

Le développement cognitif et cérébral de la mémoire : de l'enfance à l'âge adulte

Fanny Dégeilh^{1,2,3,4}, Francis Eustache^{1,2,3,4} et Bérengère Guillery-Girard^{1,2,3,4}

¹ Inserm, U1077, Caen, France

² Université de Caen Normandie, UMR-S1077, Caen, France

³ École Pratique des Hautes Études, UMR-S1077, Caen, France

⁴ Centre Hospitalier Universitaire, U1077, Caen, France

Auteur correspondant : Bérengère Guillery-Girard, berengere.guillery@unicaen.fr

Reçu le 14 novembre 2015

Résumé – Le développement cognitif repose en grande partie sur des phénomènes de maturation cérébrale. Cet article propose une revue des connaissances actuelles sur le neurodéveloppement de la mémoire. Nous décrirons tout d'abord le développement de la mémoire selon une approche multisystémique, de la mémoire procédurale à la mémoire autobiographique. Nous discuterons notamment comment la mise en place progressive d'autres fonctions cognitives, comme le langage, l'attention, les fonctions exécutives (inhibition, mise à jour et flexibilité), ou encore la métamémoire, participe au développement mnésique. Dans une seconde partie, nous présenterons comment les modifications structurales et fonctionnelles de deux régions cérébrales essentielles à la mémoire, l'hippocampe et le cortex préfrontal, sous-tendent le développement progressif de la mémoire tout au long de l'enfance et l'adolescence.

Mots clés : Mémoire / développement cognitif / maturation cérébrale / hippocampe / cortex préfrontal

Abstract – Cognitive and brain development of memory from infancy to early adulthood.

Cognitive and brain development are closely linked from infancy to adulthood. The purpose of this article is to review the current state of knowledge on behavioral and brain substrates of memory development. First, we will review cognitive development of different memory systems, from procedural to autobiographical memory. We will discuss how the development of other cognitive functions (language, attention, executive functions and metamemory) participates in memory development. Second, we will describe how structural and functional changes in two core brain regions of memory, i.e. the hippocampus and the prefrontal cortex, impact the protracted development of memory throughout childhood.

Key words: Memory / cognitive development / brain maturation / hippocampus / prefrontal cortex

1 Introduction

La mémoire est au cœur des apprentissages et, au-delà, est essentielle à la construction de l'individu. Elle est le fondement de son histoire, de son identité et assure le sentiment de continuité. Le terme « mémoire »

peut être abordé comme un concept multisystémique et, en ce sens, il ne fait pas référence à une fonction cognitive unitaire, mais à un ensemble de systèmes en partie indépendants et interactifs. La première distinction portait sur mémoire à court terme (ou aujourd'hui mémoire de travail) et mémoire à long terme,

distinction reposant sur la base du nombre d'informations pouvant être mémorisées et sur la durée de maintien en mémoire. Des modèles de mémoire à long terme ont été proposés comprenant un système d'action, la mémoire procédurale, mais aussi des systèmes de représentation mentale tels que les mémoires perceptives, sémantique, ou encore, la mémoire épisodique. Toutes ces formes de mémoire seront définies dans ce document.

Le modèle multisystémique de Tulving (1995), adapté par Eustache & Desgranges (2008, 2012), est utile dans le contexte développemental car il s'appuie notamment sur des données phylogénétiques mais aussi ontogénétiques (figure 1). Aussi, nous ferons référence à ce modèle pour décrire le développement des différents systèmes de mémoire : en partant de la mémoire procédurale jusqu'au système le plus élaboré, la mémoire épisodique, qui se met en place le plus tardivement chez l'enfant. Nous aborderons également le rôle d'autres fonctions cognitives comme le langage, l'attention, les fonctions exécutives (inhibition, mise à jour et flexibilité) ou encore la métamémoire dans le développement de ces systèmes de mémoire.

Ce développement de la mémoire repose en grande partie sur l'évolution structurale et fonctionnelle du cerveau qui mènera à la mise en place de réseaux neuronaux efficaces à l'âge adulte. La maturation cérébrale et le développement cognitif se produisent de concert. La mise en place et le perfectionnement d'une fonction cognitive coïncident avec la maturation de la ou des région(s) cérébrale(s) sous-tendant cette fonction (Casey *et al.*, 2000, 2005). Les neurosciences cognitives cherchent à comprendre comment les modifications anatomiques et physiologiques du cerveau avec l'âge sont liées à la maturation des habiletés cognitives. Aussi, dans une seconde partie, nous illustrerons le neurodéveloppement de la mémoire en nous focalisant sur deux régions clés de la mémoire, qui subissent des modifications structurales et fonctionnelles tout au long de l'enfance : l'hippocampe et le cortex frontal.

2 Le développement de la mémoire

Dès les premiers mois de vie, il est possible d'observer chez les enfants des comportements traduisant leurs capacités mnésiques. Par exemple, le temps de fixation visuelle d'un bébé sur un objet diminue lorsque cet objet est présenté de façon répétée. Cette diminution, caractéristique des paradigmes d'habituation, traduit le désintérêt du bébé pour un objet déjà vu et dont il garde une trace en mémoire. Il existe également d'autres paradigmes de psychologie expérimentale qui permettent de mettre en évidence d'autres compétences mnésiques, ce que nous détaillerons dans les paragraphes ci-dessous.

2.1 Développement de la mémoire de travail

La mémoire de travail est un espace de stockage à court terme et de manipulation d'une petite quantité d'informations. Elle est impliquée dans de nombreux comportements et apprentissages (par exemple, pour effectuer un calcul mental). Elle intervient notamment dans la lecture, l'écriture, les mathématiques (Monette *et al.*, 2011).

Baddeley (2000) propose un modèle de la mémoire de travail composé de quatre sous-systèmes : un administrateur central qui coordonne l'activité des systèmes satellites que sont la boucle phonologique, le calepin visuo-spatial et le *buffer* épisodique. La boucle phonologique est constituée d'un stock phonologique passif et d'un système de récapitulation actif (répétition subvocale). Elle 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. Le calepin visuo-spatial, décrit par analogie à la boucle phonologique, est composé également d'un système de stockage et d'un système de récapitulation. Le calepin 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. Le *buffer* épisodique soutient la création de traces multimodales, c'est un espace tampon entre la mémoire de travail et la mémoire épisodique (décrite plus loin). En ce sens, il est indispensable à l'encodage et à la restitution de souvenirs épisodiques. Enfin, le système superviseur ou administrateur central renvoie également au concept de fonctions exécutives. Il coordonne les trois systèmes satellites, focalise l'attention, change le foyer attentionnel, active les représentations en mémoire à long terme, contrôle la planification et les stratégies de récupération.

