

ACTES DE L'ÉCOLE D'ÉTÉ EN NEUROÉDUCATION 2019

La régulation du comportement et des émotions pendant l'adolescenceIroise Dumontheil^{1,2*}

RÉSUMÉ

Les recherches en neurosciences cognitives des deux dernières décennies ont démontré qu'au-delà de la petite enfance, le cerveau continue de changer de manière significative pendant l'adolescence. La maturation des circuits neuronaux sous-tendant les émotions, la motivation et le renforcement, la cognition sociale et les fonctions exécutives sont plus ou moins sensibles aux changements hormonaux associés à la puberté et progressent différemment pendant l'adolescence. Les adolescents ressentent les émotions de manière plus forte et sont plus sensibles au contexte social que les adultes. Par conséquent, ils peuvent rencontrer des difficultés de régulation de leurs émotions et actions dans certains contextes. Ces difficultés peuvent devenir chroniques et mener à des troubles de la santé mentale, comme la dépression, l'anxiété et l'addiction. Mais l'adolescence peut aussi être considérée positivement comme une période d'exploration et de flexibilité cognitive, pendant laquelle les individus deviennent indépendants et construisent leur concept de soi. L'éducation peut jouer un rôle dans le développement des adolescents à travers des programmes ayant pour but de renforcer leur capacité de réguler leurs émotions et leur comportement.

¹ Centre for Brain and Cognitive Development, Department of Psychological Sciences, Birkbeck, University of London, London, UK

² Centre for Educational Neuroscience, University of London, London, UK

* Correspondance avec l'auteure : i.dumontheil@bbk.ac.uk

Pour citer cet article : Dumontheil, I. (2021). La régulation du comportement et des émotions pendant l'adolescence. *Neuroéducation*, 7(1). Prépublication.

DOI : <https://doi.org/10.24046/neuroed.20210701.1>

Reçu le 2 avril 2020. Révision reçue le 13 juillet 2020.

Accepté le 4 novembre 2020. Publié en ligne le date 3 décembre 2020.

Neuroéducation, 7(1). Prépublication.

ISSN: 1929-1833

Tous droits réservés © 2021 – Association pour la recherche en neuroéducation

1. Introduction

L'adolescence est la période de transition entre l'enfance et l'âge adulte. Le début de l'adolescence est défini par le début des changements physiologiques et corporels liés à la puberté, tandis que la fin de l'adolescence est définie par des critères sociaux, correspondant au moment où un individu acquiert un rôle indépendant dans la société. La progression temporelle des étapes de la puberté a changé au cours des siècles ainsi qu'au cours des dernières décennies, en partie à cause de changements dans notre nutrition (Biro, Greenspan et Galvez, 2012; Lewis, Shapland et Watts, 2016). Les recherches en neurosciences cognitives des 20 dernières années, en particulier l'utilisation de l'imagerie par résonance magnétique (IRM), ont permis d'étudier en détail la maturation du cerveau pendant l'adolescence. Ces travaux ont montré en particulier que, au-delà de la petite enfance, le cerveau continuait à changer aussi bien sur le plan de la structure que sur le plan du fonctionnement pendant l'adolescence et le début de la deuxième décennie de vie. Une meilleure connaissance de la maturation du cerveau pourrait améliorer notre compréhension du développement des capacités de régulation du comportement et des émotions pendant l'adolescence. Ces nouvelles connaissances pourraient à leur tour être utilisées par les enseignants et les parents pour optimiser l'éducation des adolescents.

2. Développement de la structure du cerveau pendant l'adolescence

Une découverte majeure des études longitudinales d'IRM structurelle est la démonstration que pendant l'adolescence ont lieu des changements significatifs à la fois au niveau de la matière blanche, qui contient les axones et les cellules gliales qui les entourent de couches de myéline, et de la matière grise, qui contient les corps cellulaires des neurones, leurs arborisations dendritiques et les synapses, c'est-à-dire les connexions entre neurones (Dumontheil et Mareschal, 2020). Le volume de la matière blanche augmente pendant les deux ou trois premières décennies, tandis que le volume de la matière grise est maximal pendant l'enfance et diminue ensuite pendant la fin de l'enfance, l'adolescence et les débuts de l'âge adulte (Blakemore, 2012; Brain Development Cooperative Group, 2012; Lebel et Beaulieu, 2011; Mills *et al.*, 2016; Tamnes *et al.*, 2010).

