficace dans ses apprentissages. Le développement de la métamémoire s'appuie sur la maturation des autres systèmes de mémoire décrits dans MNESIS : connaissances sémantiques, souvenirs des épisodes d'apprentissages, mémoire de travail dotée d'une capacité à manipuler de plus en plus d'informations... Il faut mentionner également la maturation cérébrale, tant structurale que fonctionnelle, qui sous-tend l'évolution de la métacognition. Ces phénomènes de maturation cérébrale font l'objet du chapitre suivant.

La mémoire dans le cerveau en développement

La maturation cérébrale

L'être humain est l'une des espèces pour lesquelles le cerveau présente une importante immaturité à la naissance. Le cerveau connaît des modifications tout au long de la vie avec une première phase de maturation qui se prolonge jusqu'à une vingtaine d'années.

Les techniques non invasives d'imagerie, c'est-à-dire sans injection de traceurs radioactifs, ont permis de recueillir un ensemble de connaissances nouvelles sur le fonctionnement cérébral, basées jusqu'alors sur les expérimentations animales ou les études *post mortem* chez l'homme. Désormais, l'imagerie par résonance magnétique (IRM) permet des mesures de l'épaisseur corticale, de volume et de densité de la substance grise (SG) et de la substance blanche (SB). La SG est formée principalement des corps cellulaires et de l'arbre dendritique des neurones, ainsi que de certaines

cellules gliales ; elle est le support des opérations cognitives et mnésiques. La SB, composée des faisceaux de fibres axonales gainées de myéline, établit les connexions entre les différentes régions cérébrales (cortico-corticales et cortico-sous-corticales). Elle permet donc à ces régions de communiquer entre elles. L'imagerie par tenseur de diffusion (DTI, pour *Diffusion Tensor Imaging*) permet en particulier d'étudier la macro- et la microstructure de la SB et, par conséquent, ce que l'on appelle la connectivité structurale. Lors du développement typique de la substance blanche, la densité des gaines de myéline s'accroît, la quantité d'eau cérébrale diminue, et les fibres se réorganisent. Ces réseaux structuraux composés de fibres de SB connectent différentes régions pouvant être proches, mais aussi éloignées, et sont le support de l'intégration fonctionnelle à l'origine de tout traitement cognitif.

Il existe deux types d'études développementales portant soit sur des enfants de classes d'âge différentes (études transversales), soit sur des enfants de même âge suivis au cours de leur croissance (études longitudinales). Les premières, plus aisées à réaliser, concernent de grandes cohortes d'enfants (parfois plus de 200) ; les secondes, plus astreignantes mais qui permettent de s'affranchir de la variabilité interindividuelle, impliquent généralement moins d'enfants. En effet, deux enfants de même âge n'ont pas forcément le même niveau de développement et, de la même façon, deux enfants d'âge différent peuvent, en revanche, avoir le même niveau de développement. Aussi, le fait de suivre les mêmes enfants sur plusieurs années permet de limiter cette confusion et d'étudier véritablement le développement.

La maturation de la substance grise

Il existe des changements développementaux importants de volume, de densité de substance grise et d'épaisseur corticale entre l'enfant, l'adolescent et l'adulte. Les études longitudinales montrent que le volume cortical de SG fait plus que doubler lors de la première année (108 %). L'augmentation de la surface corticale est plus marquée dans les régions temporales supérieures, pariétales, postcentrales et occipitales, sans doute en lien avec le développement des fonctions sensorielles qui est important à cet âge. Lors de la seconde année, l'augmentation est plus modeste et concerne préférentiellement les régions impliquées dans la planification motrice, le traitement visuo-spatial et attentionnel (régions frontales supérieures, temporales inférieures et pariétales). Par ailleurs, le volume régional de SG tend à augmenter en phase prépubertaire dans les régions frontales et temporales pour se réduire après la puberté de façon marquée. La période pubertaire et ses modifications hormonales ont un impact significatif sur la maturation cérébrale, et notamment sur les régions cérébrales impliquées dans la mémoire, comme l'hippocampe, et dans le traitement émotionnel sous-tendu par l'amygdale cérébrale. Des études longitudinales ont mis en évidence des modifications plus spécifiques tenant compte de la partie antérieure ou postérieure de l'hippocampe entre 4 et 25 ans. Ces études très détaillées nous renseignent sur le développement des processus de mémorisation. Deux enfants peuvent avoir des performances équivalentes à un test ou à un exercice, mais leurs stratégies seront tout à fait différentes notamment du fait des régions cérébrales mobilisées en lien avec leur degré de maturation cérébrale. Ainsi le volume de la partie antérieure de l'hippocampe tend à diminuer, alors que la partie postérieure tend à augmenter. D'autres études, s'intéressant aux sous-champs hippocampiques (ses différentes parties), confirment l'existence d'une maturation graduelle de cette structure essentielle au fonctionnement mnésique. La maturation précoce de certaines parties pourrait sous-tendre les processus associatifs ou relationnels, observés dès

les premières années de vie alors que d'autres, constituant une voie d'entrée dans l'hippocampe, ont une maturation plus lente. Cette voie est essentielle, car elle permet de relier l'hippocampe au cortex permettant de créer des représentations mnésiques flexibles et stables, de créer un souvenir dans lequel nous pouvons voyager et changer de point de vue. D'autres régions, telles que le cortex préfrontal et temporal supérieur qui comprend les aires associatives intégrant l'information provenant de différentes modalités sensorielles, ont une maturation très tardive, vers 16-17 ans (Gogtay *et al.*, 2004), suggérant que les aires associatives de haut niveau se développent après les aires sensorimotrices de plus « bas niveau », une fois que les fonctions assurées par ces dernières régions sont mises en place. Enfin, les régions occipitales et le cortex somato-sensoriel suivent un schéma développemental différent et ont un volume qui tend à diminuer de façon continue (Figure 6).

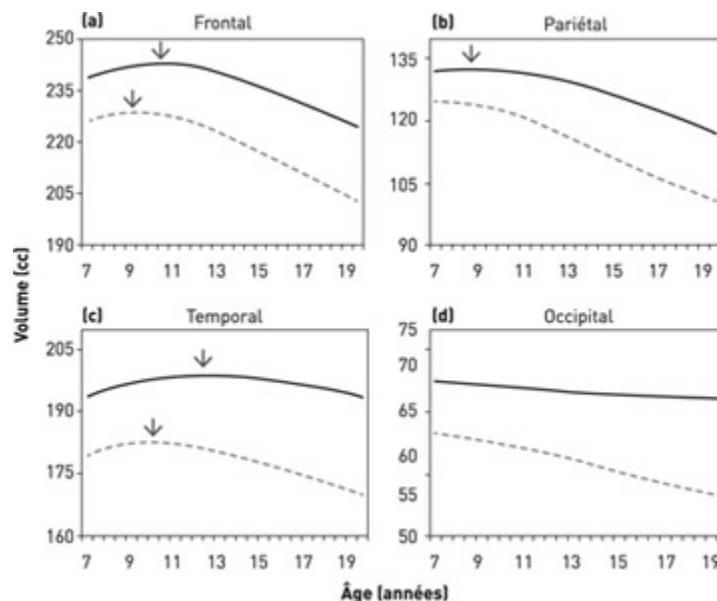


Figure 6. Maturation de la substance grise

L'évolution du volume de substance grise varie d'une région cérébrale à une autre : l'âge des pics et l'allure des courbes diffèrent en fonction du lobe considéré (387 participants, 3-27 ans ; traits pleins : 209 garçons, en pointillé : 178 filles).

(Lenroot *et al.*, 2007).

Cette diminution du volume est due principalement à une diminution massive du nombre de synapses (élagage synaptique) et des ramifications axonales, ainsi qu'à une myélinisation axonale intracorticale croissante. Cet élagage, observé à un niveau neuronal, a un impact sur l'organisation hiérarchique et la connectivité interrégionale au sein des réseaux corticaux et sous-corticaux. Deux phénomènes complémentaires s'opèrent en parallèle et agissent sur le fonctionnement cognitif : une diminution de la connectivité à courte distance accompagnée d'un renforcement de la connectivité à longue distance à l'origine d'une intégration fonctionnelle qui permet de mobiliser de façon synchrone des régions cérébrales plus éloignées à l'âge adulte. Ce phénomène permet de solliciter un réseau cérébral plus vaste formé de régions spécialisées (principe de spécialisation ou ségrégation fonctionnelle) pour un traitement cognitif optimal. Plus l'enfant grandit, plus il sera capable de solliciter les régions cérébrales les plus appropriées, même si elles sont éloignées, pour réaliser un traitement cognitif particulier. Ces modifications s'opèrent au cours de l'enfance et de l'adolescence en parallèle du développement cognitif.

La maturation de la substance blanche

Contrairement à la substance grise, la maturation de la substance blanche continue pendant les quatre premières décennies de vie, avec un pic autour de la quarantaine, lorsque la vitesse de certaines habiletés motrices fines est optimale. Toutefois, les modifications sont importantes dès les premières années postnatales. Là encore, il existe des modèles régionaux spécifiques de maturation. Ainsi, les faisceaux moteurs et sensoriels sont globalement matures plus tôt et poursuivent leur développement lentement. Une étude menée sur 202 participants âgés de 5 à 30 ans (Lebel *et al.*, 2008) a montré qu'à 18-20 ans, la plupart des fibres blanches sous-corticales et

des principaux faisceaux associatifs ont atteint un plateau. Toutefois, d'autres faisceaux reliant notamment les régions frontotemporales impliquées dans la régulation émotionnelle, les stratégies de mémorisation et les activités mentales en référence à soi, poursuivent encore leur maturation après 25 ans. La maturation des faisceaux de substance blanche associée à la myélinisation progressive sont donc indispensables à la mise en place de capacités de contrôle cognitif stables. Par exemple, il semble que les compétences verbales soient corrélées au profil de maturation de la substance blanche. Dans un groupe de 168 participants âgés de 8 à 30 ans, Tamnes *et al.* (2010) ont constaté que les participants possédant les meilleures aptitudes verbales avaient également un développement accéléré de la substance blanche en fin d'adolescence et au début de l'âge adulte, atteignant ensuite un plateau par rapport aux autres qui montraient un développement plus lent se prolongeant encore à l'âge adulte. Une fois adulte, les niveaux de développement étaient équivalents. Cette approche est intéressante car elle vise à comprendre les variabilités individuelles dans le développement qui se trouvent parfois masquées une fois adulte, mais qui sont encore souvent négligées dans les études expérimentales.

La plasticité cérébrale

Les modifications biochimiques, histologiques et anatomiques qui caractérisent la maturation cérébrale permettent une plasticité importante chez l'enfant. La plasticité cérébrale renvoie à un processus continu qui entraîne des modifications de l'organisation synaptique, à plus ou moins long terme, permettant une réorganisation optimale des réseaux neuronaux. Cette plasticité peut être « naturelle » et support de l'apprentissage qui perdure à l'âge adulte, ou consécutive à une lésion donnée (plasticité postlésionnelle). La plasticité naturelle est influencée notamment par des

facteurs environnementaux tels que l'exercice physique. En effet, certaines études mettent en évidence un effet bénéfique de la pratique du sport sur la maturation de l'hippocampe avant l'adolescence, ce qui est bénéfique pour la mémoire.

Selon les travaux de Kennard menés chez l'animal en 1936 sur la récupération après des lésions motrices, la plasticité cérébrale serait maximale au début de la vie. En effet, cet auteur a montré que plus les animaux étaient jeunes, meilleure était leur récupération. D'autres travaux ont démontré que des lésions très précoces et diffuses, ainsi que des lésions de régions stratégiques ont un pronostic inverse, ce qui renvoie au principe de Hebb et à la vulnérabilité du cerveau du très jeune enfant. Aujourd'hui, plusieurs études structurales ont identifié des anomalies précoces qui prédisent le développement de troubles cognitifs ou comportementaux. Plutôt que de nous rendre pessimistes, ces résultats nous alertent sur la nécessité de suivre ces cohortes d'enfants à long terme et de proposer un accompagnement approprié.

Depuis plusieurs années, certaines études s'intéressent également aux facteurs chez l'enfant qui influencent le vieillissement et, comme cela a été abordé dans le premier chapitre, à la réserve cognitive. Dans ces études, la trajectoire développementale du cerveau et de la cognition est mise en lien avec des facteurs génétiques, les expériences postnatales et les facteurs environnementaux. L'interaction de ces variables demeure encore mal comprise et constituera un domaine de recherche de premier plan dans les années à venir.

Les corrélats structuraux et fonctionnels du développement de la mémoire

Les études de neuro-imagerie publiées jusqu'alors soulignent l'existence d'une vaste réorganisation des circuits neuronaux pendant l'enfance et l'adolescence, en particulier dans les régions du cerveau impliquées dans le fonctionnement de la mémoire. Cette réorganisation est à la fois locale (substance grise) et étendue aux fibres assurant la connexion avec d'autres structures cérébrales (substance blanche). Le développement cognitif repose sur l'amélioration de la collaboration fonctionnelle entre ces réseaux neuronaux spécialisés. Dans la suite de ce chapitre, nous nous intéresserons aux régions clés du neurodéveloppement de la mémoire, à savoir les régions frontales et les structures temporales internes incluant l'hippocampe. Pour cela, nous aborderons deux types d'études : celles qui font le lien entre le développement de la mémoire et celui des structures cérébrales, et celles qui s'intéressent aux réseaux neuronaux activés pendant la réalisation d'une tâche mnésique à un âge donné.

Le cortex frontal

Il est possible de réaliser des corrélations entre des performances cognitives, d'une part, et des mesures d'imagerie structurale, d'autre part, ce qui nous renseigne sur les régions cérébrales impliquées dans le développement de la mémoire. Les études ayant utilisé cette méthodologie ont mis en évidence un lien entre la maturation des régions frontales et l'amélioration des capacités de mémorisation. Cette maturation étendue dans le temps de ces régions participerait au développement tardif des capacités de contrôle cognitif et des processus stratégiques. Elle soutiendrait également l'évolution de la mémoire de travail associée à la maturation des connexions frontopariétales et frontostriatales.