Une augmentation des performances de mémoire de travail est observée jusqu'à environ 15 ans (Lee *et al.*, 2013). L'organisation décrite par Baddeley (boucle phonologique, calepin visuo-spatial et *buffer* épisodique) est retrouvée dès l'âge de 6 ans. Le développement des capacités de stockage passif, dans la boucle phonologique et le calepin visuo-spatial, s'observerait principalement jusqu'à 8 ans avec une évolution plus modérée jusqu'à 12 ans (Gathercole, 1998). Par exemple, l'empan auditivo-verbal, qui se définit par le nombre d'unités verbales (chiffres, lettres...) que nous pouvons maintenir en mémoire, augmente entre 3 et 13 ans passant de 2 à 7 items (performances de l'adulte). Concernant le calepin visuo-spatial, il semble que la mémorisation de localisations

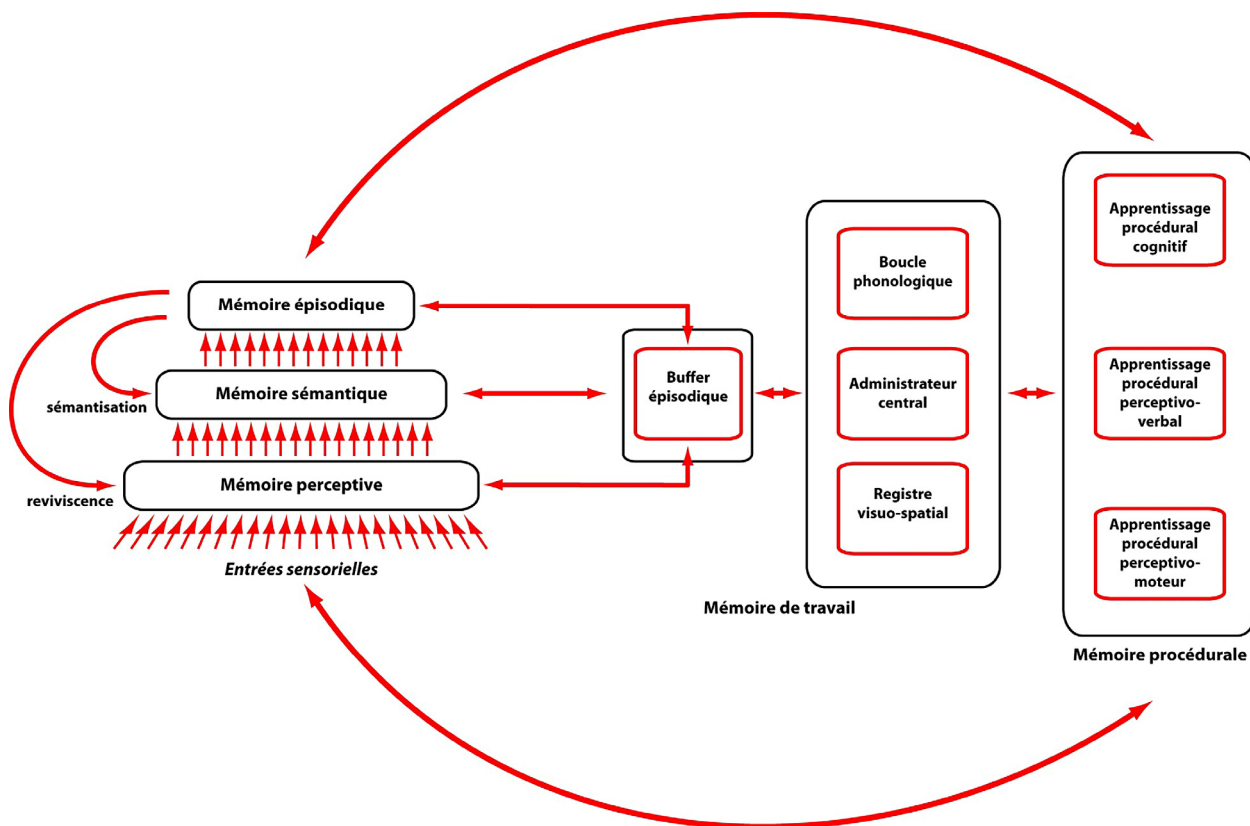


Fig. 1. Modèle NéoStructural InterSystémique de F. Eustache et B. Desgranges dans « Les Chemins de la mémoire », Le Pommier, 2012. © Inserm U1077.

spatiales émerge vers l'âge de 6 mois. L'empan visuo-spatial, c'est-à-dire le nombre de localisations spatiales que nous pouvons maintenir en mémoire, atteint le niveau adulte vers 11 ans. En revanche, les capacités de manipulation, mises en évidence dans des tâches qui nécessitent de réorganiser le matériel tel qu'une suite de chiffres à redonner dans l'ordre inverse, évoluent encore jusqu'à la deuxième partie de l'adolescence. Enfin, même si de récents travaux mettent en évidence l'existence de capacités associatives dès 6 mois (Oakes *et al.*, 2011; Ross-Sheehy *et al.*, 2011), le *buffer* épisodique suit une trajectoire développementale continue jusqu'à l'âge adulte (Wang *et al.*, 2015).

Les fonctions exécutives, regroupant notamment les processus d'inhibition, de mise à jour et de flexibilité, sont particulièrement sollicitées par la mémoire de travail. Comme la mémoire de travail, la maturation des fonctions exécutives est progressive tout au long de l'adolescence. L'inhibition se traduit par la capacité à supprimer, ou à mettre à l'arrière-plan, les informations qui ne sont pas pertinentes pour réaliser une tâche en cours. 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. Enfin, la mise à jour implique de modifier le contenu de la mémoire de travail en tenant compte de l'information entrante plus récente. Ces trois composantes semblent encore indifférenciées à l'âge de 3 ans et deviennent très progressivement indépendantes. 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. Ce n'est qu'au milieu de l'adolescence que ces fonctions pourront être sollicitées séparément pour un fonctionnement optimal.

2.2 Développement de la mémoire procédurale et des mémoires perceptives

La mémoire procédurale est le système de stockage des règles de fonctionnement permettant la mémorisation des savoir-faire. Elle est constituée d'automatismes sensorimoteurs qui sont récupérés de façon inconsciente et non verbalisable lors d'actions (faire du vélo) ou de procédures cognitives complexes (résoudre

une équation). Ainsi, la mémoire procédurale est le socle du développement des fonctions cognitives et des apprentissages. La mise en place de la mémoire procédurale est précoce. Elle est efficace dès les premiers mois du bébé et son développement est rapide entre 0 et 3 ans.

Le paradigme de conditionnement opérant, qui consiste en l'acquisition de la relation entre un comportement et sa conséquence dans l'environnement, est utilisé pour étudier la mémoire procédurale chez le bébé. Ce paradigme est mis en jeu, par exemple, dans la tâche du mobile (Rovee-Collier *et al.*, 1980). Dans cette tâche, le pied du bébé est attaché à un mobile par une ficelle; ainsi, l'enfant va apprendre que le mouvement de son pied entraîne le mouvement du mobile. Pour tester la mémorisation de l'association, le mobile est présenté à nouveau à l'enfant avec un délai variable après la phase d'apprentissage. Il a ainsi été mis en évidence que, dès 2 mois, les nourrissons sont capables d'apprendre cette procédure et de s'en souvenir après un délai de 24 h. À 3 mois, le délai de rétention de cet apprentissage est de plusieurs semaines. La mémoire procédurale continue à évoluer avec l'âge en lien avec d'autres fonctions cognitives, permettant à l'enfant de réaliser des procédures de plus en plus complexes.

De la même façon les mémoires perceptives, mobilisées généralement de façon automatique et liées aux différentes modalités sensorielles, se mettent en place très tôt chez le bébé. Elles constituent les fondations de compétences plus complexes, telles que le langage, et interviennent dans la formation de représentations mnésiques élaborées comme les concepts. Même si elles émergent précocement, les capacités perceptives vont continuer à se développer tout au long de l'enfance et avoir un impact sur le fonctionnement mnésique, sémantique mais aussi épisodique permettant de créer des représentations mnésiques de plus en plus détaillées.