Les études d'IRM structurelle ont montré que l'épaisseur du cortex, ou le volume de matière grise, diminuait pendant la fin de l'enfance et l'adolescence et ce, parfois jusqu'à l'âge adulte (Brain Development Cooperative Group, 2012; Mills *et al.*, 2016), et que la diminution de l'épaisseur du cortex était potentiellement plus rapide pendant l'adolescence que pendant l'enfance ou les débuts de l'âge adulte (Zhou *et al.*, 2015). La progression et l'amplitude de ces changements varient entre les diverses régions du cerveau (Gogtay *et al.*, 2004; Tamnes *et al.*, 2010); à titre d'exemple, entre les âges de 8 et 30 ans, l'épaisseur du cortex diminue de 5 à 20 % (Tamnes *et al.*, 2010). Les lobes frontaux, qui sont impliqués dans la régulation du comportement et des

émotions, et les lobes temporaux, qui sont impliqués dans le traitement sémantique du langage et la cognition sociale, montrent une maturation particulièrement prolongée (Gogtay *et al.*, 2004; Shaw *et al.*, 2008).

Bien qu'il soit encore difficile de relier les études volumétriques en IRM et les études de neurosciences cellulaires, ces changements reflètent sans doute en partie une réduction du nombre de synapses (Huttenlocher et Dabholkar, 1997; Thomas et Johnson, 2008). Le nombre de synapses augmente rapidement pendant les premiers mois de la vie et atteint un maximum entre 2 et 3 ans, avant de diminuer pour atteindre le nombre observé chez l'adulte (Huttenlocher et Dabholkar, 1997; Thomas et Johnson, 2008). Cette réduction du nombre de synapses reflète l'adaptation des circuits neuronaux aux expériences et à l'environnement de chaque individu; les connexions entre neurones co-activés sont maintenues et renforcées tandis que les connexions entre neurones qui ne le sont pas sont éliminées (Thomas et Johnson, 2008). La réduction du nombre de synapses a lieu plus tôt dans le cortex visuel et le cortex auditif que dans le cortex préfrontal (Huttenlocher et Dabholkar, 1997), où ces changements continuent pendant l'adolescence (Petanjek, Judas, Kostovic et Uylings, 2008). La création et l'élimination de synapses continuent toute la vie et nous permettent d'encoder de nouvelles informations, de consolider des représentations souvent remémorées et d'oublier les autres, dans un processus de neuroplasticité. Cependant la fréquence de ces processus de création et d'élimination des synapses est bien plus grande pendant l'enfance et l'adolescence que pendant l'âge adulte. Ces processus sont importants dans un contexte éducatif étant donné que la neuroplasticité est ce qui permet l'apprentissage. Les périodes sensibles correspondent à des phases de la vie où la plasticité de certaines régions du cerveau permet l'apprentissage rapide de compétences spécifiques (Thomas et Johnson, 2008), par exemple, le langage dans la petite enfance, les capacités motrices fines qui permettent d'écrire pendant l'enfance ou les capacités de raisonnement abstrait pendant l'adolescence. Un système éducatif idéal s'alignerait sur ces périodes sensibles. Cependant, nos connaissances spécifiques sur le sujet sont encore limitées (*Ibid.*).

La majorité de la recherche en IRM structurelle s'est concentrée sur le cortex, cependant, le développement des régions sous-corticales impliquées dans le traitement des émotions et des récompenses a aussi été étudié et montre que les régions sous-corticales diffèrent dans leur maturation pendant l'enfance et l'adolescence (Brain Development Cooperative Group, 2012; Tamnes *et al.*, 2010). Par exemple, l'amygdale et l'hippocampe augmentent de volume tandis que le striatum diminue de volume pendant l'adolescence (Goddings *et al.*, 2014).