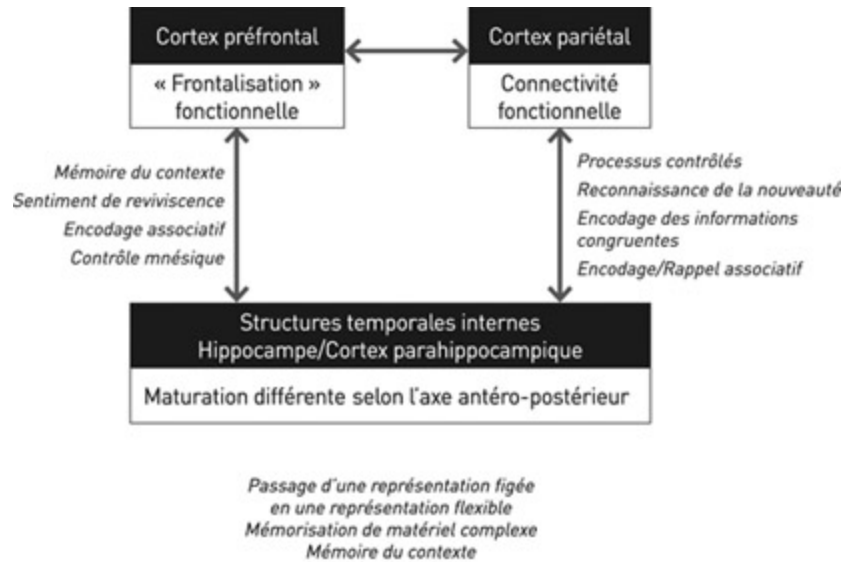


Figure 7. Développement de la mémoire épisodique : les structures clés et leur rôle

Le développement de la mémoire épisodique et des processus stratégiques repose sur des modifications fonctionnelles (activité diffuse à plus localisée, bilatérale à unilatérale), une spécialisation des structures cérébrales et une amélioration des capacités d'intégration avec l'âge.

Les études utilisant l'IRM fonctionnelle « d'activation » recueillent des indices de l'activité cérébrale lors de la réalisation d'une tâche. Elles permettent d'identifier les réseaux neuronaux impliqués dans un traitement cognitif particulier et fournissent des informations complémentaires aux études structurales (Figure 7). Ces études permettent d'explorer plus précisément la dynamique du neurodéveloppement de la mémoire. Elles confirment que le développement de la mémoire contextuelle nécessite l'implication des régions préfrontales, de même que les processus exécutifs, l'encodage et la récupération des associations, mais aussi le sentiment de reviviscence et de confiance que les enfants ont dans leur jugement de reconnaissance... De plus, elles montrent que l'engagement progressif des régions frontales dans la réalisation des tâches cognitives, comme des tâches de mémoire de travail ou de mémoire épisodique, s'accompagne le plus souvent d'un désengagement des régions postérieures. En effet, la plupart des études sur la mémorisation observent une contribution

croissante des régions préfrontales avec l'âge, qui varie tout de même en fonction du type de tâche employée. Il semble que l'importance de l'activation dépende de la sollicitation des processus de contrôle : plus les processus de contrôle sont sollicités et plus le cortex préfrontal est activé. Par exemple, la recherche en mémoire des éléments du contexte d'apprentissage pour préciser le souvenir sollicitera davantage les régions préfrontales. Par ailleurs, plus les enfants sont jeunes et plus ils auraient tendance à activer un réseau plus étendu que les adultes pour réaliser un même traitement. Ils pourraient ainsi compenser leur immaturité en recrutant davantage de régions par rapport aux adultes, et cela afin d'obtenir des performances comparables. Par la suite, le nombre de régions recrutées diminuerait avec l'âge pour activer seulement les régions essentielles pour réaliser la tâche.

Les structures temporelles internes

L'hippocampe est une région clé du fonctionnement de la mémoire et différentes études rapportent un lien entre la maturation de cette structure cérébrale et les capacités de mémorisation chez l'enfant, incluant également le processus de consolidation. Certaines données issues de l'imagerie cérébrale fonctionnelle mettent en avant un désengagement de l'hippocampe dans les mécanismes d'encodage, qui pourrait résulter d'une amélioration des connexions avec les régions préfrontales. Grâce à cette amélioration de la connectivité, les enfants pourraient mettre en place des stratégies de mémorisation plus élaborées et plus efficaces, sous-tendues par les régions frontales et moins solliciter les structures hippocampiques, structures impliquées dans les processus associatifs dès la première année de vie. De plus, cette région est impliquée différemment entre les enfants et les adultes pour la réalisation d'une même tâche, ce qui témoignerait de l'utilisation de stratégies différentes. Ainsi, les activations se déplacent

progressivement avec l'âge de la partie postérieure à la partie antérieure, ce qui pourrait favoriser la formation de représentations mnésiques multimodales et flexibles. Un autre phénomène confirme la spécialisation de ces régions avec l'âge. Il est possible d'observer une activation des mêmes structures pour réaliser deux processus différents chez les enfants plus jeunes alors que, chez les plus âgés, l'activation sera spécifique à un seul de ces processus. Nous avons notamment observé ce phénomène dans un travail mené au sein de notre laboratoire chez des adolescents (Dégeilh *et al.*, 2015). Cette étude portait sur l'utilisation d'adjectifs en relation avec soi (« est-ce que je suis sympathique ? ») par rapport à ces mêmes adjectifs utilisés en relation avec d'autres personnes (« est-ce que Johnny Halliday est sympathique ? »). Les adolescents les plus jeunes recrutaient une même région cérébrale, le cortex cingulaire antérieur, pour traiter ces deux conditions, alors que les plus âgés activaient cette région uniquement pour traiter les informations relatives à eux-mêmes. Nous observons dans cette expérience le témoin fonctionnel d'une mise en place progressive de l'identité personnelle au cours de l'adolescence.

D'autres structures cérébrales, telles que les régions pariétales, sont importantes dans le processus de mémorisation. Les travaux neurodéveloppementaux rapportent leur implication notamment dans les processus contrôlés, la capacité à discriminer une information déjà vue d'une formation nouvelle, la mémoire associative et le sentiment de reviviscence. Ces régions pourraient exercer des fonctions de contrôle mnésique en modulant l'action des régions frontales et temporales internes.

Il existe aujourd'hui un solide faisceau d'arguments pour conclure que des modifications majeures de la maturation cérébrale surviennent avant la puberté, avec une évolution plus modérée à l'adolescence. Cette évolution suit globalement un gradient postéro-antérieur avec une maturation tardive des régions frontales. Ces modifications ont un impact sur le développement de la mémoire et des stratégies de mémorisation, ces

dernières étant associées aux régions frontales. Par exemple, les jeunes enfants utilisent davantage des stratégies perceptives et, progressivement, des stratégies fondées sur des traitements sémantiques. Les résultats de ces études donnent des indications qui peuvent s'avérer utiles pour des pratiques éducatives. Ils sont également indispensables pour mieux appréhender les anomalies de développement que nous aborderons dans le cinquième chapitre.

Les applications pédagogiques et éducatives

Depuis les années 1970, les sciences de l'éducation, les sciences cognitives, les neurosciences et ce qu'on appelle désormais la neuroéducation s'attachent à identifier les méthodes optimales pour mémoriser de nouvelles informations. Ces méthodes visent à influencer les différentes étapes de la mémorisation, à savoir l'encodage, la consolidation et la récupération. Il existe aujourd'hui plusieurs techniques intéressantes, illustrées pour certaines dans ce chapitre, dont le choix doit être guidé par l'âge et les particularités de l'enfant.

Préalable à l'apprentissage

L'apprentissage doit être appréhendé en tenant compte du développement cognitif de l'enfant, de la variabilité interindividuelle, mais aussi des dimensions psychosociales et psychoaffectives. L'enfant peut être dans un état psychologique particulier, aux prises avec des préoccupations

affectives si envahissantes qu'elles le rendent peu disponible pour les apprentissages en ayant un impact direct sur ses capacités à mobiliser son attention. De façon générale et plus encore dans ce contexte, les conditions de préparation aux apprentissages sont importantes : les rituels qui peuvent améliorer la réceptivité jusqu'à l'anticipation ou la projection qui le conduisent à se préparer à réaliser une activité donnée. Les rituels permettent d'augmenter le niveau de réceptivité et d'inviter l'enfant à réaliser les actions demandées, comme bouger un bâton de pluie pour annoncer la lecture d'une histoire chez les plus petits. Elles peuvent également servir à la projection dans l'activité, comme toujours commencer la journée par un travail sur du vocabulaire acquis la veille. L'enfant doit être acteur de son apprentissage et, pour cela, l'attention joue un rôle primordial. L'enfant doit tout d'abord être réceptif aux informations qui lui sont transmises : il doit être capable de focaliser son attention ou de sélectionner l'information pertinente (les données pertinentes dans un énoncé de mathématiques), de partager ou de diviser son attention entre plusieurs sources (écrire et écouter en même temps) et de maintenir son attention pendant plusieurs minutes (écouter l'explication de l'enseignant). Les capacités attentionnelles de l'enfant suivent un développement long et progressif jusqu'à la fin de l'adolescence. Par exemple, il faut attendre environ 8 ans pour que la capacité à focaliser volontairement son attention sur une information soit maîtrisée. Pour les plus jeunes, il sera donc indispensable de limiter le nombre d'informations présentées et d'orienter l'enfant vers les informations pertinentes pour éviter les difficultés de gestion des interférences.

De la même façon que les capacités attentionnelles, d'autres facteurs tels que la motivation, l'intérêt, la confiance en soi ont un impact significatif sur les apprentissages car ils affectent directement l'attention, la mémoire de travail, la mémoire épisodique, la métacognition. Un enfant en difficulté scolaire sera encore plus vulnérable à une baisse de motivation ou

de confiance en soi. Il est important, dans ce contexte, d'adapter les objectifs de l'enfant et de soutenir l'apprentissage pour préserver cette motivation et son intégration scolaire. Ces facteurs accompagneront l'apprentissage tout au long de la scolarité.

Les stratégies de mémorisation

De nombreuses méthodes visent à améliorer l'encodage et/ou la récupération des informations en mémoire. En effet, plus la trace mnésique est riche et élaborée, plus elle sera distincte et durable. Par ailleurs, plus l'encodage est personnalisé, émaillé d'indices propres à l'enfant, meilleure sera la mémorisation.

L'efficacité de la récupération d'informations en mémoire dépend de l'adéquation entre le contexte d'encodage et celui de récupération. Tulving a mis en avant, dès 1983, le principe de la spécificité de l'encodage selon lequel la récupération est facilitée lorsque le contexte ou les indices fournis rappellent l'étape d'encodage. De plus, plus les traitements réalisés sur le matériel à mémoriser lors de l'encodage et la récupération sont proches, meilleure sera la récupération, ce phénomène étant lié à la concordance des traitements. Il convient donc de se poser la question d'emblée de la modalité de restitution qui sera demandée ou du format utilisé pour le contrôle des connaissances (question ouverte, proposition d'indices, etc.), car l'encodage pourra être adapté à ces différents cas. Prenons l'exemple d'une leçon sur la découverte des trois états de l'eau. L'enseignant peut illustrer les phénomènes de condensation en soufflant sur une vitre pour montrer la buée. Si l'enseignant rappelle l'activité en évoquant la vitre, les enfants se rappelleront très vite le phénomène de condensation. Tous les apprentissages réalisés sur un support donné seront mieux rappelés si le même support est utilisé ! Cette problématique renvoie à la capacité, pour

l'enfant, de se projeter dans l'activité et plus en encore dans le contexte de restitution.

Il est également possible de travailler sur la *richesse de l'encodage* de plusieurs manières.

- Multiplier les modalités de présentation : la trace mnésique peut devenir plus robuste en manipulant plusieurs types d'informations environnementales, telles que les modalités de présentation (visuelle, verbale, auditive) ou le contexte de présentation, qui améliorent la flexibilité de la représentation mentale et la capacité à l'utiliser de manière appropriée dans différentes situations. Par exemple, un nouveau concept peut être illustré visuellement sous différents points de vue, être repris dans un texte lu et écrit...

- Créer une représentation mentale : la représentation mentale soutient également l'encodage en mémoire. Cette représentation peut être visuelle (images statiques ou en mouvement), ce qui est le plus fréquent, mais aussi auditive (sons), ou verbale (commentaires), gustative, olfactive, kinesthésique, etc. L'enfant organise les informations perceptives en une représentation mentale qui lui est propre : c'est une construction psychique abstraite d'une situation connue ou imaginée. Cette construction est soutenue par la mémoire de travail, dont le développement va contraindre les capacités d'évocation mentale. L'enfant est capable de mobiliser les différentes modalités selon la situation donnée, mais en privilégiant souvent l'une d'entre elles. En effet, certains enfants s'appuient davantage sur des représentations visuelles et d'autres sur des représentations verbales. La représentation mentale permet également de renforcer la richesse de l'encodage en proposant un double codage. Prenons l'exemple de la mémorisation d'un texte : la lecture d'un texte associée à l'image mentale que nous pouvons en faire favorise la mémorisation de ce texte. Il est aussi possible d'évoquer une représentation mentale en orthographe, en reprenant

l'information auditive, mais aussi d'imaginer le mot dans sa tête pour l'épeler.

- Enrichir l'encodage par une réalisation sensorimotrice (ou *enaction*) : cette association facilite la mémorisation. Dès 3 mois, les nourrissons qui réalisent l'action améliorent la compréhension de celle-ci par rapport à ceux qui ne font que l'observer. Le fait d'associer une gestuelle dans son apprentissage favorise l'acquisition. Il est possible de l'observer avec la méthode de Suzanne Borel-Maisonny, fondatrice de l'orthophonie en France dans les années 1950. Cette méthode aide au déchiffrage dans l'apprentissage de la lecture et vise à associer un geste à un phonème et à faciliter l'identification des lettres écrites, par exemple faire une pince avec le pouce et l'index pour faire un « O ». Le phonème n'est plus un élément sonore isolé, mais y seront associés une image et un geste, l'ensemble améliorant la mémorisation, puis les liens phonème-graphème. Ce n'est pas seulement l'activité motrice en tant que telle qui joue un rôle, mais le geste doit contenir des informations pertinentes pour l'apprentissage. Ainsi, mimer par gestes la description d'une série d'expériences filmées facilite le rappel de ces expériences et cette amélioration a été observée même après trois semaines. Cette facilitation a également été retrouvée dans le cadre de l'apprentissage de phrases dans une langue étrangère et même de concepts mathématiques. De même, une poésie théâtralisée peut être plus facile à retenir. Le fait de mettre en scène améliore la mobilisation de l'attention et facilite l'engagement de l'attention sur la tâche, ainsi que son maintien.