2.3 Développement de la mémoire sémantique

La mémoire sémantique regroupe l'ensemble des connaissances que nous avons sur le monde. L'état de conscience noétique accompagne le rappel en mémoire sémantique et permet d'accéder à l'ensemble des connaissances générales sans se souvenir du contexte dans lequel elles ont été encodées (« je sais »). La mémoire sémantique est centrale dans le fonctionnement cognitif, elle est essentielle à la mémoire autobiographique et fondamentale pour la production et la compréhension du langage.

Le développement des connaissances sémantiques repose en grande partie sur un traitement perceptif chez le jeune enfant. Deux périodes peuvent être distinguées : les périodes préverbale et verbale. Lors

de la période préverbale, le bébé détaille progressivement ses connaissances, de la catégorie aux exemplaires. Dès l'âge de 7 mois, le nourrisson est capable de différencier des catégories telles que les animaux et les véhicules. Vers l'âge de 8 mois, la conscience noétique se met en place. L'enfant devient progressivement conscient de son environnement et est capable de créer et manipuler des représentations mentales d'objets sans qu'ils soient présents autour de lui. À partir de 16 mois environ, l'enfant est capable de généraliser ses connaissances et de faire des inférences.

Langage et mémoire sémantique sont intimement imbriqués et se développent de concert. La mémoire sémantique est associée à la constitution des réseaux lexico-sémantiques qui permettent le stockage et la récupération des mots avec leur signification. Le langage ou la verbalisation dans les interactions sociales favorise l'intégration des connaissances mais aussi structure les souvenirs autobiographiques.

2.4 Développement de la mémoire épisodique

La mémoire épisodique est la capacité d'encoder, stocker et de récupérer les souvenirs conscients d'événements personnellement vécus, situés dans leur contexte spatial et temporel d'acquisition (Tulving, 1984). Elle offre à l'individu la capacité de « voyager mentalement dans le temps », de revivre mentalement les expériences passées mais aussi de se projeter dans l'avenir (Tulving, 2002). La conscience auto-noétique, associée au rappel des souvenirs épisodiques, donne à l'individu la possibilité de prendre conscience de sa propre identité (sentiment d'identité) dans un temps subjectif et lui permet la reviviscence consciente de l'événement et du contexte d'encodage (lui permettant de dire « je me souviens »).

Vers 18 mois, la conscience de soi se met en place. Par exemple, l'enfant commence à reconnaître son reflet dans le miroir comme étant le sien. Avec l'apparition du langage, entre 2 et 4 ans, l'enfant commence à rapporter des événements personnellement vécus, mais ces souvenirs sont encore décontextualisés. Il ne rappelle généralement pas la source de son souvenir (comment il a appris ce qu'il sait) qui est la marque d'un souvenir épisodique. Ce n'est que vers 5 ans que la mémoire épisodique se met en place. La capacité à rappeler des souvenirs épisodiques riches et élaborés connaît un développement important durant la seconde partie de l'enfance (Brainerd *et al.*, 2004; Ghetti & Angelini, 2008). Ce développement se traduit dans des tâches de laboratoire par une reconnaissance d'items isolés assez précoce contrastant avec l'apparition plus tardive de la capacité de mémoriser des associations comme une liste d'objets associés à la couleur de l'arrière-plan de présentation (Piolino

et al., 2007; DeMaster & Ghetti, 2013). Le type d'association est également un facteur important. Les paradigmes impliquant des associations spatiales ou temporelles mettent en avant une évolution différente des performances en fonction du type d'association (Picard *et al.*, 2012; Guillery-Girard *et al.*, 2013) : les performances de restitution d'associations intradomaines (deux photos ou deux dessins) plafonnent très rapidement avant 10 ans alors que les associations spatiales progressent de façon linéaire et les associations temporelles évoluent de façon plus tardive avec une amélioration marquée entre 9 et 10 ans.

D'autres tâches visent à évaluer le type d'expérience subjective qui accompagne la restitution du souvenir, un sentiment soit de familiarité soit de recollection (Ghetti & Angelini, 2008). La familiarité (reconnaissance sans rappel du contexte, c'est-à-dire « je sais que j'ai vu l'item mais je n'ai pas de détails sur le moment où je l'ai vu ») et la recollection (rappel du souvenir dans son contexte, « je me souviens d'avoir vu cet item et il était placé en début de liste ») sont dissociables vers 5 ans (Riggins, 2014). Le sentiment de familiarité augmente remarquablement entre 2 et 6 ans puis se stabiliserait vers l'âge de 8 ans (Billingsley *et al.*, 2002; Piolino *et al.*, 2007; Ghetti & Angelini, 2008). En revanche, le sentiment de recollection, sous-tendu par la capacité de se remémorer le contexte d'encodage, suit un développement lent jusqu'à l'âge adulte (Ghetti & Angelini, 2008).

Le développement des processus métacognitifs, y compris de la métamémoire, semble jouer un rôle important dans l'augmentation des performances de mémoire épisodique. En effet, la capacité à réfléchir sur son propre fonctionnement et à adapter ses stratégies mnésiques en fonction de la situation évolue encore tardivement au cours de l'adolescence. Ainsi, la meilleure utilisation de stratégies mnémiques au cours du développement de l'enfant participerait à l'amélioration des capacités de stockage et de récupération de l'information. Progressivement, les enfants présentent une meilleure capacité à aller rechercher l'information en mémoire de façon volontaire (Paz-Alonso *et al.*, 2009).

2.5 Développement de la mémoire autobiographique

La mémoire autobiographique regroupe un ensemble de connaissances 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. Elle est constituée d'une composante épisodique (souvenirs épisodiques autobiographiques) et d'une composante sémantique autobiographique (ensemble de connaissances générales sur soi et

sur sa propre vie permettant la représentation de soi). L'interaction des deux composantes de la mémoire autobiographique permet le maintien de la cohérence du sentiment d'identité et de la représentation de soi au fil du temps de telle façon que les souvenirs restent en accord avec les aspirations, buts, désirs et croyances actuels de l'individu (Conway, 2005). Les souvenirs épisodiques autobiographiques seraient une sélection parmi les nombreux souvenirs épisodiques formés chaque jour. Seuls les souvenirs suffisamment constitutifs de la représentation actuelle de soi seraient maintenus en mémoire (Conway & Pleydell-Pearce, 2000).

Certains travaux se sont penchés sur les souvenirs d'enfance rappelés par des adultes pour étudier le développement de la mémoire autobiographique (Bruce *et al.*, 2000; Newcombe *et al.*, 2007). Les résultats de ces travaux montrent qu'il est extrêmement rare que les adultes rapportent des souvenirs d'événements s'étant déroulés durant les deux premières années de vie. Généralement, les souvenirs les plus lointains correspondent à l'âge de 3 ans. Ainsi, il a été proposé que la difficulté à rappeler des souvenirs des premières années de vie puissent correspondre à deux périodes développementales : l'amnésie infantile (absolue) avant 2 ans se traduisant par une absence complète de souvenirs datant des deux premières années de vie et l'amnésie de l'enfance (relative) de 2 à 5 ans, les souvenirs de cette période sont peu nombreux mais augmentent graduellement jusqu'à 5 ans (Hayne & Jack, 2011). Selon ces travaux, un fonctionnement de la mémoire autobiographique relativement semblable à celui de l'adulte apparaîtrait vers l'âge de 7 ans.