L'imagerie en tenseur de diffusion est une méthode d'IRM qui permet d'obtenir des informations détaillées sur les fibres de la matière blanche. Les mesures de diffusion des protons des

molécules d'eau obtenues par cette méthode varient en fonction de l'épaisseur des couches de myéline couvrant les axones, de l'épaisseur des axones et de leur nombre dans les fibres de matière blanche. Les études en IRM structurelle et en tenseur de diffusion ont montré que les volumes de matière blanche augmentent jusqu'au milieu de la deuxième décennie, reflétant probablement la myélinisation des axones et une augmentation de leur diamètre (Lebel et Beaulieu, 2011; Mills *et al.*, 2016). Ces changements permettent des échanges d'informations de plus en plus rapides le long des circuits neuronaux pendant le développement. À l'instar de la maturation de la matière grise, la maturation de la matière blanche n'est pas uniforme dans le cerveau (Lebel et Beaulieu, 2011; Tamnes *et al.*, 2010) et diffère entre individus (Lebel et Beaulieu, 2011). La maturation des fibres de matière blanche permet un échange plus rapide de l'information dans le cerveau. Ainsi, les temps de réponses simples sont les plus rapides vers la fin de l'adolescence (Carlozzi, Beaumont, Tulskey et Gershon, 2015). Ces changements permettent la mise en place de réseaux neuronaux de plus longue distance qui sont impliqués par exemple dans le contrôle cognitif (Dumontheil, 2016).

La puberté a lieu en moyenne un an plus tard chez les hommes que chez les femmes (Vijayakumar *et al.*, 2019). La maturation sexuelle, la croissance et la distribution des substances adipeuses sont associées à la puberté, cependant, on ne sait que très peu de choses sur l'effet des hormones sur le développement structurel du cerveau pendant l'adolescence (Goddings *et al.*, 2014). L'âge chronologique et la puberté semblent tous deux jouer un rôle dans la maturation du cerveau, par exemple pour les volumes des régions sous-corticales (*Ibid.*), l'épaisseur du cortex (Nguyen *et al.*, 2013), et les mesures de diffusivité de la matière blanche (Menzies *et al.*, 2015), un rôle qui peut varier en fonction du sexe (Goddings *et al.*, 2014; Herting, Maxwell, Irvine et Nagel, 2012). Les études chez les animaux montrent que les hormones sexuelles (androgènes et œstrogènes) ont des influences spécifiques sur le développement de certaines régions du cerveau (voir Goddings *et al.*, 2014, pour une discussion). Chez les humains les différences de structure du cerveau entre sexes reflètent principalement les différences de taille physique (voir Mills *et al.*, 2016, pour une discussion), mais des différences de maturation spécifiques à certaines régions ont été observées, au niveau cortical et sous-cortical (Brain Development Cooperative Group, 2012; Goddings *et al.*, 2014; Nguyen *et al.*, 2013; Raznahan *et al.*, 2010) et pourraient être dues à des effets hormonaux spécifiques. Par exemple, une étude suggère que la maturation structurelle de l'hippocampe est plus fortement liée à la puberté chez les femmes que chez les hommes, tandis que le contraire est observé pour le putamen (Goddings *et al.*, 2014). Ces différences pourraient approfondir notre compréhension des différences cognitives et comportementales entre hommes et femmes, comme les différences de prise de risque et de comportement antisocial, ou les différences d'émergence de maladies psychiatriques pendant l'adolescence (Paus, Keshavan et Giedd, 2008; Rapee *et al.*, 2019).

Il a été proposé que la maturation prolongée du cortex et de certaines régions sous-corticales est reflétée dans le développement d'un certain nombre d'aspects de la cognition pendant l'adolescence, en particulier le contrôle cognitif, la réactivité émotionnelle, la cognition sociale et la régulation des émotions (Crone et Dahl, 2012).

3. Développement du contrôle cognitif

Le contrôle cognitif peut-être défini comme la capacité d'adapter son comportement de manière flexible pour atteindre un but interne, en coordonnant l'ensemble des processus cognitifs. Le contrôle cognitif est particulièrement important dans des conditions nouvelles lorsque la réponse n'est pas automatique (Diamond, 2013). Il permet d'atteindre des buts à court terme mais aussi à long terme, et est impliqué lorsque les pensées et comportements doivent être ajustés pour mieux s'accorder à l'environnement (Crone et Dahl, 2012). Le contrôle cognitif comprend les fonctions exécutives, à l'image du pouvoir exécutif qui prend des décisions dans une société démocratique.