- Associer de l'émotion : qu'elle soit positive ou négative, l'émotion améliore également l'encodage. Une information émotionnelle, même de faible intensité, est mieux mémorisée qu'une information neutre, et cela très tôt chez l'enfant. L'émotion peut être intégrée dans l'apprentissage au travers, par exemple, de la mise en scène d'un poème où il sera possible d'exagérer l'intonation, de mimer les actions. Une anecdote sur un personnage ou un fait historique qui suscite de l'amusement va en favoriser

la mémorisation. Prenons l'exemple de Michel-Ange qui a peint le plafond de la chapelle Sixtine à Rome : il peignait allongé sur un échafaudage et quand le pape venait le voir pour lui reprocher sa lenteur, il pouvait lui faire tomber de la peinture sur la tête !

D'autres types de stratégies insistent sur la création d'associations avec des représentations déjà en mémoire :

- Créer des liens avec les *connaissances sémantiques* : l'enfant peut créer des associations avec ses propres connaissances générales. Le traitement sémantique renvoie à la théorie des niveaux de traitement, décrite initialement par Craik et Lockhart en 1972, selon laquelle un traitement profond, c'est-à-dire portant sur la signification du matériel à mémoriser, donne lieu à une meilleure mémorisation qu'un traitement superficiel portant sur les caractéristiques perceptives, phonologiques ou orthographiques. Ainsi, un enfant retient mieux des nouveaux concepts s'il est amené à construire des phrases avec ces concepts intégrant d'autres connaissances. Rappeler le contenu du cours précédent avant de poursuivre l'apprentissage de la notion permet également de renforcer les liens entre les connaissances issues du cours précédent et les nouvelles informations fournies.

- Liens avec les *connaissances personnelles* : l'enfant va rattacher ces nouvelles informations à soi. En effet, il est également possible d'améliorer la richesse de l'encodage en créant des liens avec des connaissances identitaires illustrées par l'« effet de référence à soi ». Cet effet se traduit par une facilitation de la mémorisation si l'information est traitée en référence à soi ou à notre entourage proche, ce qui revient à personnaliser l'information. Il est possible de l'observer vers 4 ans et celui-ci s'amplifie avec le développement de l'identité.

- Liens avec une *représentation mentale* : il existe différentes techniques, issues de la neuropsychologie et pour certaines des arts de la mémoire (les moyens mnémotechniques), qui reprennent cette notion

d'image mentale. La *technique des mots clés* permet de mémoriser des mots nouveaux et consiste à former deux images à partir du mot : la première facilite la rétention de la prononciation et la seconde, sa signification. Elle s'applique tant aux associations entre des noms qu'à l'acquisition d'un vocabulaire nouveau ou d'une langue étrangère. Par exemple, le mot *mouth*, qui signifie « bouche » en anglais, ressemble phonétiquement à « mousse ». Il est possible d'imaginer quelqu'un qui boit une bière et qui se retrouve avec de la mousse sur la bouche. Il existe également des *tables de rappel* permettant d'associer des informations (visuelles ou verbales) connues et numérotées aux informations à mémoriser. Les liens entre les informations connues ou « item-pivots » et leur numéro peuvent être fondés sur des similarités phonologiques, comme « un : main », ou visuelles, comme associer le chiffre un à l'image d'un poteau. Enfin, la *méthode des lieux* ou des localisations (méthode des *loci*) qui revient à construire un espace peut être pertinente. Elle consiste à reprendre un espace connu, public ou privé, comme le plan de sa maison, et d'associer mentalement à chaque élément de cet espace une information à mémoriser. Pour restituer les informations, il faudra parcourir l'espace, ou ici chaque pièce de sa maison, pour réactiver les traces mnésiques associées.

Les stratégies d'organisation

Les stratégies d'organisation ont pour objectif de structurer l'information afin d'en faciliter la compréhension et la mémorisation. En effet, elles permettent de soulager la mémoire de travail et d'opérer un traitement profond. Celles-ci renvoient à la capacité à repérer la structure du document pour faire une synthèse des éléments essentiels. Cette analyse, ou organisation de l'information, passe par le classement ou la catégorisation des informations clés pouvant mener, par exemple, à la création de plans, de

tableaux, de frises ou de schémas. L'enfant peut construire lui-même, avec l'aide de l'enseignant et des supports visuels, sa propre représentation, ce qui renforcera encore la mémorisation. Ces schémas peuvent prendre la forme de cartes mentales (ou cartes heuristiques), c'est-à-dire des représentations sous forme d'organigramme ou d'arborescence d'un concept central et de ses connexions avec ses différentes propriétés. Elles peuvent intégrer une certaine hiérarchie entre ces propriétés. Cette carte mentale permet d'organiser les idées, un savoir à un moment donné mais qui peut être enrichi progressivement. Prenons l'exemple de l'apprentissage de faits historiques, comme la Révolution française. Il sera d'abord possible de repérer la structure du document, les informations essentielles qui seront par exemple soulignées, puis placées dans une liste. Ensuite, ces informations seront organisées sous forme de branches, les faits associés à la Révolution (comme la prise de la Bastille), eux-mêmes contenant des informations comme les personnages (le gouverneur de la Bastille, Bernard-René Jordan de Launay), ce qu'elle héberge (prisonniers, poudre, archives), le déroulement (négociation, puis assaut et reddition)... Il est possible de suivre la même démarche pour une fiche de lecture, une procédure d'analyse en sciences de la vie et de la terre, etc. L'intérêt de cette démarche est d'identifier les mots clés et de simplifier, sous forme de structure visuelle (mots, dessins, photos), une organisation complexe d'informations. Pour cela, l'enfant doit apprendre à identifier les ressources à disposition, choisir les plus appropriées et organiser ses idées. Le développement de sa métacognition, c'est-à-dire de la connaissance de son fonctionnement cognitif, contribue également aux choix de ses stratégies d'organisation.

La répétition

Comme nous l'avons vu précédemment, la richesse de l'encodage a un impact direct sur la consolidation de l'information. *La répétition* est également importante pour soutenir la formation de nouvelles connaissances – répétition en mémoire de travail, mais aussi des épisodes d'apprentissage eux-mêmes. La répétition en mémoire de travail est conditionnée par son niveau de développement. Ainsi, à 7 ans, le fait de se répéter intérieurement une suite d'informations à apprendre ne sera pas la technique la plus appropriée en raison de la taille encore réduite de l'empan. Concernant la mémoire à long terme, la répétition des épisodes d'apprentissage pour un même concept permet d'effacer progressivement les souvenirs spécifiques des épisodes pour ne conserver que le concept ou la connaissance. La réactivation régulière de ces connaissances améliore leur maintien à long terme, et c'est dans ce cadre que l'apprentissage distribué présente toute son importance. Les travaux réalisés dans les années 1960 ont montré que l'apprentissage de connaissances sur plusieurs épisodes, intercalés de périodes de repos, est plus efficace et durable que l'apprentissage massé sur une seule période. Cette supériorité doit tenir compte de la durée des épisodes d'apprentissage et, en conséquence, de l'intervalle de temps entre les apprentissages, du type de matériel à mémoriser et de l'exercice lui-même. D'un point de vue cognitif, les capacités d'attention soutenue, les fonctions exécutives, la mémoire de travail ne sont pas mobilisables de façon optimale et homogène sur de très longues durées. Fractionner les épisodes permet de mobiliser ces fonctions plus efficacement. Les effets d'interférences peuvent également être plus importants sur un apprentissage massé, parasité par de nombreuses informations qui ne sont pas essentielles à l'apprentissage. Aussi, la distribution des épisodes réduit ces effets d'interférence en oubliant les informations superflues pour ne consolider que la connaissance. Il existe tout de même des conditions où l'apprentissage massé a du sens, c'est dans le cadre de l'apprentissage procédural comme apprendre à faire du vélo.

Dans ce cas, l'automatisation de la procédure se fait par la répétition de cette procédure au sein d'une même séance (massé) et en multipliant les séances (distribué). La consolidation des connaissances et des procédures implique nécessairement des périodes de sommeil pendant lesquelles la connectivité neuronale va se renforcer.

Une technique impliquant la répétition et issue de la neuropsychologie peut également se révéler pertinente. La récupération espacée a été proposée dans des pathologies de la mémoire ; elle consiste à tester la récupération d'informations en augmentant progressivement l'intervalle de rétention. L'enfant doit dans un premier temps faire un rappel immédiat de l'information à mémoriser, un nom par exemple. En cas de réussite, l'intervalle est augmenté de cinq secondes puis dix, vingt secondes, etc. Cette technique renforce l'implication de la mémoire implicite et, là encore, s'appuie sur un apprentissage à la fois massé et distribué.

Le choix des techniques d'apprentissage, y compris en intégrant la répétition, doit tenir compte du matériel à mémoriser. Aussi convient-il de dissocier, dans l'apprentissage de nouveaux concepts, le mot (ou étiquette lexicale) et les propriétés du concept. Prenons l'exemple d'un nouveau concept : le macareux. Ce mot encore inconnu de l'enfant peut être mémorisé en insistant sur les caractéristiques perceptives, c'est-à-dire en jouant sur les sonorités, syllabes ou phonèmes. Il est également possible d'utiliser des techniques issues de la neuropsychologie comme l'estompage. Initialement, l'estompage a été proposé à des patients amnésiques afin de leur faire acquérir de nouvelles connaissances informatiques par le biais de la mémoire implicite. La première étape consiste à présenter la définition du mot (par exemple : enregistrer les informations contenues dans un document informatique). Le patient devait retrouver ce mot à partir de la première lettre fournie (S - - -). En cas d'échec, une deuxième lettre était fournie et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'il trouve le mot (« sauvegarder »). Lors de la séance suivante, le nombre d'indices qui avait été nécessaire à

l'identification correcte lors de la séance précédente moins une lettre, était fourni. Si le patient ne pouvait dénommer le mot, une lettre était ajoutée et ce, jusqu'à une dénomination correcte. Cette opération était reproduite lors des séances suivantes jusqu'à ce que le patient ait été capable de fournir le mot sans indice. Cet estompage peut aussi être proposé dans un cadre de scolarité ordinaire en enlevant une lettre par une lettre ou une syllabe par une syllabe pour les enfants les plus jeunes : ma/ca/reux. En revanche, il convient d'aborder les propriétés du concept autrement, en créant des liens entre ces différentes propriétés : l'oiseau marin au bec coloré qui construit son nid dans un terrier... et les connaissances que l'enfant a déjà en mémoire, donc tisser de nouvelles connexions entre ces propriétés pour former ce nouveau concept (Figure 8). De la même façon, de nombreux moyens mnémotechniques visent à créer un sens là où il n'y en a pas. L'exemple le plus connu sans doute est « mais ou et donc or ni car » pour retenir les conjonctions de coordination !

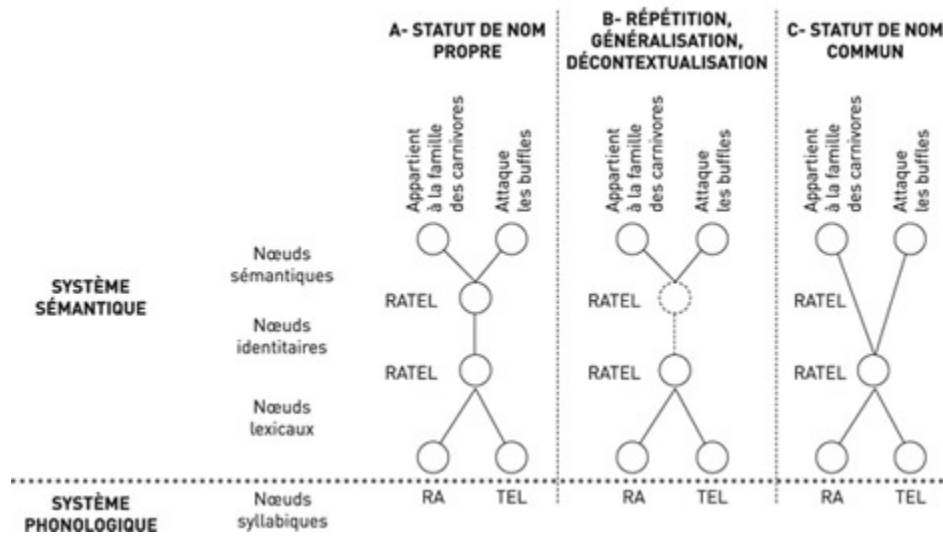


Figure 8. Dynamique d'apprentissage de nouvelles connaissances

L'acquisition de l'étiquette lexicale passe par une représentation similaire à celle d'un nom propre (A) jusqu'au nom commun (C). Dans les deux cas, la création d'une connexion entre le nœud lexical et l'identité se fait par une association arbitraire entre la signification du mot et son identité spécifique, ce qui requiert la mémoire épisodique. Une fois cette étape réalisée et par la répétition, la généralisation et la décontextualisation (B), le statut sémantique de ce nouveau mot fait qu'il perd son identité spécifique et devient une connaissance, une catégorie sémantique comme les autres noms communs. Le nœud lexical devient alors directement connecté au nœud sémantique (Pitel *et al.*, 2009).