Les composantes épisodique et sémantique de la mémoire autobiographique semblent se mettre en place à un âge différent avec une trajectoire développementale plus longue et plus tardive pour la composante épisodique (Piolino *et al.*, 2007; Picard *et al.*, 2012; Willoughby *et al.*, 2012). Le développement de la mémoire épisodique autobiographique avec l'âge est dépendant de la mise en place de la mémoire sémantique autobiographique, ainsi que de l'amélioration des capacités de mémoire épisodique et des fonctions exécutives (Picard *et al.*, 2012). Ainsi, la mémoire autobiographique se développerait selon un modèle hiérarchique (Mishkin *et al.*, 1997) avec le développement premier et plus rapide de la composante sémantique fournissant un fondement au développement plus tardif et plus lent de la composante épisodique.

Howe & Courage (1993, 1997) proposent que l'émergence de la mémoire épisodique autobiographique et la fin de la période d'amnésie infantile correspondent au développement de la conscience de soi et à l'acquisition des premières connaissances de soi

durant les premières années de vie. Le développement de la conscience de soi permet aux enfants de reconnaître que le soi est continu dans le temps, ainsi que d'organiser et d'intégrer les événements passés comme personnellement vécus. Ainsi, le développement de la conscience de soi semble être un préalable important pour l'émergence de la mémoire épisodique autobiographique chez l'enfant. La maturation cérébrale est un autre facteur conditionnant le développement de la mémoire.

3 La maturation cérébrale

Dès les années 1990, les premières études de neuroimagerie développementale décrivent le profil général des modifications structurales du cerveau au cours de l'enfance et de l'adolescence (pour revue, Casey *et al.*, 2000) : (1) le volume cérébral total atteint 90 % de sa taille maximale vers l'âge de 5 ans (Giedd *et al.*, 1996; Reiss *et al.*, 1996), (2) le volume de substance grise augmente chez l'enfant puis diminue au cours de l'adolescence (Jernigan *et al.*, 1991; Giedd *et al.*, 1996; Reiss *et al.*, 1996) alors que (3) le volume de substance blanche augmente jusqu'à l'âge adulte (Jernigan *et al.*, 1991; Pfefferbaum *et al.*, 1994; Giedd *et al.*, 1996; Reiss *et al.*, 1996).

3.1 Substance grise

Le volume de substance grise augmente chez le jeune enfant puis diminue après la puberté suivant un profil en U-inversé (Jernigan *et al.*, 1991; Wilke *et al.*, 2007; Shaw *et al.*, 2008). Le profil de maturation varie en fonction des régions cérébrales (figure 2). La maturation corticale semble progresser de l'arrière vers l'avant du cerveau. Avec l'âge, on observe une décélération de la diminution du volume de substance grise dans les régions corticales postérieures et une accélération dans les régions frontales (Tamnes *et al.*, 2013). La diminution du volume de substance grise apparaît en premier au niveau du cortex sensori-moteur primaire, puis dans les aires secondaires et enfin dans les aires associatives polymodales (Gogtay *et al.*, 2004; Sowell *et al.*, 2004).

Les modifications du volume de substance grise au cours du développement reflèteraient, en partie, la prolifération synaptique première suivie de l'élagage synaptique (Pfefferbaum *et al.*, 1994). La prolifération synaptique correspond à la formation importante de connexions synaptiques (synaptogenèse) qui a commencé avant la naissance et qui continue durant les premières années de vie (Changeux & Danchin, 1976). Cette phase aboutit à un excès de synapses qui est éliminé lors de l'élagage synaptique qui suit.

Ce phénomène de régulation neurologique permet la sélection des synapses en grande partie sur la base de leur fonctionnement : les connexions neuronales sous-utilisées sont supprimées alors que les connexions neuronales actives sont renforcées (Huttenlocher, 1979). Cela permet le traitement plus efficace et complexe de l'information et participe à la mise en place de réseaux fonctionnels par la réorganisation de connexions inter-régionales.

3.2 Substance blanche

Contrairement à la substance grise, le volume de substance blanche augmente linéairement tout au long du développement jusqu'à l'âge adulte (Reiss *et al.*, 1996; Giedd *et al.*, 1999; Gogtay *et al.*, 2004; Sowell *et al.*, 2004; Lenroot *et al.*, 2007). De façon similaire à la substance grise, le développement des fibres de substance blanche est plus tardif dans les régions frontales que dans les régions postérieures (Lenroot *et al.*, 2007; Lebel *et al.*, 2008; Mabbott *et al.*, 2009, figure 2).

L'augmentation du volume de substance blanche serait principalement le reflet de la myélinisation neuronale et de la croissance axonale. Le processus de myélinisation correspond à la création d'une gaine de myéline autour des axones, augmentant la conductance des axones et donc la vitesse de transmission des signaux électriques véhiculés. Ce processus démarre au cours de la vie intra-utérine et se poursuit jusqu'à l'âge adulte (Yakovlev & Lecours, 1967). La progression postéro-antérieure de la myélinisation au cours du développement semble parallèle à la mise en place des fonctions sensorielles puis des fonctions motrices et enfin des fonctions intégratives complexes. Cela laisse supposer que l'amélioration de la conductance axonale par la myélinisation permettrait un traitement plus efficace et optimal de l'information qui participerait au développement cognitif de l'enfant.

3.3 Développement des réseaux fonctionnels

Au cours du développement, les connections courtes (proximales) tendent à disparaître alors que les connections longues (distales) sont renforcées (Fair *et al.*, 2007, 2009). Le traitement local de l'information, observé chez le jeune enfant, progresse vers un traitement intégratif mettant en jeu des régions cérébrales éloignées (Supekar *et al.*, 2009).

Le nombre de régions recrutées au cours d'une tâche diminue avec l'âge de façon à n'activer que les régions spécifiques à la tâche (Casey *et al.*, 2008). Les régions dont l'activité ne corrèle pas avec les performances sont de moins en moins recrutées avec l'âge. Il est aussi possible d'observer l'activation de la même structure lors de deux tâches cognitives différentes