Les fonctions exécutives simples comprennent le contrôle inhibiteur, la mémoire de travail et la flexibilité cognitive (Miyake *et al.*, 2000). Le contrôle inhibiteur correspond à la capacité d'interrompre une réponse dominante inappropriée et d'ignorer les distractions. La mémoire de travail est la capacité à retenir des informations temporairement pour permettre de réaliser des opérations cognitives sur ces informations. La flexibilité cognitive est la capacité à changer de comportement ou de manière de penser. La maturation des fonctions exécutives est rapide pendant l'enfance et continue pendant l'adolescence (Crone et Dahl, 2012; Huizinga, Dolan et van der Molen, 2006; Lee, Bull et Ho, 2013; Tamnes *et al.*, 2010). La mémoire de travail en particulier semble continuer à progresser plus longtemps que le contrôle inhibiteur ou la flexibilité cognitive (Huizinga *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2013; Tamnes *et al.*, 2010). Les études de neuroimagerie ont montré que l'activité du cortex pariétal latéral augmente avec l'âge pendant les tâches de fonctions exécutives, tandis que les résultats sont plus variés en ce qui concerne le cortex préfrontal et suggèrent que pendant le développement, certaines régions du cortex préfrontal deviennent spécialisées dans certaines fonctions (Crone et Dahl, 2012; Dumontheil, 2016). Pendant les tâches de mémoire de travail, l'activité du cortex préfrontal latéral augmente, comme celle du cortex pariétal (par exemple, Ziermans *et al.*, 2012), tandis que pendant les tâches de contrôle inhibiteur ou de flexibilité cognitive, les régions préfrontales recrutées varient et montrent parfois des augmentations ou des réductions d'activité entre l'adolescence et l'âge adulte (par exemple Tamm, Menon et Reiss, 2002). Ces résultats pourraient indiquer que les enfants recrutent des réseaux neuronaux différents pour accomplir ce type de tâches (Crone et Steinbeis, 2017).

Les fonctions exécutives plus complexes nécessitent des niveaux d'abstraction, que ce soit des abstractions de notre

environnement immédiat ou des abstractions dans le temps (Dumontheil, 2014), et dépendent du contrôle inhibiteur, de la mémoire de travail et de la flexibilité cognitive. Par exemple, planifier nécessite d'imaginer le futur, de considérer plusieurs alternatives possibles (flexibilité cognitive), d'inhiber des options attrayantes ou automatiques, mais qui ne permettraient pas d'atteindre notre but (contrôle inhibiteur), et de maintenir en tête les étapes du plan (mémoire de travail). La mémoire prospective est un autre exemple de fonction exécutive complexe qui nous permet de nous souvenir d'accomplir un but dans le futur, par exemple se souvenir de poster une lettre en rentrant du travail, ou d'amener son kit de sport le lendemain à l'école. Comme les fonctions exécutives plus simples, la planification, la métacognition et le raisonnement abstrait continuent à progresser pendant l'adolescence (Dumontheil, 2014; Luciana, Collins, Olson et Schissel, 2009; Magis-Weinberg, Custers et Dumontheil, 2020; Weil *et al.*, 2013). Une étude de données collectées auprès de 5 404 participants âgés de 10 à 30 ans dans 11 pays, des États-Unis au Kenya en passant par l'Inde et l'Italie, a combiné en une unique mesure de contrôle cognitif la performance sur des tests de contrôle inhibiteur et de planification et les réponses données à un questionnaire sur la capacité à planifier (Steinberg *et al.*, 2018). Les résultats ont montré que le contrôle cognitif s'améliore rapidement pendant l'adolescence, avant d'atteindre un plateau autour de 23-26 ans (*Ibid.*).

Le fait que le développement des fonctions exécutives continue pendant l'adolescence signifie que les élèves peuvent avoir des difficultés à inhiber certains comportements en classe, à passer d'une tâche à l'autre, ou à garder en tête des instructions. Il a été proposé que l'enseignement peut être adapté pour mieux convenir aux enfants ou adolescents qui ont des problèmes de mémoire de travail (Gathercole et Alloway, 2007). Par ailleurs, étant donné que la métacognition, c'est-à-dire la réflexion sur nos propres pensées, capacités ou performances, s'améliore pendant l'adolescence, les éducateurs peuvent capitaliser sur ces capacités en apprenant à leurs élèves des stratégies métacognitives afin d'améliorer leurs performances (Education Endowment Foundation, 2019).