Le sommeil

Le sommeil est un phénomène dynamique caractérisé par des cycles d'activation et de désactivation de plusieurs régions cérébrales. Ces modifications suivent les différentes phases de sommeil : sommeil léger (stades 1 et 2), sommeil lent profond (stades 3 et 4) et sommeil paradoxal. Le sommeil lent profond occupe une grande partie de la durée de sommeil chez l'enfant, et cette proportion diminue progressivement avec l'âge au profit du sommeil léger (stade 2). Pendant le sommeil, y compris la sieste, le cerveau de l'enfant consolide et réorganise les souvenirs récents pour

également décontextualiser les souvenirs épisodiques qui deviennent ainsi des connaissances. Ce phénomène est observé très tôt, dès la fin de la première année. Dans ce contexte, les siestes chez les plus petits permettraient de consolider très régulièrement les traces mnésiques. La majorité des travaux mettent en avant une implication préférentielle du sommeil lent profond dans la consolidation des souvenirs épisodiques, dépendants de l'hippocampe, et du sommeil paradoxal dans la consolidation des apprentissages implicites. Cette distinction a été revue par des travaux récents qui soulignent notamment la contribution différente et complémentaire de ces deux phases de sommeil dans les apprentissages explicites. Il semble également que, chez l'enfant, l'impact bénéfique du sommeil soit supérieur pour les apprentissages explicites, y compris d'un nouveau vocabulaire, que pour les apprentissages implicites. Il n'y a pas que les mémoires explicite et implicite qui sont concernées par le sommeil. Le sommeil (ou ses carences) peut aussi affecter la mémoire de travail. En effet, des travaux ont montré des fluctuations de performances chez les enfants entre 8 et 11 ans liées, pour le matin, à la qualité du sommeil et le temps passé dans son lit et, pour l'après-midi, à la fatigue générale. Ces travaux vont dans le même sens que des données montrant que l'entraînement de la mémoire de travail chez l'adolescent se traduit par davantage d'ondes lentes lors du sommeil profond, dans les régions frontales, et améliore en conséquence les performances.

La durée de sommeil chez l'enfant et l'adolescent diminue depuis plusieurs années alors que les besoins estimés peuvent atteindre dix heures par nuit. L'origine de cette privation chronique de sommeil est multifactorielle : modifications des comportements parentaux, mais aussi des comportements en fonction de l'âge (enfants *versus* adolescents), associées à la méconnaissance de l'enfant de ses besoins de sommeil, contraintes scolaires et nouvelles technologies. Avec ces dernières, les enfants et les adolescents se trouvent déconnectés du présent : hors du

temps, ils laissent passer les signaux qui devraient les amener à se coucher. Les jeux contribuent également à stimuler les enfants, les gardent éveillés, et la lumière des écrans modifie la sécrétion de mélatonine, hormone intervenant dans l'endormissement.

Ainsi, de nombreuses études rapportent un lien entre les troubles du sommeil (difficultés d'endormissement, insomnies, parasomnies comme les terreurs nocturnes ou le somnambulisme, et même les hypersomnies), le manque chronique de sommeil et les apprentissages chez l'enfant. Ces troubles peuvent entraîner un fonctionnement moins efficace de la mémoire de travail, de la vitesse de traitement et des capacités d'inhibition de l'interférence, ce qui rend l'enfant plus sujet aux distractions.

Les apprentissages et l'éducation

Illustrons maintenant les différentes techniques évoquées précédemment par quelques éléments de réponses à quatre questions posées par des enseignants.

Pourquoi les stratégies de mémorisation proposées aux élèves ne fonctionnent pas toujours ?

Il existe des limites dans la compréhension et l'utilisation de certaines stratégies dues au développement cognitif et aux capacités intellectuelles des enfants. Ces limites, le plus souvent liées au niveau de développement cognitif et métacognitif, se posent tout d'abord en termes de difficultés de médiation, ce qui renvoie à un niveau de développement encore insuffisant pour mettre en œuvre ces stratégies. Les enfants peuvent avoir des

difficultés de compréhension des stratégies et une conscience insuffisante de leur bénéfice potentiel. Il convient alors de trouver d'autres moyens de motivation pour les encourager à les utiliser, jusqu'à ce qu'ils comprennent leur intérêt. Il est possible également d'observer des difficultés de production : les enfants sont conscients du bénéfice de cette nouvelle stratégie, mais ne l'utilisent pas spontanément. En revanche, ils peuvent l'utiliser sur ordre, ce qui limite leur autonomie. Ce type de difficulté s'observe généralement chez des enfants âgés de moins de 10 ans. Aussi, il faudra leur fournir des indices, alors que les plus âgés les utiliseront spontanément. Enfin, il est possible d'observer des difficultés d'utilisation qui se manifestent le plus souvent en début d'acquisition : l'enfant utilise la stratégie appropriée, mais elle n'a pas encore d'effet bénéfique. Ce manque de bénéfice pourrait résulter d'un niveau de connaissances métacognitives insuffisant et de ressources en mémoire de travail limitées.

Que devient un apprentissage réalisé dans un contexte donné ?

Les apprentissages sont associés à des rituels ; s'il n'y a plus ces mêmes stimulations, que deviennent ces apprentissages l'année suivante ? Les rituels favorisent les apprentissages car ils préparent l'enfant à réaliser une activité donnée, mais, si l'apprentissage est limité à un contexte, les connaissances seront spécifiques à ce contexte et peu flexibles. Aussi, il est indispensable de multiplier les contextes ou les situations dans lesquels les concepts peuvent être utilisés, y compris en ouvrant à d'autres matières (mathématiques, histoire ou sciences de la vie), de rendre l'enfant acteur de son apprentissage et de l'amener à réfléchir sur ses propres connaissances et situations d'applications. Si l'apprentissage n'est pas suivi de réactivation, l'accès à ces concepts peut être plus difficile. L'apprentissage se fait souvent par notions : une fois la notion acquise et évaluée, l'enseignant

passé à une autre notion. La réactivation peut se faire de façon naturelle, car la notion est reprise dans la suivante ; or, parfois, ces notions n'ont pas ou très peu de liens. La réactivation peut alors se réaliser dans un contexte ludique, à distance de l'apprentissage, mais au cours de l'année, comme faire un jeu de l'oie qui reprend des verbes à conjuguer mélangés à d'autres activités comme des « gages » plus amusants ! La pédagogie en spirale est également intéressante car elle reprend les mêmes notions, année après année, mais un peu plus approfondies chaque année. Si le délai devient trop important entre l'apprentissage et le rappel de la notion, il sera préférable de reprendre des indices utilisés à l'époque, des éléments du contexte d'apprentissage afin d'augmenter l'adéquation entre le contexte d'encodage et de récupération et ainsi de faciliter cette récupération.

Peut-on donner des clés aux élèves pour apprendre à mémoriser seul à la fin de l'école élémentaire ?

Ces clés renvoient à la métacognition (c'est-à-dire à la capacité des élèves à analyser leur propre fonctionnement cognitif, ses forces et ses faiblesses), afin de s'adapter aux différentes situations d'apprentissage. Deux facteurs sont à prendre en compte : le développement ordinaire et le soutien de l'enseignant dans ce développement. Dans ce contexte, il est intéressant d'aborder la notion de zone proximale de développement proposée par le psychopédagogue russe Vygotski. Ce concept renvoie à la différence entre ce que l'enfant apprendra s'il est seul et ce qu'il peut potentiellement apprendre si on lui fournit une aide. La zone proximale de développement correspond donc à la différence entre le niveau de développement de l'enfant évalué seul et le niveau de développement potentiel évalué avec le soutien d'un adulte ou de ses pairs plus

expérimentés. En ce sens, les échanges avec l'adulte ou l'enseignant, ainsi que le partage d'expériences avec les autres enfants faciliteront les apprentissages si les prérequis sont présents, prérequis en termes développementaux, c'est-à-dire disposer d'un niveau de développement cognitif et métacognitif suffisant, mais aussi de connaissances et compétences. À la fin de l'école élémentaire, donc vers 10 ans, l'enfant possède déjà un niveau de développement suffisant pour comprendre certaines techniques de facilitation exposées précédemment. Il est donc possible de donner des clés aux élèves qui favoriseront leur autonomie dans les apprentissages. Pour accompagner l'enfant vers cette autonomie, une analyse de son propre fonctionnement doit être faite au préalable : expliciter des pratiques automatisées (oralement, visuellement), la façon dont l'enfant analyse la situation d'apprentissage tenant compte de la tâche, la gestion de son temps, le type de représentations qui est privilégié, les situations d'échec, etc., afin d'adapter et de faire évoluer les pratiques de chaque enfant. Il existe également des questionnaires de connaissances métacognitives qui permettent de compléter cette analyse. En plus des connaissances, il faut tenir compte des stratégies métacognitives qui dépendent des fonctions exécutives. Enfin, il convient de garder à l'esprit que les fonctions exécutives et la mémoire de travail vont poursuivre leur développement jusqu'à la fin de l'adolescence, ce qui va conditionner le choix des stratégies ou les aménagements proposés par les enseignants. Aussi, il est important de les accompagner dans la réalisation de ces nouvelles pratiques et de vérifier qu'elles sont adaptées et répondent aux objectifs demandés.

La production d'erreurs est-elle toujours
bénéfique ?

L'erreur permet à l'enfant de prendre conscience de ses propres stratégies et de les faire évoluer en tenant compte du contexte d'application. Toutefois, il est nécessaire de s'adapter au développement de la mémoire épisodique dans ce processus de correction des erreurs, et la technique d'apprentissage sans erreur, c'est-à-dire éviter que l'enfant produise des erreurs, peut s'avérer plus appropriée dans certains cas. Une étude récente a même confirmé son utilité dans l'apprentissage du vocabulaire chez des enfants de 7 à 9 ans. Initialement proposée à des patients amnésiques, cette technique est pertinente chez les jeunes enfants qui ont un développement encore limité de la mémoire épisodique, pour lesquels même la recontextualisation leur permet difficilement d'accéder au souvenir de l'erreur. En outre, le traitement de l'erreur et sa suppression peuvent saturer la mémoire de travail et, de ce fait, gêner certains apprentissages chez le jeune enfant qui n'a encore que des capacités limitées. Wilson et collaborateurs ont proposé, en 1994, à des patients amnésiques cette méthode d'apprentissage sans erreur. Ils ont comparé deux conditions d'apprentissage de mots. La première permet la production d'erreurs en laissant deviner le patient : « Je pense à un mot de sept lettres qui commence par VOI, savez-vous ce que c'est ? » La seconde limite la production d'erreurs en fournissant la réponse au patient : « Je pense à un mot qui commence par VOI et c'est voiture, écrivez-le maintenant s'il vous plaît. » Ces auteurs observent une supériorité de la condition sans erreur sur la condition avec erreur, confirmant ainsi l'effet délétère des erreurs. Cette technique a pour objectif de limiter le coût en mémoire de travail et de compenser les déficits de mémoire épisodique ou un développement encore insuffisant, qui ne permettent pas au patient, ou ici à l'enfant, de se souvenir de l'erreur produite lors de l'exercice précédent et de corriger de lui-même ses erreurs, en fournissant la réponse correcte. Aussi, il sera indispensable d'accompagner l'enfant dans la correction de ses erreurs afin qu'il ne consolide pas cette erreur, mais la réponse appropriée.

Dans ce chapitre, nous avons développé des méthodologies qui ciblent les différentes phases de l'apprentissage : l'encodage (richesse, association), le stockage (ou la consolidation notamment par la répétition) et, enfin, la récupération (projection dans l'activité, adéquation du contexte d'encodage et de récupération). Le choix de ces différentes méthodologies devra être modulé en fonction de l'âge de l'enfant et de son niveau de développement cognitif (ressources attentionnelles, fonctions exécutives, métacognition), ainsi que par l'analyse de ses particularités. Prenons l'exemple d'un jeune enfant qui a notamment une mémoire de travail et des fonctions exécutives encore peu développées : il est préférable de limiter le nombre d'informations fourni, simplifier les consignes, orienter l'attention sur les informations importantes, fractionner les temps d'attention soutenue, ne pas réaliser deux tâches en même temps (écouter et écrire), utiliser des supports pour conserver un niveau d'attention suffisant et éviter de surcharger la mémoire de travail... Ce type de préconisations peut également être proposé chez des enfants présentant des difficultés de mémoire de travail dans un contexte pathologique. Dans le chapitre suivant, nous reprendrons quelques exemples de pathologies de l'enfant dans lesquelles nous observons des troubles mnésiques, touchant préférentiellement la mémoire à long terme ou la mémoire de travail.

Mémoire et pathologies de l'enfant

Accueillir les enfants avec des difficultés de mémoire

Ce chapitre est consacré aux pathologies entraînant des difficultés ou des troubles graves de la mémoire chez l'enfant. Il a plusieurs objectifs. Le premier est de montrer que beaucoup de pathologies lésionnelles et neurodéveloppementales, chez l'enfant comme chez l'adulte, conduisent à des troubles de la mémoire, même si ces derniers ne sont pas au cœur de la maladie. Jusqu'à une date récente, ces troubles de la mémoire ont été minimisés, voire ignorés. Il n'est bien sûr pas possible, dans l'espace restreint de cet ouvrage, de décrire l'ensemble des pathologies de l'enfant qui conduisent à des troubles de la mémoire. Les critères de choix qui ont prévalu ont été la grande fréquence de certaines affections (épilepsie, autisme), la multiplicité des troubles de la mémoire qui peuvent se rencontrer dans différents cadres pathologiques. L'autre objectif très concret

de ce chapitre est de comprendre et d'analyser la diversité de ces troubles pour mieux interagir avec les enfants qui en sont les victimes et mieux les intégrer dans différentes situations, notamment dans le cadre scolaire et périscolaire.

L'objectif complémentaire de ce chapitre est plus théorique. Comme c'est le cas pour les maladies de la mémoire chez l'adulte, les troubles de mémoire observés chez les enfants et les liens avec des modifications des autres fonctions cognitives nous permettent de mieux comprendre l'organisation de la mémoire au cours du développement. En effet, certaines pathologies comportent de façon relativement sélective des troubles de la mémoire de travail, ou de la mémoire épisodique par exemple, ce qui entraîne des situations thérapeutiques et pédagogiques très différentes. L'amnésie développementale, déjà évoquée dans les chapitres précédents, est particulièrement démonstrative à cet égard.

L'amnésie développementale (ou syndrome amnésique chez l'enfant)

Nous reprenons le terme d'amnésie développementale puisqu'il a été proposé par l'équipe de Faraneh Vargha-Khadem dans la publication princeps et est fréquemment utilisé depuis lors. Nous lui préférons néanmoins le terme de syndrome amnésique de l'enfant puisque, dans ces premières observations, la présence de lésions cérébrales est clairement documentée. De façon générale, nous préférons conserver le qualificatif de développemental dans des pathologies où la survenue d'une lésion acquise n'est pas démontrée.