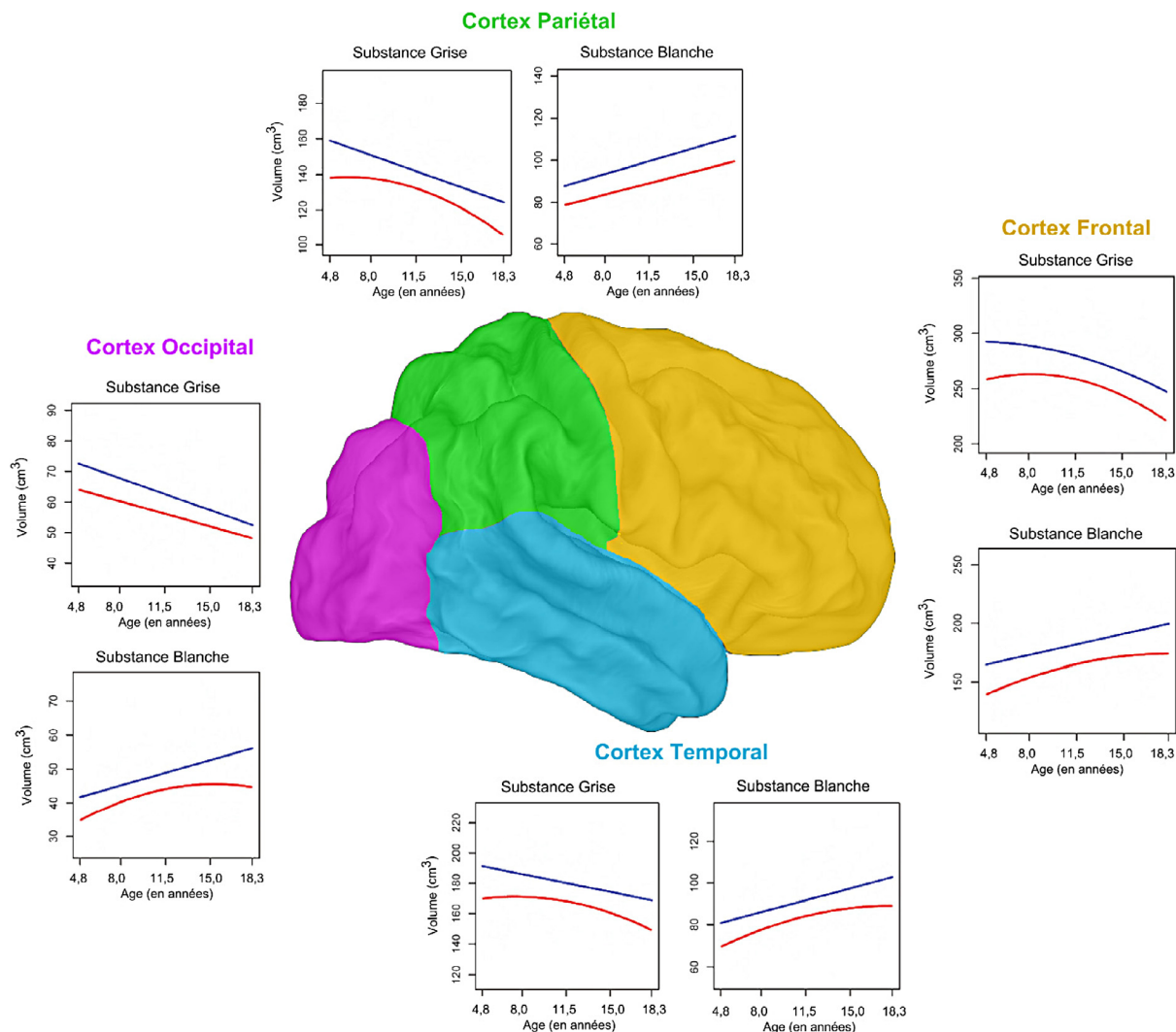


Fig. 2. Évolution des volumes de substance grise et de substance blanche chez les garçons (courbes bleues) et les filles (courbes rouges) de 4 à 18 ans (inspiré de *Brain Development Cooperative Group*, 2012).

chez l'enfant le plus jeune, alors que cette région n'est recrutée que pour l'un des deux processus chez l'enfant le plus âgé (voir par exemple Dégeilh *et al.*, 2015). Ces phénomènes illustrent la spécialisation fonctionnelle des régions cérébrales avec l'âge.

4 Hippocampe et cortex préfrontal : substrats cérébraux du développement mnésique

Les études neurodéveloppementales utilisent les techniques d'imagerie cérébrale pour explorer le lien entre maturation cérébrale (structurale et fonctionnelle) et développement cognitif. L'analyse de corrélations entre performances mnésiques et mesures structu-

rales (le volume de substance grise par exemple) renseigne sur les régions cérébrales dont les modifications structurales sous-tendent le développement du type de mémoire étudié. Par exemple, Sowell *et al.* (2003) montrent une association entre la maturation structurale du cortex préfrontal et le développement de la mémoire. En revanche, l'imagerie fonctionnelle d'activation, qui consiste à enregistrer l'activité cérébrale pendant la réalisation d'une tâche cognitive, permet d'identifier les régions cérébrales donc l'activité évolue au cours du développement pour une fonction cognitive particulière.

L'hippocampe et le cortex frontal sont des régions clés de la mémoire et leur maturation semble particulièrement impliquée dans la mise en place de la mémoire de travail, de la mémoire épisodique et de la mémoire autobiographique. L'hippocampe mature

rapidement pendant les deux premières années alors que le cortex préfrontal mature progressivement tout au long de l'enfance et de l'adolescence. En parallèle, les fonctions mnésiques dépendantes des régions frontales se développeraient plus lentement que les fonctions hippocampo-dépendantes. Ainsi les trajectoires développementales de ces composantes de la mémoire seraient dissociables : (i) la composante stratégique de la mémoire, dépendante des régions frontales, suivrait une maturation prolongée alors que (ii) la composante associative impliquant les hippocampes serait mature plus tôt (Shing *et al.*, 2008, 2010).

4.1 L'hippocampe

L'hippocampe, structure du lobe temporal médian, joue un rôle essentiel dans la formation, la consolidation et le rappel des souvenirs épisodiques (Squire, 1992). Les études lésionnelles montrent que les patients dont l'hippocampe est endommagé présentent un déficit de mémoire épisodique épargnant en grande partie la mémoire sémantique (Tulving & Markowitsch, 1998 ; Maguire, 2001 ; Addis & Schacter, 2008).

La maturation de l'hippocampe est rapide pendant les deux premières années puis ralentit et se poursuit lentement tout au long de l'adolescence (Utsunomiya *et al.*, 1999). Cette maturation semble coïncider avec la mise en place de la mémoire relationnelle, rapide entre 0 et 2 ans puis plus lente durant les quatre années suivantes (Olson & Newcombe, 2013). L'amnésie infantile, relative aux deux premières années de vie, est associée à l'immaturité de l'hippocampe à cet âge qui entraînerait un défaut d'encodage et de stockage des détails associés à un événement spécifique (Bauer, 2006 ; Newcombe *et al.*, 2007).

Entre 4 et 25 ans, le volume de la partie antérieure de l'hippocampe diminue alors que celui de l'hippocampe postérieur augmente (Gogtay *et al.*, 2006 ; Insausti *et al.*, 2010), ce qui aura un impact sur le développement de la mémoire épisodique (Paz-Alonso *et al.*, 2008 ; Ghetti & Bunge, 2012). Les études en IRM fonctionnelle apportent des données complémentaires sur le rôle de cet axe antéro-postérieur sur le développement de la mémoire épisodique, suggérant que l'hippocampe antérieur devient fonctionnellement spécifique pour l'encodage et le rappel en mémoire épisodique au début de l'adolescence. Chez les adultes et les enfants de 14 ans, l'hippocampe antérieur est spécifiquement associé à l'encodage en mémoire épisodique : son activité prédit la récollection des items. Chez les enfants de 8 ans, l'activité de l'hippocampe antérieur prédit la reconnaissance ultérieure des items mais pas leur récollection (Ghetti *et al.*, 2010). Concernant le rappel de souve-

nirs épisodiques, il est associé à l'activation de l'hippocampe antérieur chez les adultes et à l'activation de l'hippocampe postérieur chez les enfants de 8 à 11 ans (DeMaster & Ghetti, 2013). La partie antérieure de l'hippocampe sous-tendrait l'encodage et le rappel des représentations flexibles de l'événement alors que l'hippocampe postérieur serait impliqué dans la création et la récupération d'une représentation perceptive plus stricte de l'événement (Giovanello *et al.*, 2009). Cela concorde avec les observations comportementales montrant que le rappel épisodique des enfants est moins flexible que celui des adultes et plus dépendant de la répétition exacte de l'événement et de son contexte d'encodage.

4.2 Le cortex préfrontal

Le cortex préfrontal latéral est une région essentielle à la mémoire de travail. Plus précisément, le cortex préfrontal ventro-latéral est engagé lors du maintien de l'information et le cortex préfrontal dorso-latéral est recruté lors de sa manipulation (D'Esposito *et al.*, 1999).

La fin de l'enfance (10–12 ans) est une période critique pour le développement des capacités de planification, de flexibilité et de mémoire de travail. Cette période coïncide avec le pic d'augmentation de l'épaisseur et du volume du cortex préfrontal latéral (Sowell *et al.*, 2001 ; Lenroot & Giedd, 2006).