En parallèle à la distinction faite entre les fonctions exécutives simples et les fonctions exécutives complexes, une distinction peut être faite entre les fonctions exécutives « froides », celles principalement décrites ci-dessus qui opèrent dans un contexte socio-affectif neutre et les fonctions exécutives « chaudes », qui opèrent dans des contextes avec une charge motivationnelle ou émotionnelle (Zelazo et Carlson, 2012). Le développement du comportement dans ces deux types de contexte semble suivre une trajectoire distincte (*Ibid.*) et, en particulier, le contexte socio-émotionnel exerce une plus grande influence sur la prise de décision pendant l'adolescence (Somerville, Hare et Casey, 2011).

4. Développement du traitement des émotions, de la recherche de sensation et de l'influence des pairs

L'adolescence est considérée comme une période de réactivité émotionnelle et de sensibilité aux récompenses. Comparés aux enfants et adultes, on observe chez les adolescents une plus grande activité de l'amygdale, une région du cerveau sensible à des stimuli saillants ou signalant un danger dans l'environnement, lorsque des photographies de visages avec des émotions (joie ou peur) leurs sont présentées, plutôt que des visages sans émotions (Hare *et al.*, 2008; Vijayakumar *et al.*, 2019). De manière similaire, on peut aussi observer chez les adolescents une plus grande activité du striatum ventral lorsqu'ils reçoivent une récompense, mais une activité réduite pendant l'attente d'une récompense (Crone et Dahl, 2012; Dumontheil, 2016). Cependant, ces résultats sont assez hétérogènes. Dans un effort de synthèse de ces résultats, il a été proposé que les adolescents ont un signal d'erreur de prédiction des récompenses différent des enfants et adultes (Crone et Dahl, 2012). Ce signal reflète la différence entre la valeur attendue d'une action et le résultat réel de cette action, et joue un rôle critique dans l'apprentissage par renforcement et dans la capacité de s'adapter à un contexte ou des conditions changeantes (Crone et Dahl, 2012). Une étude a en effet observé que l'activité liée au signal d'erreur de prédiction était maximale pendant l'adolescence dans le striatum ventral et le gyrus angulaire (Cohen *et al.*, 2010). De plus, une autre étude évaluant le rôle de l'apprentissage par renforcement et de la mémoire de travail pour l'apprentissage a montré que la contribution de l'apprentissage par renforcement changeait pendant l'adolescence et pouvait compenser les limites de capacité de mémoire de travail (Master *et al.*, 2020). De nouvelles recherches visent d'ailleurs à évaluer les bénéfices potentiels de l'utilisation d'approches d'apprentissage par renforcement dans l'éducation, par exemple par l'utilisation de jeux (Howard-Jones et Jay, 2016).

Une conséquence de la réactivité émotionnelle et de la sensibilité aux récompenses des adolescents est une plus grande influence des contextes sociaux et émotionnels sur leurs prises de décisions (Crone et Dahl, 2012; Somerville et Casey, 2010). Ceci peut notamment s'illustrer par des différences de prise de risque au cours du développement. Les premières études sur le sujet ont montré une plus grande prise de risque pendant l'adolescence que pendant l'âge adulte (Chein *et al.*, 2011; Dahl, 2004; Steinberg, 2005). Des travaux plus récents suggèrent que la prise de risque atteint un maximum vers 25 ans, et diminue ensuite pendant l'âge adulte (Willoughby *et al.*, 2013). Cependant, l'âge précis de ce maximum dépend du type de risque considéré. Par exemple, la prise de risque de type antisocial, comme le vandalisme ou le vol, atteint un maximum plus tôt que la prise de risque affectant la santé, comme fumer (Duell *et al.*, 2018). Le développement de la recherche de sensation, un concept lié à la prise de risque et à la sensibilité aux récompenses, a été

étudié en utilisant une mesure composite combinant la prise de risque dans un jeu de circuit automobile sur ordinateur (jeu du *Stoplight*, Steinberg et al., 2008), un jeu de prise de décision financière en situation d'incertitude (une version modifiée de l'*Iowa Gambling Task*, Cauffman et al., 2010) et un questionnaire sur la recherche de sensation (par exemple, « J'aime faire les choses juste pour le plaisir », *Sensation Seeking Scale*, Zuckerman, 1994). Les données de 5 404 participants dans 11 pays montrent que la recherche de sensation atteint un pic à l'âge de 19 ans (Steinberg et al., 2018).