Cet article phare, qui a mis ces syndromes sur le devant de la scène en 1997, porte sur trois enfants, examinés à l'adolescence, dont les lésions

étaient survenues à la naissance chez deux d'entre eux. De nombreuses autres observations ont été publiées depuis cette date par d'autres équipes à travers le monde. Il existe bien sûr des différences, tant sur le plan clinique que lésionnel, entre les patients. Toutefois, ces enfants ont en commun d'avoir développé un syndrome amnésique en relation avec des lésions précoces de la formation hippocampique et relativement limitées à celle-ci. Dans certaines publications, la quantification des lésions a été très bien documentée.

Plusieurs points, qui méritent d'être soulignés sur le plan clinique, ont de plus des conséquences théoriques importantes qui ont suscité de nombreux débats en dehors du cadre strict de la découverte de ces syndromes. Certains symptômes sont relativement stéréotypés d'un enfant à l'autre. Le premier est la découverte tardive, vers l'âge de 5-6 ans, par les parents et les enseignants, des troubles de la mémoire, alors que les lésions étaient déjà anciennes, et même néonatales chez certains enfants. De façon surprenante, le trouble s'exprime donc avec un retard de 5 à 6 ans par rapport à la survenue de la lésion qui en est responsable. Les parents se sont étonnés de l'incapacité de leur enfant à retrouver son chemin dans un environnement familier, d'une désorientation temporelle, de la nécessité d'un rappel fréquent des rendez-vous et de diverses activités. De plus, ces enfants ont beaucoup de mal à faire des récits précis des activités de la journée, que ce soit à l'école ou pendant les vacances. Ces troubles, constatés par les proches des enfants dans la vie courante, ont été ensuite objectivés au moyen de divers tests psychométriques portant sur différents types de matériel (verbal, non verbal). Les déficits de la mémoire épisodique constatés dans la vie courante, comme dans les examens neuropsychologiques, constituent ainsi le cœur du syndrome amnésique de l'enfant.

Les autres éléments notables du tableau clinique sont les capacités préservées de ces enfants. Malgré leurs déficits mnésiques et la précocité

des lésions de la formation hippocampique, l'efficacité intellectuelle est globalement préservée, de même que les compétences langagières (langage oral et écrit) et les connaissances générales sur le monde. Le point le plus remarquable dans ces descriptions est la possibilité, pour ces enfants, d'acquérir de nombreuses connaissances sémantiques alors que la mémoire épisodique était gravement déficitaire. L'un des enfants de la publication princeps, Jon, devenu adolescent puis adulte, a participé par la suite à de nombreuses études.

Dans l'une d'entre elles, les chercheurs ont évalué les performances de Jon dans différentes tâches de reconnaissance d'un matériel verbal et non verbal ; ils ont montré une préservation des capacités de reconnaissance, quelle que soit la tâche proposée. Jon bénéficie ainsi de l'aide procurée par la reconnaissance par rapport au rappel libre, mais aussi de l'effet de répétition de l'item (les performances sont meilleures si le stimulus est présenté plusieurs fois) et d'un délai de rétention court par rapport à un délai plus long. Tous ces éléments concordent pour souligner que Jon améliore ses performances dans des conditions qui favorisent la mise en œuvre d'une restitution basée sur un sentiment de familiarité permis par sa mémoire sémantique largement préservée.

D'autres études ont confirmé cette interprétation. En électrophysiologie, lors de la réalisation de tâches de reconnaissance, les chercheurs ont mis en évidence un seul type d'ondes (la composante N 400), caractéristique des processus de familiarité, et non d'autres types d'ondes habituellement observés lors de la mise en jeu de la mémoire épisodique. Différentes tâches utilisant la réalité virtuelle ont également permis d'aborder la mémorisation du contenu de l'événement et de son contexte spatial et temporel. Les résultats montrent une restitution correcte du contenu (l'objet présent dans la pièce) contrastant avec des scores pathologiques pour la restitution du contexte. De plus, ces études ont montré que Jon est pénalisé quand le point de vue change entre les phases d'étude et de test. Il mémorise l'information

de façon figée avec peu de flexibilité. Ce type d'apprentissage ne lui permet donc pas de reconnaître ensuite les informations qui sont présentées sous un autre format.

Le patient Jon a aussi bénéficié d'investigations utilisant l'IRM fonctionnelle. Elles suggèrent que des mécanismes de plasticité cérébrale ont permis la création d'un réseau cérébral différent de celui des témoins, sous-tendant une forme primaire de mémoire épisodique, qualifiée d'« événementielle » et reposant en partie sur la mémoire sémantique. Cette réorganisation cérébrale, insuffisante pour assurer un fonctionnement normal de la mémoire épisodique, pourrait néanmoins expliquer la moindre sévérité de l'amnésie dans certaines tâches par rapport au syndrome amnésique survenant chez l'adulte.

L'épilepsie

En collaboration avec Isabelle Jambaqué et plusieurs services hospitaliers de la région parisienne, nous avons exploré plusieurs enfants atteints d'une forme d'épilepsie caractérisée par une amnésie sévère avec pour objectif de leur faire apprendre de nouveaux concepts. L'épilepsie est l'affection neurologique la plus fréquente chez l'enfant, et celle-ci entraîne des altérations cognitives et psychoaffectives diverses. Les enfants souffrant d'une épilepsie temporale (surtout si elle est bilatérale) peuvent présenter des troubles mnésiques massifs allant, dans certains cas, jusqu'à un véritable syndrome amnésique.

La jeune patiente K. F., suivie pendant plusieurs mois, est particulièrement démonstrative à cet égard (Martins *et al.*, 2006). À l'âge de 5 ans, cette fillette a présenté un état de mal épileptique dans un contexte fébrile. Elle était atteinte, depuis cette date, d'une épilepsie bitemporale associée à une atrophie bihippocampique. À l'âge de 7 ans, un bilan

neuropsychologique a mis en évidence des capacités cognitives très déficitaires, avec un QI de 60, mais un bon niveau de langage. Les capacités mnésiques étaient en revanche extrêmement limitées avec un oubli à mesure après deux à cinq minutes. Ainsi, K. F. était incapable de reconnaître la pièce dans laquelle avait eu lieu l'évaluation et qu'elle venait de quitter, posait de nombreuses questions itératives et réalisait des actions de façon répétitive. Elle présentait de plus une désorientation temporo-spatiale et elle était incapable de rappeler des événements majeurs survenus la veille ou quelques jours auparavant, comme son repas d'anniversaire. Nous avons mis en place avec elle, et chez d'autres enfants présentant des profils similaires, une procédure permettant d'apprendre de nouveaux concepts.

Le protocole proposé à ces enfants portait sur l'acquisition de huit concepts nouveaux, distribuée au cours de plusieurs sessions d'apprentissage. Celui-ci était réalisé au moyen d'illustrations et de textes descriptifs, dans le but de permettre un double encodage (visuel et verbal). Il comprenait l'apprentissage du nom du concept (par exemple « macareux »), sa catégorie superordonnée (oiseau) et trois caractéristiques spécifiques (il fait son nid dans des terriers de lapin). Plusieurs méthodes de facilitation ont été introduites.

La méthode d'apprentissage sans erreur consistait, pour l'enfant, à ne fournir la réponse à la question posée que s'il était absolument certain de la connaître. Lorsqu'il déclarait ne pas être sûr de posséder la bonne réponse, l'examineur la lui fournissait. De plus, pour l'apprentissage du nom, nous avons utilisé une méthode dite d'estompage des indices, qui consiste à présenter les noms amputés d'abord d'un (macar...), puis de plusieurs (mac...) phonèmes.

Dans cette étude, nous avons évalué, de façon concomitante, l'acquisition de ces huit nouveaux concepts et le souvenir épisodique correspondant aux différentes sessions d'apprentissage. Nous avons ainsi

introduit plusieurs épreuves telles que la reconnaissance d'indices contextuels spécifiques aux différentes sessions d'apprentissage (par exemple, le jeu que l'enfant a effectué lors d'une session particulière). Les enfants sont parvenus à acquérir les nouveaux noms associés à leurs catégories générales et leurs caractéristiques spécifiques. Cet apprentissage est resté stable dans le temps, et K. F. est parvenue à retenir un certain nombre d'informations jusqu'à un an après l'apprentissage et cela, en dépit d'un oubli à mesure en mémoire épisodique (K. F. était incapable de se souvenir qu'elle avait effectué tel jeu lors de la session d'apprentissage).

Ce résultat obtenu avec K. F. est important sur le plan clinique. Il montre que l'on peut élaborer des procédures permettant à ces enfants d'acquérir de nouveaux concepts. K. F. est pourtant une enfant qui présentait des troubles de la mémoire épisodique massifs associés à un affaiblissement intellectuel. K. F. apprend moins vite que des enfants contrôles et que d'autres enfants amnésiques avec un syndrome amnésique moins profond, mais elle est capable d'apprendre. Sur un plan théorique, ces résultats s'intègrent à la position forte de Tulving, reprise dans MNESIS, selon laquelle l'acquisition de connaissances sémantiques (l'encodage en mémoire sémantique) est possible sans recours à la mémoire épisodique.

Troubles neurodéveloppementaux

Troubles du spectre de l'autisme

L'autisme et plus généralement les troubles du spectre de l'autisme (TSA) sont des troubles du développement dont les manifestations comportementales surviennent dès la petite enfance, entre 2 et 4 ans. Ils

sont caractérisés, d'après le *Manuel diagnostic et statistique des troubles mentaux*, le *DSM-5 (Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders)*, par des troubles de la communication sociale et des comportements restreints et répétitifs. La prévalence des troubles du spectre autistique est en augmentation depuis les vingt dernières années, compte tenu des changements de pratiques, notamment diagnostiques. Les chiffres de la Haute Autorité de santé (HAS, 2010) concernant les « troubles envahissants du développement » sont les suivants : 6 à 7/1 000 pour les personnes de moins de 20 ans, ce qui a fait de l'autisme la « grande cause nationale 2012 » et qui est à l'origine aujourd'hui du « troisième plan autisme 2013-2017 » dans lequel la recherche tient une place importante.

Le fonctionnement cognitif est extrêmement hétérogène dans l'autisme, caractérisé à la fois par un retard dans certains domaines, un fonctionnement normal dans d'autres, voire un surfonctionnement dans des domaines très spécifiques tels que le calcul, la musique ou le graphisme. La mémoire n'échappe pas à cette hétérogénéité. Après environ quarante ans de travaux sur le fonctionnement mnésique dans l'autisme, il apparaît que les systèmes de mémoire complexes, intégratifs et tournés vers soi, tels que la mémoire épisodique, sont plus affectés, contrairement à l'apprentissage implicite qui pourrait rendre compte de capacités de calcul calendaire très développées. Ce paradoxe est tout à fait compatible avec certaines anomalies cérébrales d'apparences contradictoires, notamment au niveau fonctionnel. En effet, le défaut de connectivité de longue distance, ou sous-connectivité entre les régions cérébrales antérieures et postérieures, participerait à ces difficultés de mémoire épisodique entravant l'élaboration d'un souvenir détaillé. En revanche, une augmentation de la connectivité locale dans des régions postérieures pourrait participer au surfonctionnement d'une compétence perceptive donnée (un « îlot d'habileté »).

La majorité des travaux réalisés sur l'autisme portent sur une population sans retard intellectuel. Bien que non représentatifs de l'ensemble des personnes qui en sont atteintes, ces travaux nous renseignent tout de même sur les particularités mnésiques de l'autisme. Ils rapportent tous une fragilité de la mémoire épisodique qui implique des processus discutés dans les trois théories cognitives majeures de l'autisme : la théorie de défaut de théorie de l'esprit, l'hypothèse de dysfonctionnement exécutif et les théories perceptives.

La mémoire épisodique, dans ses composantes rétrospective et prospective, présente un fonctionnement atypique. Les premières études, menées dans les années 1970, rapportent des difficultés de rappel chez les personnes avec autisme. Au-delà du rappel, il semble que ce soient les stratégies de mémorisation qui fassent défaut. Cette hypothèse fut évoquée dès 1970, et largement documentée depuis, donnant lieu à différentes théories telles que l'hypothèse du support de la tâche de Dermot Bowler ou le modèle de traitement des informations complexes de Nancy Minshew (voir Marcaggi *et al.*, 2010 pour revue). La première postule qu'en l'absence de support les personnes avec autisme seront en difficulté, alors que si un support est fourni, les performances se normalisent. Ce support peut être proposé lors de la restitution, mais aussi dès l'encodage, lorsque des consignes explicites sont proposées. Ainsi, c'est la capacité à utiliser spontanément des stratégies adéquates qui ferait défaut. Le second modèle renvoie également aux stratégies de traitement en fonction de la complexité du matériel. Ce modèle postule que la mémorisation devient difficile dès lors que les stimuli, y compris des stimuli sociaux tels que des visages, gagnent en complexité. Ce modèle dépasse largement le cadre de la mémoire épisodique et permet de rendre compte des difficultés, notamment en mémoire de travail.

Plus récemment, des études se sont intéressées aux différentes composantes de la mémoire épisodique : la mémoire de la source,

l'implication de soi ou du *self* dans la construction des souvenirs et les capacités de reviviscence. La mémoire de la source renvoie à l'origine de l'information : externe (« est-ce X ou Y qui l'a dit ? »), interne (« l'ai-je dit ou l'ai-je pensé ? ») ou interne/externe (« l'ai-je dit ou quelqu'un d'autre l'a-t-il dit ? »). Les données obtenues sont hétérogènes et soulignent l'importance du critère « social ». Des difficultés peuvent être observées lorsque les personnes avec autisme ont à reconnaître la source à partir d'un visage par rapport à un détail vestimentaire. Ces difficultés de mémoire de la source associées à l'identité ont des répercussions sur les capacités de reviviscence évaluées par des tâches de laboratoire, telle que la mémorisation d'une liste de mots, ou des tâches plus écologiques centrées sur la mémoire autobiographique. En effet, une dissociation est fréquemment observée au sein de la mémoire autobiographique, entre les connaissances (noms de mes anciens enseignants par exemple) et les souvenirs (la journée de rentrée) ou entre la composante sémantique et épisodique. Cette dernière est largement affectée dans l'autisme, se traduisant par des souvenirs à la fois moins détaillés et moins associés à un sentiment de reviviscence. L'origine de ces difficultés est de nouveau multifactorielle, impliquant des fragilités au niveau des ressources exécutives, tant la flexibilité que l'association des éléments constitutifs du souvenir, des capacités d'imagination et du sentiment de continuité du *self*.