Dès l'âge de 8 ans, les régions préfrontales sont engagées lors de tâches de mémoire de travail (Casey *et al.*, 1995). Cependant, à cet âge, l'activation est inférieure à celle observée chez l'adulte et continue d'augmenter tout au long du développement. Les capacités de contrôle et de manipulation de l'information augmentent pendant la deuxième moitié de l'enfance (Gathercole *et al.*, 2004) et cette évolution est associée au recrutement plus important et plus sélectif du cortex préfrontal, particulièrement du cortex préfrontal dorso-latéral (Crone *et al.*, 2006).

Le développement de la mémoire de travail s'accompagne d'un désengagement des régions postérieures au profit d'une augmentation du recrutement de régions antérieures plus efficaces pour traiter l'information. Une étude longitudinale chez l'adolescent montre que le réseau impliqué dans la mémoire de travail devient de plus en plus spécialisé avec l'âge : au début de l'adolescence, les participants recrutaient à la fois le cortex préfrontal latéral et l'hippocampe pour réaliser une tâche de mémoire de travail alors que, trois ans plus tard, ils recrutaient uniquement le cortex préfrontal latéral (Finn *et al.*, 2010).

Les régions préfrontales sont également impliquées dans la mémoire épisodique et leur maturation semble jouer un rôle dans le développement de ce système

mnésique. En effet, l'encodage de l'information qui sera ensuite correctement rappelée est associé à l'activation des régions du cortex préfrontal chez l'adulte (Brewer *et al.*, 1998) comme chez l'enfant (Ofen *et al.*, 2007; Ghetti *et al.*, 2010; Ofen, 2012). Au cours du développement, le cortex préfrontal est de plus en plus recruté lors de tâches de mémoire épisodique (Ofen *et al.*, 2007). Le cortex préfrontal joue également un rôle critique dans la mémorisation des aspects contextuels (rappel de la source) associés au souvenir épisodique (Janowsky *et al.*, 1989). L'activation du cortex préfrontal corrèle également avec l'augmentation des performances de recollection des détails d'un souvenir, mesurées par une tâche de rappel de la source, entre les âges de 8 et 24 ans (Ofen *et al.*, 2007).

La maturation lente de la connectivité entre les régions sous-tendant la mémoire épisodique conditionne son développement. Par exemple, le faisceau unciné reliant l'hippocampe antérieur et le cortex préfrontal achève sa maturation après 25 ans (Lebel *et al.*, 2008; Lebel & Beaulieu, 2011). Mabbott *et al.* (2009) ont montré que cette maturation était corrélée à de meilleures performances en mémoire épisodique.

5 Conclusion

Le développement de la mémoire semble se produire en partie de façon hiérarchique, d'un système mnésique d'action, qui est la mémoire procédurale, vers le système de représentation mentale le plus complexe, la mémoire épisodique. Ainsi, la mise en place plus précoce des processus et des systèmes mnésiques les plus élémentaires servirait de socle au développement des systèmes plus complexes.

Le cerveau connaît une maturation importante et progressive tout au long des vingt premières années de vie. La maturation se traduit par des modifications de la structure et du fonctionnement du cerveau progressant des régions sensori-motrices primaires vers les aires associatives polymodales. Maturation cérébrale et développement cognitif évoluent de concert et le perfectionnement d'une fonction cognitive coïncide souvent avec la maturation de la ou des régions cérébrales impliquées dans cette fonction. Il en est ainsi pour l'hippocampe et le cortex préfrontal dont la maturation semble essentielle au développement des fonctions mnésiques, notamment de la mémoire épisodique.

Mieux comprendre le développement de la mémoire, tant d'un point de vue comportemental que cérébral, est essentiel pour appréhender les apprentissages ainsi que les troubles mnésiques chez l'enfant. Cette approche neuro-développementale contribue à soutenir l'évolution des compétences mnésiques avec des méthodes pédagogiques adaptées.

Bien que dans cette revue nous ayons souvent précisé l'âge auquel telle ou telle compétence mnésique émerge, il est important de rappeler que ces âges sont indicatifs et correspondent à un âge moyen. Chaque enfant a un développement singulier et mieux comprendre cette variabilité interindividuelle sera un des enjeux majeurs de ces prochaines années de recherche afin de s'adapter à chaque enfant mais aussi de pouvoir repérer le plus précocement possible des anomalies de développement nécessitant une prise en charge.

Références

- Addis, D.R., and Schacter, D.L. (2008). Constructive episodic simulation: temporal distance and detail of past and future events modulate hippocampal engagement. *Hippocampus*, 18, 227–237.
- Baddeley, A. (2000). The episodic buffer: A new component of working memory? *Trends Cogn Sci*, 4, 417–423.
- Bauer, P.J. (2006). Constructing a past in infancy: a neurodevelopmental account. *Trends Cogn Sci*, 10, 175–181.
- Billingsley, R.L., Smith, M. Lou, and McAndrews, M.P. (2002). Developmental patterns in priming and familiarity in explicit recollection. *J Exp Child Psychol*, 82, 251–277.
- Brain Development Cooperative Group (2012). Total and Regional Brain Volumes in a Population-Based Normative Sample from 4 to 18 Years: The NIH MRI Study of Normal Brain Development. *Cereb Cortex*, 22, 1–12.
- Brainerd, C.J., Holliday, R.E., and Reyna, V.F. (2004). Behavioral measurement of remembering phenomenologies: So simple a child can do it. *Child Dev*, 75, 505–522.
- Brewer, J.B., Zhao, Z., Desmond, J.E., Glover, G.H., and Gabrieli, J.D. (1998). Making memories: brain activity that predicts how well visual experience will be remembered. *Science*, 281, 1185–1187.
- Bruce, D., Dolan, A., and Phillips-Grant, K. (2000). On the transition from childhood amnesia to the recall of personal memories. *Psychol Sci J Am Psychol Soc*, 11, 360–364.
- Casey, B.J., Cohen, J.D., Jezzard, P., Turner, R., Noll, D.C., Trainor, R.J., Giedd, J., Kaysen, D., Hertz-Pannier, L., and Rapoport, J.L. (1995). Activation of prefrontal cortex in children during a nonspatial working memory task with functional MRI. *Neuroimage*, 2, 221–229.
- Casey, B.J., Giedd, J.N., and Thomas, K.M. (2000). Structural and functional brain development and its relation to cognitive development. *Biol Psychol*, 54, 241–257.
- Casey, B.J., Galvan, A., and Hare, T.A. (2005). Changes in cerebral functional organization during cognitive development. *Curr Opin Neurobiol*, 15, 239–244.
- Casey, B.J., Getz, S., and Galvan, A. (2008). The adolescent brain. *Dev Rev*, 28, 62–77.