Ces difficultés contrastent avec des capacités extraordinaires de certaines personnes avec autisme interprétées principalement au regard des théories perceptives, de faiblesse de cohérence centrale et de surfonctionnement perceptif. Cette dernière théorie insiste sur l'existence de capacités de discrimination perceptive, visuelle et auditive, plus développées chez la personne avec autisme. Ces compétences extraordinaires concernent principalement un matériel structuré, que ce soit la musique, le calcul ou le dessin. Ces séquences structurées sont formées d'unités définies, regroupées en patterns qui se répètent. Les personnes avec

autisme détectent ces régularités pour se former un lexique spécifique. Par la suite, ces connaissances ou représentations pourront être activées à la présentation d'un indice. Même si ces personnes peuvent avoir une mémoire prodigieuse, c'est l'appréhension de l'information et la structuration même de leurs connaissances qui est particulière. Ces capacités associées à une exposition massive aux informations liées à leur domaine d'intérêt restreint font émerger ces compétences extraordinaires. L'apprentissage implicite ou « mémoire des habitudes », et notamment des régularités, joue donc un rôle crucial, ce qui expliquerait que, dans la majorité des cas, ces compétences demeurent limitées au domaine d'intérêt. En effet, plusieurs études ont tenté de généraliser à la mémorisation d'autres matériels, mais sans succès. Toutefois, les travaux sur la mémoire restent encore trop peu nombreux pour rendre compte pleinement de ces capacités extraordinaires.

Nous retrouvons dans l'amnésie développementale, l'épilepsie ou encore les troubles du spectre de l'autisme des anomalies de fonctionnement de la mémoire à long terme associées, dans certains cas, à la mémoire de travail. En revanche, il existe d'autres pathologies qui se caractérisent par le profil inverse. Nous avons choisi de décrire en quelques mots ce profil dans deux pathologies, la dyslexie et le déficit de l'attention, qui peuvent toucher jusqu'à 10 % des enfants scolarisés.

Les troubles spécifiques des apprentissages : la dyslexie

Les troubles spécifiques des apprentissages renvoient dans les dernières classifications (*DSM-5*) à une partie des troubles « dys », la dyslexie et la dyscalculie. Il s'agit de troubles neurodéveloppementaux qui se traduisent par des difficultés à acquérir et à utiliser des compétences scolaires spécifiques. Ces difficultés sont suffisamment sévères et persistantes pour

retentir sur l'intégration scolaire et ne peuvent être expliquées entièrement par un retard mental, un trouble sensoriel, un trouble moteur, un trouble psychologique ou un manque de maîtrise de la langue. Ainsi, la dyslexie-dysorthographe correspond à une altération du langage écrit : dyslexie pour le trouble d'acquisition de la lecture, associée à une dysorthographe touchant l'orthographe phonologique, lexicale et grammaticale. Le trouble de lecture peut être compensé très efficacement par des aides et une prise en charge adaptées (école, orthophonie) ; ne subsisteront alors qu'une lenteur, quelques difficultés de compréhension écrite et de production d'écrits.

Les difficultés mnésiques rencontrées dans la dyslexie concernent le plus souvent la mémoire de travail et plus précisément la mémoire de travail verbale. L'empan verbal, c'est-à-dire le nombre d'informations que l'on peut maintenir en mémoire de travail, est réduit chez les enfants dyslexiques. Ils ont des difficultés à restituer une série de chiffres, de lettres ou de mots, et plus encore des mots qui n'existent pas (logatomes). Cette capacité réduite de la mémoire de travail pourrait participer aux difficultés de ces enfants pour décomposer les mots en sons (phonèmes) et maintenir l'ensemble de ces sons en mémoire. Nous savons que l'apprentissage du langage repose sur la mémoire de travail. En effet, quand nous apprenons de nouveaux mots, nous devons réaliser plusieurs actions : retenir chaque son qui compose le mot, les associer pour former le mot, apprendre sa signification et différents contextes d'utilisation. Les enfants dyslexiques, ayant une capacité limitée de mémoire de travail, auront bien sûr des difficultés à réaliser toutes ces étapes. Plus précisément, et si nous nous référons au modèle proposé par Baddeley, ce sont plutôt la boucle phonologique et l'administrateur central qui sont concernés. Sur le plan du fonctionnement cérébral, cela se manifeste par des difficultés à recruter les régions cérébrales sous-tendant la mémoire de travail verbale et, contrairement à des enfants ou à des adultes sans difficulté de lecture dits

normo-lecteurs, les personnes dyslexiques ne peuvent mobiliser davantage ces régions lorsque la difficulté de la tâche augmente.

Il faut noter toutefois qu'il existe certaines formes de dyslexie moins fréquentes qui se manifestent plutôt par des difficultés visuo-attentionnelles. L'enfant peut inverser des lettres, en oublier, confondre des mots visuellement proches comme « jolie » et « joie ». Il peut également sauter des lignes quand il est amené à lire un texte. Chez ces enfants, l'équipe de Sylviane Valdois, à Grenoble, a mis en évidence une réduction de l'empan visuo-attentionnel qui correspond au nombre d'éléments visuels distincts pouvant être traités en parallèle dans une même configuration. Ces difficultés peuvent également se répercuter plus largement sur la mémoire de travail pour des informations visuelles et/ou spatiales.

Il existe donc dans la dyslexie, qu'elle soit à prédominance phonologique ou visuo-attentionnelle, des difficultés de mémoire de travail qui devront nécessairement être prises en charge dans le suivi des enfants.

Le trouble de déficit de l'attention/hyperactivité

Le déficit de l'attention, retrouvé également sous le terme de trouble de déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDA/H), se manifeste par des difficultés à se concentrer, rester en place, terminer ses devoirs, s'organiser. L'enfant perd ses affaires, et son comportement perturbe de manière importante les relations sociales, familiales et l'intégration scolaire. Il associe de façon variable des symptômes d'inattention, d'impulsivité ou d'hyperactivité dont l'importance modifie le profil des difficultés retrouvé chez les enfants. Certains présenteront plutôt une prédominance d'impulsivité/hyperactivité, d'autres principalement de l'inattention ou encore la présence de ces trois symptômes dans des proportions semblables. Par ailleurs, les troubles de l'attention sont souvent associés à d'autres

difficultés telles que les troubles spécifiques des apprentissages décrits précédemment. L'ensemble fait que le profil des enfants peut être très différent, c'est pourquoi une consultation auprès d'un neuropsychologue s'avérera utile pour préciser ce profil et orienter en conséquence la prise en charge (éducative, pédagogique, rééducative, psychothérapeutique). D'un point de vue cérébral, l'hypothèse d'un retard dans la maturation a été évoquée. Ce retard pourrait avoir un impact sur le fonctionnement cognitif, et notamment exécutif, et sur la connectivité tant structurale que fonctionnelle limitant le recrutement de larges réseaux de neurones pour des traitements complexes.

Les difficultés de mémoire de travail sont au cœur de cette pathologie et peuvent être associées à un dysfonctionnement d'un vaste réseau impliquant notamment les régions frontales, puisque l'existence d'un trouble des fonctions exécutives est largement reconnue aujourd'hui. En revanche, les enfants ne présentent pas des difficultés dans toutes les tâches de mémoire de travail : cela dépend de la tâche qui leur est proposée. Aussi, les tâches d'empan, qui consistent à répéter une suite de chiffres par exemple, impliquent peu les capacités de manipulation et seront souvent bien réussies. En revanche, les enfants sont plus facilement en échec lorsque les tâches sont plus complexes et nécessitent la réorganisation d'un matériel – en d'autres termes, le type de tâches associées aux apprentissages –, ce qui explique en grande partie pourquoi les enfants se retrouvent en difficulté.

Les études qui font la synthèse des résultats obtenus dans les recherches cognitives mettent en avant la présence de difficultés de vigilance et d'inhibition : inhibition d'une réponse très prédominante, mais inappropriée qui permet d'arrêter une activité routinière en cours pour s'adapter à de nouvelles consignes (comme ne pas aller directement s'asseoir quand on arrive en classe, mais passer chercher son cahier sur le bureau de l'enseignant), et aussi inhibition des informations interférentes qui viennent gêner la réalisation d'une activité, comme le bruit des enfants jouant dans la

cour pendant que d'autres réalisent un exercice en classe ou des pensées qui ne sont pas en rapport avec l'activité. Ces interférences externes et internes (c'est-à-dire laisser libre cours à d'autres pensées que celles permettant de réaliser l'exercice) affectent la sélectivité du rappel.

Les difficultés d'apprentissage portent sur les phases d'encodage et de récupération des informations : les anomalies attentionnelles se manifestent dès l'encodage, car les informations importantes échappent à l'enfant et sont associées à d'autres anomalies d'ordre stratégique au moment de la récupération. Il est donc nécessaire de fractionner les différentes étapes de traitement, de ne pas surcharger les consignes, de marquer les transitions, de souligner les informations pertinentes pour faciliter l'apprentissage.

Les différentes pathologies évoquées dans ce chapitre permettent d'illustrer la fragilité du développement mnésique chez l'enfant en pointant des anomalies, même dans un contexte où les troubles de mémoire ne sont pas au premier plan, comme dans l'autisme. Elles conduisent à souligner également la variété des profils de dysfonctionnement et de leur expression, mais aussi les possibilités de remédiation ou de compensation, y compris dans des cas de troubles sévères de mémoire, tels que ceux observés dans l'épilepsie.

Un nouveau monde de la mémoire pour l'enfant et pour l'adulte

Les acquis et les enjeux des recherches en neuropsychologie et en neurosciences cognitives

Ce livre a pour objectif de donner au lecteur une vision d'ensemble de la mémoire humaine. Les grands principes de son organisation fonctionnelle ont été présentés dans le premier chapitre. Les avancées provenant de la neuropsychologie et des neurosciences cognitives y ont été particulièrement développées, car elles sont les plus significatives et directement en lien avec la thématique centrale de l'ouvrage : contribuer à une neuroéducation à partir des travaux scientifiques menés sur la mémoire et le cerveau. Un modèle théorique général formé de systèmes de mémoire et de processus interactifs est indispensable pour dépasser les lieux communs et pour

véritablement comprendre cette fonction éminemment complexe qu'est la mémoire, mais ce cadre est tout sauf une structure rigide et figée. Il fournit des contours et définit des concepts qui pourront être utilisés, argumentés ou même remis en cause dans certains cas. Le modèle que nous proposons, MNESIS, espace de réflexion très ouvert, permet d'accompagner ces débats et de servir de terrain d'échange lors des discussions de situations pratiques.

La mémoire est avant tout une structure dynamique, mouvante, changeante, qui s'appuie sur des réseaux de structures cérébrales dotées d'une grande plasticité, notamment au cours de l'enfance et de l'adolescence, mais aussi tout au long de la vie. La mémoire rend possibles des acquisitions et des apprentissages très divers, l'adaptation à des situations nouvelles ; en même temps, elle doit permettre une synthèse en créant un sentiment de continuité et d'identité personnelle. La mémoire se définit par la plasticité et la réactivité d'une part, ainsi que par la stabilité et la cohérence d'autre part. Cette cohérence doit également mettre en adéquation nos connaissances personnelles (dans un sens très large) avec celles de l'environnement avec lequel nous interagissons (qui va de groupes restreints autour de nous aux connaissances générales sur le monde).

La mémoire peut être comprise et expliquée par la description d'un certain nombre de mécanismes dont il est légitime de chercher à optimiser le fonctionnement. En même temps, cette mémoire possède une autre dimension, qui est la construction de l'individu, de son identité personnelle, de ses liens avec les autres, de ses valeurs morales et spirituelles, cette construction se prolongeant tout au long de la vie. Quand on prend conscience de cette importance de la mémoire, on se dit qu'elle n'est pas considérée à sa juste place dans notre société qui la perçoit bien souvent comme une fonction subalterne ou un simple accessoire. Pourtant, la prévalence accrue des maladies neurodégénératives depuis une trentaine d'années, la prise de conscience du problème de santé publique qui s'est ensuivi, ont mis la focale sur la mémoire et ses troubles. Mais il s'agit d'une

prise de conscience par défaut et même par crainte. La mémoire devient une fonction essentielle quand on a peur de la perdre. Il n'existe pas en revanche de réflexion d'ensemble sur la mémoire dans notre société et notamment dans notre système éducatif, qui pourrait bénéficier des avancées de la science dans ce domaine.

Ces progrès ont pourtant été considérables ces dernières années. Ils ont concerné la mémoire de l'adulte dans un premier temps, puis les travaux consacrés à l'enfant et à l'adolescent se sont multipliés au cours de la dernière décennie. Nous ne sommes plus aux prises avec des conjectures, mais face à des connaissances scientifiques nombreuses qui peuvent être organisées en un tout cohérent. Plusieurs chapitres de ce livre exposent les récentes avancées passionnantes dans ce domaine. Celles-ci nous donnent des messages clés qui ne peuvent pas être ignorés par les éducateurs, et doivent être enseignés et discutés dans les formations des enseignants, même si le passage de ces résultats à la pédagogie doit donner lieu, là aussi, à d'autres travaux scientifiques. L'éducation est une science qui ne doit pas s'accoutumer à des *a priori* et à des approximations, les enjeux sont trop importants pour les enfants, leur devenir et la société tout entière.

La grille de lecture, forcément partielle et orientée, que nous avons proposée a mis en exergue certains résultats marquants. Les différents systèmes de mémoire se mettent en place très progressivement au cours de l'enfance pour devenir, à la fin de l'adolescence, comparables à ceux de l'adulte, en termes de caractéristiques fonctionnelles, même si les contenus continueront à se modifier au fil du temps. Ce long développement de la mémoire au cours de l'enfance et de l'adolescence est directement lié aux processus de maturation cérébrale. Les mémoires perceptive et procédurale sont les premières opérationnelles chez l'enfant et celles sur lesquelles s'élaborent de nombreuses acquisitions, dès les premiers jours et les premiers mois de vie. Le développement de la mémoire sémantique, amplifiée par l'acquisition du langage, permet à l'enfant de comprendre le

monde qui l'entoure et conduit à une organisation structurée des connaissances conceptuelles.