- Changeux, J.-P., and Danchin, A. (1976). Selective stabilisation of developing synapses as a mechanism for the specification of neuronal networks. *Nature*, 264, 705–712.
- Conway, M.A. (2005). Memory and the self. *J Mem Lang*, 53, 594–628.
- Conway, M.A., and Pleydell-Pearce, C.W. (2000). The construction of autobiographical memories in the self-memory system. *Psychol Rev*, 107, 261–288.
- Crone, E. a, Wendelken, C., Donohue, S., van Leijenhorst, L., and Bunge, S.A. (2006). Neurocognitive development of the ability to manipulate information in working memory. *Proc Natl Acad Sci USA*, 103, 9315–9320.
- D’Esposito, M., Postle, B.R., Ballard, D., and Lease, J. (1999). Maintenance versus manipulation of information held in working memory: an event-related fMRI study. *Brain Cogn*, 41, 66–86.
- Dégeilh, F., Guillery-Girard, B., Dayan, J., Gaubert, M., Chételat, G., Egler, P.-J., Baleyte, J.-M., Eustache, F., and Viard, A. (2015). Neural Correlates of Self and Its Interaction With Memory in Healthy Adolescents. *Child Dev*, In press
- DeMaster, D.M., and Ghetti, S. (2013). Developmental differences in hippocampal and cortical contributions to episodic retrieval. *Cortex*, 49, 1482–1493.
- Eustache, F., and Desgranges, B. (2008). MNESIS: towards the integration of current multisystem models of memory. *Neuropsychol Rev*, 18, 53–69.
- Eustache, F., and Desgranges, B. (2012). Les Chemins de la mémoire (Le Pommier).
- Fair, D.A., Dosenbach, N.U.F., Church, J.A., Cohen, A.L., Brahmbhatt, S., Miezin, F.M., Barch, D.M., Raichle, M.E., Petersen, S.E., and Schlaggar, B.L. (2007). Development of distinct control networks through segregation and integration. *Proc Natl Acad Sci USA*, 104, 13507–13512.
- Fair, D.A., Cohen, A.L., Power, J.D., Dosenbach, N.U.F., Church, J.A., Miezin, F.M., Schlaggar, B.L., and Petersen, S.E. (2009). Functional brain networks develop from a “local to distributed” organization. *PLoS Comput Biol*, 5, e1000381.
- Finn, A.S., Sheridan, M.A., Kam, C.L.H., Hinshaw, S., and D’Esposito, M. (2010). Longitudinal evidence for functional specialization of the neural circuit supporting working memory in the human brain. *J Neurosci*, 30, 11062–11067.
- Gathercole, S.E. (1998). The development of memory. *J Child Psychol Psychiatry*, 39, 3–27.
- Gathercole, S.E., Pickering, S.J., Ambridge, B., and Wearing, H. (2004). The structure of working memory from 4 to 15 years of age. *Dev Psychol*, 40, 177–190.
- Ghetti, S., and Angelini, L. (2008). The Development of Recollection and Familiarity in Childhood and Adolescence: Evidence From the Dual-Process Signal Detection Model. *Child Dev*, 79, 339–358.
- Ghetti, S., and Bunge, S.A. (2012). Neural changes underlying the development of episodic memory during middle childhood. *Dev Cogn Neurosci*, 2, 381–395.
- Ghetti, S., DeMaster, D.M., Yonelinas, A.P., and Bunge, S.A. (2010). Developmental Differences in Medial Temporal Lobe Function during Memory Encoding. *J Neurosci*, 30, 9548–9556.
- Giedd, J.N., Snell, J.W., Lange, N., Rajapakse, J.C., Casey, B.J., Kozuch, P.L., Vaituzis, A.C., Vauss, Y.C., Hamburger, S.D., Kaysen, D., and Rapoport J.L. (1996). Quantitative Magnetic Resonance Imaging of Human Brain Development: Ages 4–18. *Cereb Cortex*, 6, 551–559.
- Giedd, J.N., Blumenthal, J., Jeffries, N.O., Castellanos, F.X., Liu, H., Zijdenbos, A., Paus, T., Evans, A.C., and Rapoport, J.L. (1999). Brain development during childhood and adolescence: a longitudinal MRI study. *Nat Neurosci*, 2, 861–863.
- Giovanello, K.S., Schnyer, D., and Verfaellie, M. (2009). Distinct hippocampal regions make unique contributions to relational memory. *Hippocampus*, 19, 111–117.
- Gogtay, N., Giedd, J.N., Lusk, L., Hayashi, K.M., Greenstein, D., Vaituzis, A.C., Nugent, T.F., Herman, D.H., Clasen, L.S., Toga, A.W., Rapoport J.L., and Thompson P.M. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proc Natl Acad Sci USA*, 101, 8174–8179.
- Gogtay, N., Nugent, T.F., Herman, D.H., Ordóñez, A., Greenstein, D., Hayashi, K.M., Clasen, L., Toga, A.W., Giedd, J.N., Rapoport, J.L., and Thompson P.M. (2006). Dynamic mapping of normal human hippocampal development. *Hippocampus*, 16, 664–672.
- Guillery-Girard, B., Martins, S., Deshayes, S., Hertz-Pannier, L., Chiron, C., Jambaqué, I., Landeau, B., Clochon, P., Chételat, G., and Eustache, F. (2013). Developmental trajectories of associative memory from childhood to adulthood: a behavioral and neuroimaging study. *Front Behav Neurosci*, 7, 126.
- Hayne, H., and Jack, F. (2011). Childhood amnesia. *Wiley Interdiscip Rev Cogn Sci*, 2, 136–145.
- Howe, M.L., and Courage, M.L. (1993). On resolving the enigma of infantile amnesia. *Psychol Bull*, 113, 305–326.
- Howe, M.L., and Courage, M.L. (1997). The emergence and early development of autobiographical memory. *Psychol Rev*, 104, 499–523.
- Huttenlocher, P.R. (1979). Synaptic density in human frontal cortex: Developmental changes and effects of aging. *Brain Res*, 163, 195–205.
- Insausti, R., Cebada-Sánchez, S., and Marcos, P. (2010). Postnatal development of the human hippocampal formation. *Adv Anat Embryol Cell Biol*, 206, 1–86.
- Janowsky, J.S., Shimamura, A.P., and Squire, L.R. (1989). Source memory impairment in patients with frontal lobe lesions. *Neuropsychologia*, 27, 1043–1056.
- Jernigan, T.L., Trauner, D.A., Hesselink, J.R., and Tallal, P.A. (1991). Maturation of human cerebrum observed in vivo during adolescence. *Brain*, 114, 2037–2049.
- Lebel, C., and Beaulieu, C. (2011). Longitudinal development of human brain wiring continues from childhood into adulthood. *J Neurosci*, 31, 10937–10947.
- Lebel, C., Walker, L., Leemans, A., Phillips, L., and Beaulieu, C. (2008). Microstructural maturation of the human brain from childhood to adulthood. *Neuroimage*, 40, 1044–1055.