La mémoire de travail et la mémoire épisodique se mettent en place plus lentement. Le développement tardif de la mémoire de travail et des fonctions exécutives, qui en constituent les mécanismes les plus complexes, explique que l'enfant éprouve des difficultés à maintenir son attention pendant des durées longues, mais rend compte également de sa difficulté à organiser différents apprentissages. L'amnésie infantile (appelée parfois physiologique), phénomène normal selon lequel nous n'avons pratiquement pas de souvenirs de notre vie avant l'âge de 5 ans, s'explique en grande partie par la maturation tardive de la mémoire épisodique. Certaines composantes de la mémoire épisodique se structurent encore plus tardivement, comme les aspects temporels : la capacité à mémoriser l'ordre de survenue des différents éléments d'un souvenir. Les jeunes enfants sont dans une période propice à différents apprentissages et à la formation de connaissances nouvelles, mais leur capacité à élaborer des souvenirs précis et bien situés dans le temps reste très imparfaite, ce qui explique en partie leur suggestibilité.

Ces résultats, et d'autres, nous ont amenés à proposer, dans le quatrième chapitre, quelques « grands » principes qui doivent nécessairement être modulés par l'âge de l'enfant et, en conséquence, par la fonctionnalité de sa mémoire et, plus largement, de son développement cognitif et métacognitif. Ces lignes de force sont directement dérivées des acquis exposés précédemment et fournissent des applications concrètes sur le plan pédagogique et éducatif. Les solutions pratiques passent également par l'aménagement du contexte d'apprentissage. Dans cette partie, nous avons répondu de façon très pragmatique à quelques questions fréquemment posées par les enseignants. Le principe de ce livre est celui d'un dialogue et non de recettes générales qui pourraient s'appliquer sans discernement à

tous les enfants. La diversité des situations et la variabilité interindividuelle sont des éléments clés du problème.

Le cinquième chapitre a été consacré aux maladies de la mémoire de l'enfant, et plus largement à des pathologies où cette mémoire se trouve altérée, même s'il ne s'agit pas d'une maladie de la mémoire en tant que telle. L'emphase a été portée sur l'amnésie développementale (ou syndrome amnésique de l'enfant) car, même si elle est rare, cette pathologie intrigante nous donne des clés essentielles sur la mise en place progressive des systèmes de mémoire et notamment sur les liens entre mémoire épisodique et mémoire sémantique. Dans la suite du chapitre et dans une volonté de compréhension et d'intégration des enfants qui en souffrent, plusieurs pathologies sont décrites, parmi les plus fréquentes, en soulignant la diversité des troubles de la mémoire. Un point important concerne le fait que certains modes d'apprentissage, parfaitement adaptés chez l'enfant typique (par exemple l'apprentissage avec erreur), se révèlent au contraire délétères chez des enfants souffrant de troubles de la mémoire.

Développement et réserve cognitive

Comme nous l'avons mentionné à plusieurs reprises au cours de cet ouvrage, les troubles de la mémoire sont une préoccupation fréquente des personnes âgées, mais aussi de toutes les générations, car nous sommes tous confrontés à des personnes souffrant d'une pathologie affectant la mémoire. Les travaux scientifiques récents ont permis des avancées majeures dans plusieurs domaines et ils méritent d'être rapidement évoqués. Tout d'abord, il est essentiel de différencier le vieillissement normal (physiologique) du vieillissement pathologique (par exemple les maladies neurodégénératives comme la maladie d'Alzheimer). Cette distinction est restée longtemps

imprécise, ce qui a semé la confusion et a conduit à assimiler vieillissement et déclin inéluctable des fonctions cognitives.

Au cours du vieillissement normal, les modifications de la mémoire concernent essentiellement la mémoire de travail et la mémoire épisodique. En revanche, la mémoire procédurale, la mémoire perceptive et la mémoire sémantique ne donnent pas lieu à des modifications importantes. Il est intéressant de constater que les systèmes de mémoire les plus sensibles aux effets de l'âge sont ceux qui se mettent en place le plus tardivement au cours du développement, et qu'au contraire les plus résistants sont ceux qui sont en place le plus précocement. Cette ressemblance n'est pas qu'une simple image, elle souligne au contraire l'implication de processus cognitifs et cérébraux en partie communs, dont la mise en place est tardive chez l'enfant et l'adolescent, et qui se révèlent par ailleurs très sensibles aux effets de l'âge.

Chez l'adulte, les différences de performances en fonction de l'âge sont observées dans les tâches qui requièrent des processus contrôlés. Ainsi, la diminution des ressources cognitives (attentionnelles), qui accompagne le vieillissement, serait responsable des modifications de la mémoire. Lors de l'encodage, les personnes âgées auraient des difficultés à mettre spontanément en œuvre un traitement profond (sémantique) de l'information. De plus, les capacités de rappel libre chez les sujets âgés seraient plus marquées que les capacités de reconnaissance. Dans les deux cas (encodage et récupération), les performances s'améliorent très nettement selon les processus sollicités si une aide pertinente est fournie à la personne âgée (orienter vers un traitement sémantique lors de l'encodage ; donner des indices pertinents lors de la récupération). Cet état de fait suggère que les modifications de la mémoire au cours du vieillissement sont des troubles *apparents*, car la mémoire n'est pas touchée dans ses mécanismes fondamentaux, ce qui permet de les distinguer des troubles *authentiques* observés par exemple dans la maladie d'Alzheimer.

L'imagerie cérébrale conforte ces résultats en montrant que les modifications cérébrales sont bien différentes dans les deux cas. Au cours du vieillissement normal, celles-ci portent principalement sur les régions du cortex préfrontal, ce qui explique bien les difficultés d'ordre stratégique de mise en mémoire et certaines difficultés de récupération, comme la difficulté à retrouver la source de l'information. Les méthodes d'imagerie cérébrale permettent maintenant de décrire avec une grande précision les anomalies structurales et fonctionnelles qui sont responsables des différents troubles cognitifs dans les maladies neurodégénératives.

Un domaine de recherche très actif s'intéresse aux facteurs qui permettent de retarder les effets potentiellement délétères de l'âge sur les fonctions cognitives (y compris la mémoire) et aussi de différer la survenue des symptômes des maladies neurodégénératives. Plusieurs mécanismes, qui s'articulent autour du concept de *réserve*, ont été décrits pour expliquer les différences interindividuelles observées. Ces différences concernent, d'une part, les effets de l'âge sur la mémoire et, d'autre part, le fait que des personnes atteintes par une maladie du cerveau (comme la maladie d'Alzheimer, mais aussi d'autres types d'affections) vont développer les symptômes de déclin cognitif plus ou moins tardivement. Deux types de réserve sont classiquement distingués : la réserve cérébrale (ou statique), qui correspond à des mécanismes constitutionnels (liés notamment à des facteurs génétiques), et la réserve cognitive (ou dynamique), qui fait référence aux comportements et attitudes de l'individu ainsi qu'aux informations qu'il manipule tout au long de sa vie.

Un point essentiel concerne l'identification des facteurs (ou déterminants) qui permettent de protéger des effets potentiellement délétères de l'âge sur la cognition et de retarder la survenue des premiers signes cliniques d'une maladie neurodégénérative. Ces maladies sont effectivement présentes dans le cerveau des individus atteints, souvent des décennies avant que les premiers symptômes ne se manifestent. Différentes

disciplines ont permis de préciser ces facteurs, ce qui permet de préconiser des programmes de prévention. Un premier facteur concerne l'activité physique qui permet d'éviter la survenue de pathologies cardio-vasculaires qui ont un effet péjoratif sur la cognition. La qualité de la nutrition peut également être rapprochée de ce premier facteur. Pour les aspects plus cognitifs, le fait d'exercer des activités intellectuellement stimulantes joue un rôle important, surtout si elles ont lieu dans un cadre social (voyages, investissement dans des associations...). Les chercheurs en neurosciences décrivent différents mécanismes biologiques (neurogenèse – c'est-à-dire développement de nouveaux neurones –, mécanismes cérébraux de divers ordres, comme le renforcement de certains réseaux ou l'utilisation de réseaux alternatifs) qui fournissent une argumentation neurobiologique pour préconiser un mode de vie conduisant à un vieillissement optimal.

L'importance du niveau d'éducation (estimé par le nombre d'années d'études) comme déterminant de la réserve cognitive a été démontrée dans des études utilisant des méthodologies très différentes. Par exemple, des études épidémiologiques portant sur de grandes cohortes de participants montrent qu'un niveau d'éducation élevé entraîne une diminution de la prévalence des maladies neurodégénératives chez les personnes âgées. Ce résultat marquant souligne le fait que le niveau d'éducation a une influence notable sur l'âge de survenue des premiers symptômes des maladies neurodégénératives. Des études d'imagerie cérébrale, au moyen de différentes techniques, ont également montré qu'un niveau d'éducation élevé entraîne une connectivité cérébrale accrue, qui constitue le substrat de la réserve cognitive. Des travaux menés chez l'animal (le plus souvent des petits rongeurs) montrent qu'un environnement enrichi (nombreux jeux et autres dispositifs dans les cages, présence de congénères) améliore les performances cognitives quand l'animal vieillit, en lien avec différents indicateurs témoignant d'une moindre involution des structures cérébrales.

Les travaux consacrés au concept de réserve constituent un domaine nouveau et particulièrement actif de la recherche. Il nous a semblé important d'insister, dans le cadre de cet ouvrage, sur le fait que l'éducation et, plus précisément, l'éducation d'une bonne utilisation de la mémoire et, plus largement, de la cognition vont bien au-delà de techniques d'apprentissage, dans un cadre scolaire ou périscolaire, mais ont des répercussions tout au long de la vie de l'individu, y compris quand celui-ci vieillit. Il ne s'agit pas pour autant de préconiser une vision strictement déterministe centrée sur la période de l'enfance, liée à un seul facteur comme le niveau d'éducation, qui écrirait linéairement la suite de la vie de la personne. Au contraire, dans la perspective « vie entière » qui a été préconisée tout au long de ce livre, il s'agira de mieux comprendre, dans les études ultérieures comment différents facteurs (l'éducation, mais aussi l'environnement social, la profession, les loisirs, etc.) vont interagir, de façon dynamique, tout au long de la vie, et comment on peut les modifier ou les moduler pour le mieux-être de l'individu.

Un monde qui change : l'irruption du numérique

Depuis toujours, y compris dans le cadre de la tradition orale, notre mémoire personnelle (ou mémoire interne) s'est appuyée sur des mémoires externes. Cette mémoire personnelle a souvent été assimilée à une mémoire strictement individuelle, ce qui est évidemment réducteur. Parmi nos amis, les membres de notre famille, les personnes que nous connaissons, nous savons que telle personne est spécialiste d'ornithologie, que telle autre est incollable sur la vie politique française de ces vingt dernières années, que telle autre encore connaît parfaitement les États-Unis pour y avoir

longtemps vécu. Nous interrogeons ces « spécialistes » quand nous avons besoin d'un renseignement dans ces domaines et nous leur faisons confiance, comme nous avons nous-même nos domaines d'expertise pour lesquels nous sommes consulté. C'est une façon dont la mémoire se construit en nous et en dehors de nous, et ces échanges alimentent les relations sociales.

Au fil des siècles, l'écriture, l'imprimerie ont entraîné des modifications progressives dans cet équilibre entre mémoire interne et mémoire externe, le support de cette dernière étant de plus en plus lié à la diffusion de l'écrit. D'autres supports, d'autres moyens techniques se sont développés plus récemment dans le domaine de l'audiovisuel. Un changement récent et massif tient au développement et à l'omniprésence des nouvelles technologies de l'information et de la communication. Progressivement, la mémoire externe est donc devenue de plus en plus « artificielle » et aussi de plus en plus omniprésente.

L'utilisation aisée d'Internet permet ainsi l'accès à un nombre d'informations considérable en quelques « clics », ce qui en soi constitue un progrès impressionnant. C'est un paysage nouveau de la mémoire qui s'est mis en place rapidement et dont il faut tenir compte pour éviter de penser que ses effets sur la mémoire seront catastrophiques, ou au contraire que cette nouvelle situation ne changera rien ! Notre cerveau est doué de plasticité et un changement aussi important que l'utilisation massive des nouvelles technologies de l'information modifie nos modes d'apprentissage et leurs supports cérébraux. Le numérique peut soutenir le développement, comme l'utilisation de jeux vidéo qui développe les capacités attentionnelles. L'éducation a un rôle majeur à jouer dans ce domaine et les débats sur ces sujets doivent être de mise.

Le problème de l'utilisation d'Internet dépassant largement le problème de la mémoire, seuls certains aspects sont évoqués dans ce livre. Par exemple, sur une thématique donnée, Internet donne accès à une multitude

d'informations provenant de sites de qualité inégale. Notre système cognitif, et plus encore celui des plus jeunes, est parfaitement adapté pour enregistrer des informations, beaucoup moins pour en retenir la source, surtout si les informations sont traitées de façon superficielle, en étant consultées très rapidement et en passant d'un site à l'autre (en « zappant »). Le risque pour le contenu de notre mémoire est d'amalgamer des informations de qualité très différente.

Au-delà de la question d'Internet et de la qualité des sources, le problème de l'équilibre entre mémoire interne et mémoire externe est à nouveau posé. Il est important de pouvoir faire son propre travail de synthèse de la mémoire et, pour cela, le temps est nécessaire. L'éducation doit favoriser ce partage harmonieux entre l'accès rapide à certaines informations (en ce sens Internet est une opportunité extraordinaire) et le travail en profondeur d'analyse et de réflexion qui permettra à l'enfant de se forger ses propres opinions et convictions. Pour cela, des moments de rêverie et de solitude sont nécessaires, chez l'enfant comme chez l'adulte, où nous ne sommes pas en prise directe sur les informations de l'extérieur. L'imagerie cérébrale a souligné l'existence d'un réseau dit au repos (ou par défaut) qui est indispensable pour consolider les apprentissages, forger nos connaissances, mais aussi pour notre équilibre psychique.