- Lee, K., Bull, R., and Ho, R.M.H. (2013). Developmental changes in executive functioning. *Child Dev*, 84, 1933–1953.
- Lenroot, R.K., and Giedd, J.N. (2006). Brain development in children and adolescents: Insights from anatomical magnetic resonance imaging. *Neurosci Biobehav Rev*, 30, 718–729.
- Lenroot, R.K., Gogtay, N., Greenstein, D.K., Wells, E.M., Wallace, G.L., Clasen, L.S., Blumenthal, J.D., Lerch, J., Zijdenbos, A.P., Evans, A.C., Thompson P.M., and Giedd J.N. (2007). Sexual dimorphism of brain developmental trajectories during childhood and adolescence. *Neuroimage*, 36, 1065–1073.
- Mabbott, D.J., Rovet, J., Noseworthy, M.D., Smith, M. Lou, and Rockel, C. (2009). The relations between white matter and declarative memory in older children and adolescents. *Brain Res*, 1294, 80–90.
- Maguire, E.A. (2001). Neuroimaging, memory and the human hippocampus. *Rev Neurol (Paris)*, 157, 791–794.
- Mishkin, M., Suzuki, W.A., Gadian, D.G., and Vargha-Khadem, F. (1997). Hierarchical organization of cognitive memory. *Philos Trans R Soc Lond B, Biol Sci*, 352, 1461–1467.
- Monette, S., Bigras, M., and Guay, M.-C. (2011). The role of the executive functions in school achievement at the end of Grade 1. *J Exp Child Psychol*, 109, 158–173.
- Newcombe, N.S., Lloyd, M.E., and Ratliff, K.R. (2007). Development of episodic and autobiographical memory: a cognitive neuroscience perspective. *Adv Child Dev Behav*, 35, 37–85.
- Oakes, L.M., Hurley, K.B., Ross-Sheehy, S., and Luck, S.J. (2011). Developmental changes in infants' visual short-term memory for location. *Cognition*, 118, 293–305.
- Ofen, N. (2012). The development of neural correlates for memory formation. *Neurosci Biobehav Rev*, 36, 1708–1717.
- Ofen, N., Kao, Y.-C., Sokol-Hessner, P., Kim, H., Whitfield-Gabrieli, S., and Gabrieli, J.D.E. (2007). Development of the declarative memory system in the human brain. *Nat Neurosci*, 10, 1198–1205.
- Olson, I.R., and Newcombe, N.S. (2013). Binding Together the Elements of Episodic: Relational Memory and the Developmental Trajectory of the Hippocampus. In *The Wiley Handbook on the Development of Children's Memory*, P.J. Bauer, and R. Fivush (eds.) (John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK), pp. 285–308.
- Paz-Alonso, P.M., Ghetti, S., Donohue, S.E., Goodman, G.S., and Bunge, S.A. (2008). Neurodevelopmental correlates of true and false recognition. *Cereb Cortex*, 18, 2208–2216.
- Paz-Alonso, P.M., Ghetti, S., Matlen, B.J., Anderson, M.C., and Bunge, S.A. (2009). Memory suppression is an active process that improves over childhood. *Front Hum Neurosci*, 3, 24.
- Pfefferbaum, A., Mathalon, D.H., Sullivan, E. V, Rawles, J.M., Zipursky, R.B., and Lim, K.O. (1994). A quantitative magnetic resonance imaging study of changes in brain morphology from infancy to late adulthood. *Arch Neurol*, 51, 874–887.
- Picard, L., Cousin, S., Guillery-Girard, B., Eustache, F., and Piolino, P. (2012). How Do the Different Components of Episodic Memory Develop? Role of Executive Functions and Short-Term Feature-Binding Abilities. *Child Dev*, 83, 1037–1050.
- Piolino, P., Hisland, M., Ruffeveille, I., Matuszewski, V., Jambaqué, I., and Eustache, F. (2007). Do school-age children remember or know the personal past? *Conscious Cogn*, 16, 84–101.
- Reiss, A.L., Abrams, M.T., Singer, H.S., Ross, J.L., and Denckla, M.B. (1996). Brain development, gender and IQ in children. A volumetric imaging study. *Brain* 119, 1763–1774.
- Riggins, T. (2014). Longitudinal investigation of source memory reveals different developmental trajectories for item memory and binding. *Dev Psychol*, 50, 449–459.
- Ross-Sheehy, S., Oakes, L.M., and Luck, S.J. (2011). Exogenous attention influences visual short-term memory in infants. *Dev Sci*, 14, 490–501.
- Rovee-Collier, C., Sullivan, M., Enright, M., Lucas, D., and Fagen, J. (1980). Reactivation of infant memory. *Science*, 208, 1159–1161.
- Shaw, P., Kabani, N.J., Lerch, J.P., Eckstrand, K., Lenroot, R., Gogtay, N., Greenstein, D., Clasen, L., Evans, A., Rapoport, J.L., Giedd J.N., and Wise S.P. (2008). Neurodevelopmental trajectories of the human cerebral cortex. *J Neurosci*, 28, 3586–3594.
- Shing, Y.L., Werkle-Bergner, M., Li, S.-C., and Lindenberger, U. (2008). Associative and strategic components of episodic memory: a life-span dissociation. *J Exp Psychol Gen*, 137, 495–513.
- Shing, Y.L., Werkle-Bergner, M., Brehmer, Y., Müller, V., Li, S.-C., and Lindenberger, U. (2010). Episodic memory across the lifespan: the contributions of associative and strategic components. *Neurosci Biobehav Rev*, 34, 1080–1091.
- Sowell, E.R., Delis, D., Stiles, J., and Jernigan, T.L. (2001). Improved memory functioning and frontal lobe maturation between childhood and adolescence: a structural MRI study. *J Int Neuropsychol Soc*, 7, 312–322.
- Sowell, E.R., Peterson, B.S., Thompson, P.M., Welcome, S.E., Henkenius, A.L., and Toga, A.W. (2003). Mapping cortical change across the human life span. *Nat Neurosci*, 6, 309–315.
- Sowell, E.R., Thompson, P.M., Leonard, C.M., Welcome, S.E., Kan, E., and Toga, A.W. (2004). Longitudinal mapping of cortical thickness and brain growth in normal children. *J Neurosci*, 24, 8223–8231.
- Squire, L.R. (1992). Memory and the hippocampus: a synthesis from findings with rats, monkeys, and humans. *Psychol Rev* 99, 195–231.
- Supekar, K., Musen, M., and Menon, V. (2009). Development of large-scale functional brain networks in children. *PLoS Biol*, 7, e1000157.
- Tamnes, C.K., Walhovd, K.B., Dale, A.M., Østby, Y., Grydeland, H., Richardson, G., Westlye, L.T., Roddey, J.C., Hagler, D.J., Due-Tønnessen, P., Holland D., and Fjell A.M. (2013). Brain development and aging: over-

- lapping and unique patterns of change. *Neuroimage*, 68, 63–74.
- Tulving, E. (1984). Précis of Elements of episodic memory. *Behav Brain Sci* 7, 223.
- Tulving, E. (1995). Organization of memory: Quo vadis? In *The Cognitive Neurosciences*, M. Gazzaniga, (ed.) (The MIT Press, Cambridge), pp. 839–847.
- Tulving, E. (2002). Episodic Memory: From Mind to Brain. *Annu Rev Psychol*, 53, 1–25.
- Tulving, E., and Markowitsch, H.J. (1998). Episodic and declarative memory: role of the hippocampus. *Hippocampus*, 8, 198–204.
- Utsunomiya, H., Takano, K., Okazaki, M., and Mitsudome, A. (1999). Development of the temporal lobe in infants and children: analysis by MR-based volumetry. *Am J Neuroradiol*, 20, 717–723.
- Wang, S., Allen, R.J., Lee, J.R., and Hsieh, C.-E. (2015). Evaluating the developmental trajectory of the episodic buffer component of working memory and its relation to word recognition in children. *J Exp Child Psychol*, 133, 16–28.
- Wilke, M., Krägeloh-Mann, I., and Holland, S.K. (2007). Global and local development of gray and white matter volume in normal children and adolescents. *Exp Brain Res*, 178, 296–307.
- Willoughby, K. a, Desrocher, M., Levine, B., and Rovet, J.F. (2012). Episodic and semantic autobiographical memory and everyday memory during late childhood and early adolescence. *Front Psychol*, 3, 53.
- Yakovlev, P.I., and Lecours, A.-R. (1967). The myelogenic cycles of regional maturation of the brain. In *Regional Development of the Brain in Early Life.*, A. Minkowski, (ed.) (Lackwell Scientific Publications, Oxford, UK), pp. 3–70.