Ce qui vient d'être évoqué n'est pas spécifique à l'utilisation d'Internet, mais doit être rapproché d'autres points déjà abordés dans ce livre, notamment ce qui a trait à la maturation cérébrale et au développement de la mémoire chez l'enfant. Ces caractéristiques de la mémoire de l'enfant sont essentielles à connaître pour un éducateur. Certaines peuvent sembler évidentes comme les capacités limitées de la mémoire de travail. D'autres sont moins immédiates comme la maturation de la mémoire épisodique où les aspects d'ordonnement temporel sont particulièrement lents à se mettre en place. Il est aussi utile de rappeler l'importance de l'encodage profond (traitant le sens), si possible dans le cadre d'un apprentissage

distribué, permettant de revenir sur les acquis antérieurs. Enfin, il ne faut pas oublier le rôle essentiel de la qualité du sommeil (souvent malmené) dans la consolidation des apprentissages. Le temps d'Internet est aussi le temps des écrans dont l'utilisation intempestive est nuisible à la qualité du sommeil.

Réhabiliter la mémoire !

Ce livre a pour objectif principal de présenter les recherches actuelles en neuropsychologie et en neurosciences cognitives de la mémoire et de montrer leurs applications dans une perspective de neuroéducation chez l'enfant et chez l'adolescent. Les nombreux travaux publiés montrent la pertinence d'élaborer une démarche éducative fondée sur des bases scientifiques. Le projet est ambitieux, car il ne vise pas seulement à favoriser les apprentissages, notamment dans le domaine scolaire. La démarche que nous avons adoptée, qui prend en compte la vie entière de l'individu dans son environnement social, montre que la problématique de la mémoire est beaucoup plus large et rejoint des enjeux de santé publique et de société.

Tout d'abord, nous avons accordé une large place aux troubles de la mémoire et aux pathologies des apprentissages chez l'enfant et chez l'adolescent pour rendre compte de la diversité des situations cliniques rencontrées. Nous avons également abordé les troubles de la mémoire chez la personne âgée et dans les maladies neurodégénératives. Ces thématiques pourraient paraître surprenantes dans un ouvrage ayant pour titre *La Neuroéducation. La mémoire au cœur des apprentissages*. Pourtant, nous avons souligné les liens maintenant bien démontrés entre des facteurs éducatifs survenant lors de l'enfance et de l'adolescence, et le vieillissement cognitif. Il faut bien se garder de tout déterminisme ; pour autant, ces

résultats sont importants pour fonder des politiques d'éducation, de prévention et de santé publique.

La mémoire – que ce soient ses mécanismes qui favorisent les apprentissages ou ses contenus qui forgent à la fois l'identité personnelle et le lien social – est un capital précieux. Elle nécessite un soin particulier et une éducation lors des premières années, quand les apprentissages sont nombreux, comme elle mérite une attention tout au long de la vie. Cette prise de conscience a débuté face à la prévalence accrue des maladies, la maladie d'Alzheimer étant la plus emblématique d'entre elles. Ainsi, la société prend conscience de l'importance de la mémoire en constatant ses déficits et les conséquences qu'ils entraînent. Il n'existe pas en revanche de réflexion d'ensemble sur le problème de la mémoire, qui concerne toutes les générations et doit donc nécessairement être considéré de façon pluridisciplinaire. Nous avons mis en avant les travaux de neuropsychologie et de neurosciences, notamment ceux en lien avec l'éducation et la pédagogie.

Nous avons aussi mentionné les nouvelles technologies de l'information et de la communication qui modifient l'équilibre entre mémoire interne et mémoire externe. Cette situation nouvelle en évolution rapide mérite une vraie réflexion dans un contexte plus large de surstimulation, qui laisse peu de place à la prise de recul et au temps nécessaire pour traiter les informations, y revenir si besoin et aussi se laisser aller à des rêveries et à des pensées internes, qui consolident les apprentissages et favorisent le travail de synthèse, d'anticipation et de prospective de la mémoire. Différents facteurs physiologiques peuvent aussi être mentionnés dans ce cadre, pour insister sur le fait qu'une certaine hygiène de vie est importante pour une structuration optimale de la mémoire et pour sa conservation tout au long de la vie. Le sommeil est un élément essentiel, tant les liens sont forts entre un sommeil de qualité et les processus de consolidation en mémoire. Nous n'avons pas insisté sur les prises de toxiques, car ce sujet

s'écarter de la thématique générale de cet ouvrage. Il peut être utile de rappeler que le syndrome de Korsakoff, véritable prototype du syndrome amnésique, est le plus souvent lié à un abus prolongé d'alcool. Les pratiques d'alcoolisation brèves et intenses chez l'adolescent (*binge drinking*) sont inquiétantes pour leurs conséquences à court et à plus long terme.

Il convient de réhabiliter la mémoire et de la protéger. Dans notre société qui voit cohabiter, de façon inédite, quatre et parfois cinq générations, la mémoire est un lien transgénérationnel irremplaçable, comme elle est un lien entre les cultures et favorise la richesse des échanges entre les individus.

La mémoire est tournée vers le futur et vers les autres, elle est la source de la solidarité, et ce trésor précieux mérite une vraie place dans l'éducation, à l'école et bien au-delà.

Références bibliographiques

- Baddeley A., « The episodic buffer : A new component of working memory ? », *Trends in Cognitive Sciences*, 2000, 4 (11), p. 417-423.
- Craik F. I. M. et Lockhart R. S., « Levels of processing : A framework for memory research », *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 1972, 11 (6), p. 671-684.
- Dégeilh F., Guillery-Girard B., Dayan J., Gaubert M., Chételat G., Egler P. J., Baleyte J. M., Eustache F., Viard A., « Neural correlates of self and its interaction with memory in healthy adolescents », *Child Development*, 2015, 86 (6), p. 1966-1983.
- Eustache F. et Desgranges B., *Les Chemins de la mémoire*, Paris, Inserm-Le Pommier, 2012.
- Fivush R., « The development of autobiographical memory », *Annual Review of Psychology* 2011, 62, p. 559-582.
- Freud S., *Introduction à la psychanalyse*, Paris, Payot, 1921.
- Gathercole S. E., « The development of memory », *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 1998, 39 (1), p. 3-27.
- Guillery-Girard B., Martins S., Deshayes S., Hertz-Pannier L., Chiron C., Jambaqué I., Landeau B., Clochon P., Chételat G., Eustache F., « Developmental trajectories of associative memory from childhood to

- adulthood : A behavioral and neuroimaging study », *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 2013, 7, p. 126.
- Lebel C., Walker L., Leemans A., Phillips L., Beaulieu C., « Microstructural maturation of the human brain from childhood to adulthood », *NeuroImage*, 2008, 40 (3), p. 1044-1055.
- Mahy C. E., Moses L. J., Kliegel M., « The impact of age, ongoing task difficulty, and cue salience on preschoolers' prospective memory performance : The role of executive function », *Journal of Experimental Child Psychology*, 2014, 127, p. 52-64.
- Marcaggi G., Bon L., Eustache F., Guillery-Girard B., « La mémoire dans l'autisme : quarante ans après », *Revue de neuropsychologie*, 2010, 2, p. 310-319.
- Martins S., Guillery-Girard B., Jambaqué I., Dulac O., Eustache F., « How children suffering severe amnesic syndrome acquire new concepts ? », *Neuropsychologia*, 2006, 44, p. 2792-2805.
- Nelson K., Fivush R., « The emergence of autobiographical memory : A social cultural developmental theory », *Psychological Review*, 2004, 111 (2), p. 486-511.
- Pitel A. L., Beaunieux H., Guillery-Girard B., Witkowski T., La Sayette V. de, Viader F., Desgranges B., Eustache F., « How do Korsakoff patients learn new concepts ? », *Neuropsychologia*, 2009, 47, p. 879-886.
- Tamnes C. K., Østby Y., Walhovd K. B., Westlye L. T., Due-Tønnessen P., Fjell A. M., « Intellectual abilities and white matter microstructure in development : A diffusion tensor imaging study », *Human Brain Mapping*, 2010, 31 (10), p. 1609-1625.
- Vargha-Khadem F., Gadian D. G., Watkins K. E., Connelly A., Van Paesschen W. et Mishkin M., « Differential effects of early hippocampal pathology on episodic and semantic memory », *Science*, 1997, 277 (5324), p. 376-380.

Wimmer H., Perner J., « Beliefs about beliefs : Representation and constraining function of wrong beliefs in young children's understanding of deception », *Cognition*, 1983, 13 (1), p. 103-128.

Pour en savoir plus

Bauer P. et Fivush R., *The Wiley Handbook on the Development of Children's Memory*, Chichester, Wiley-Blackwell, 2014.

Eustache F., Faure S. et Desgranges B., *Manuel de neuropsychologie*, Paris, Dunod, 2013.

Eustache F. *et al.*, *Les Troubles de mémoire : prévenir et accompagner*, Paris, Le Pommier, 2015.

Lachaux J.-P., *Le Cerveau funambule. Comprendre et apprivoiser son attention grâce aux neurosciences*, Paris, Odile Jacob, 2015.

Toscani P., *Les Neurosciences au cœur de la classe*, Lyon, Chronique sociale, 2014.

Soprano A. M. et Narbona J., *La Mémoire de l'enfant. Développement normal et pathologique*, Issy-les-Moulineaux, Elsevier-Masson, 2009.

Remerciements

Les auteurs remercient Stanislas Dehaene pour sa confiance et ses conseils éclairés.

Nos remerciements vont également à nos collègues, Séverine Fraboulet et Mireille Denaveaut-Boulay, et aux pédagogues, Annie Bonnaire, Corinne Venin, Rachel Ebode et Odile Perin, pour leurs relectures constructives.

Les réflexions sur les pratiques éducatives que nous avons eues ces dernières années au sein du groupe de pilotage sur la mémoire à la direction départementale de l'Éducation nationale ont contribué à cet ouvrage. Nous en remercions tous les membres pour ce partage d'expérience passionnant.

TABLE

Titre

Copyright

Introduction

1 - Comprendre l'organisation et le fonctionnement de la mémoire humaine

La mémoire tout au long de la vie

La mémoire déclinée sous toutes ses formes

La mémoire et le cerveau

Une vision d'ensemble de la mémoire : MNESIS

2 - Le développement de la mémoire

Mémoire de travail et fonctions exécutives

Mémoire implicite et mémoire explicite : regards croisés

Mémoire sémantique

La mémoire épisodique sous l'angle de l'amnésie infantile

De la mémoire événementielle à la mémoire épisodique

La mémoire contextuelle

Les projections dans le futur

La mémoire prospective

La métacognition

3 - La mémoire dans le cerveau en développement

La maturation cérébrale

La maturation de la substance grise

La maturation de la substance blanche

La plasticité cérébrale

Les corrélats structuraux et fonctionnels du développement de la mémoire

4 - Les applications pédagogiques et éducatives

Préalable à l'apprentissage

Les stratégies de mémorisation

Les stratégies d'organisation

La répétition

Le sommeil

Les apprentissages et l'éducation

5 - Mémoire et pathologies de l'enfant

Accueillir les enfants avec des difficultés de mémoire

L'amnésie développementale (ou syndrome amnésique chez l'enfant)

L'épilepsie

Troubles neurodéveloppementaux

6 - Un nouveau monde de la mémoire pour l'enfant et pour l'adulte

Les acquis et les enjeux des recherches en neuropsychologie et en neurosciences cognitives

Développement et réserve cognitive

Un monde qui change : l'irruption du numérique

Réhabiliter la mémoire !

Références bibliographiques

Pour en savoir plus

Remerciements

Dans la même collection

DANS LA MÊME COLLECTION

Jérôme Deauvieu, Janine Reichstadt et Jean-Pierre Terrail, *Enseigner efficacement la lecture. Une enquête et ses implications*, 2015.

Jean-Michel Blanquer, *L'École de la vie*, 2014.

Hervé Glasel, *Une école sans échec. L'enfant en difficulté et les sciences cognitives*, 2013.

Stanislas Dehaene (sous la dir.), *Apprendre à lire. Des sciences cognitives à la salle de classe*, 2011.

Éditions Odile Jacob

Des idées qui font avancer les idées

Retrouvez tous nos livres disponibles en numérique
sur odilejacob.fr

Retrouvez-nous sur Facebook

Suivez-nous sur Twitter



LA NEUROÉDUCATION

LA MÉMOIRE AU CŒUR DES APPRENTISSAGES

La mémoire est un capital précieux qui évolue tout au long de la vie. Elle nécessite une éducation et un soin particulier lors des premières années et jusqu'à la fin de l'adolescence, quand les apprentissages sont nombreux.

Mais c'est un processus fragile : au cours de sa maturation, la mémoire peut être confrontée à des difficultés – pathologiques ou non, durables ou transitoires – qui ont des conséquences sur les processus d'apprentissage et des répercussions sur l'ensemble de la scolarité.

Nourri des recherches les plus récentes et illustré d'exemples concrets, ce livre propose des données nouvelles et une réflexion d'ensemble sur le développement de la mémoire chez l'enfant, afin de donner à ce dernier toutes les chances de réussir à l'école.

FRANCIS EUSTACHE est neuropsychologue et directeur d'études à l'École pratique des hautes études (EPHE). Il dirige depuis plus de dix ans l'unité de recherche de l'Inserm « Neuropsychologie et imagerie de la mémoire humaine » à l'université de Caen-Normandie. Il est président du conseil scientifique de l'Observatoire B2V des mémoires.

BÉRENGÈRE GUILLERY-GIRARD est neuropsychologue et maître de conférences à l'École pratique des hautes études (EPHE) et membre de l'unité de recherche de l'Inserm « Neuropsychologie et imagerie de la mémoire humaine » à l'université de Caen-Normandie.

zlibrary

Your gateway to knowledge and culture. Accessible for everyone.



z-library.se

singlelogin.re

go-to-zlibrary.se

single-login.ru



[Official Telegram channel](#)



[Z-Access](#)



<https://wikipedia.org/wiki/Z-Library>