L'importance du contexte social est un élément clé du comportement des adolescents. Une étude importante utilisant le jeu de conduite automobile sur ordinateur mentionné ci-dessus (*Spotlight*) a montré que les adolescents prenaient plus de risques que les adultes lorsqu'ils étaient en présence de leurs pairs (deux amis), mais pas lorsqu'ils étaient seuls (Gardner et Steinberg, 2005). Ces résultats suggèrent que les décisions prises par les adolescents sont particulièrement affectées par le contexte social. Dans une étude en neuroimagerie utilisant la même expérience, une plus grande activité a été observée dans le cortex orbitofrontal et le striatum ventral chez les adolescents lorsqu'ils étaient observés par leurs pairs que lorsqu'ils ne l'étaient pas. Ceci n'était pas le cas chez les adultes, chez qui une plus grande activité était observée dans le cortex préfrontal latéral que chez les adolescents, dans les deux conditions (observation par les pairs ou non) (Chein et al., 2011). Ces résultats suggèrent que la présence de pairs module spécifiquement chez les adolescents l'attractivité de la récompense associée à la prise de risque. Corroborant cette hypothèse, une autre étude a montré que l'activation du striatum ventral lors de l'obtention d'une récompense dans un jeu de cartes était augmentée chez les adolescents quand ils étaient observés par des pairs, mais pas chez les adultes (Smith, Steinberg, Strang et Chein, 2015). Ces résultats indiquent donc que l'influence des pairs sur le système de traitement des récompenses est présente même en dehors d'un contexte de prise de risque.

Comme la prise de risque, la perception du risque elle-même peut aussi être influencée par autrui, et ce différemment chez les adolescents. Par exemple, il a été montré que les jeunes adolescents (12-14 ans) étaient plus influencés dans leur perception du danger associé à certaines situations par d'autres adolescents qu'ils ne l'étaient par des adultes, alors qu'enfants (8-11 ans) et adultes (19-59 ans) étaient plus influencés par les adultes (Knoll, Magis-Weinberg, Speekenbrink et Blakemore, 2015). Le fait que l'adolescence soit une phase de vie particulièrement sensible au contexte social, et en particulier à l'influence des pairs, n'est pas unique aux êtres humains. Par exemple, une étude a montré que les souris juvéniles, une période équivalente à l'adolescence chez les humains, consommaient plus d'alcool lorsqu'elles étaient en présence de leurs pairs (qui avaient grandi dans la même cage qu'elles) que lorsqu'elles étaient seules, une tendance qui n'était pas observée chez les souris adultes (Logue et al., 2014). Ce type d'étude met en évidence le fait

que l'importance du contexte social pendant l'adolescence n'est pas seulement liée à des constructions culturelles, mais à la conséquence de processus de maturation biologique.

Un autre élément jouant un rôle dans l'influence des pairs sur le comportement des adolescents est lié au besoin qu'ont les adolescents d'appartenir à un groupe social et à leur sensibilité à l'exclusion. Par exemple, le *Cyberball* (Williams, Cheung et Choi, 2000) est un jeu de balle virtuel qui permet de créer des conditions d'inclusion sociale (le participant reçoit la balle aussi souvent que les autres joueurs) et d'exclusion sociale (le participant ne reçoit plus la balle). La condition d'exclusion affecte l'humeur et l'anxiété des adolescentes plus que celle des adultes (Sebastian, Viding, Williams et Blakemore, 2010) et est associée à moins d'activation du cortex ventrolatéral préfrontal chez les adolescentes que chez les adultes, ce qui pourrait refléter une moins bonne régulation des émotions engendrées par l'exclusion sociale (Sebastian et al., 2011). Il a été proposé qu'éviter de prendre des risques sociaux, c'est-à-dire le risque d'être exclu, est un élément majeur affectant les décisions prises par les adolescents (Blakemore, 2018). S'assurer que les adolescents se sentent socialement inclus dans les classes pourrait réduire leur anxiété, améliorer leur humeur et améliorer l'apprentissage (Brookman-Byrne et Dumontheil, 2020). Il est important de noter que les pairs peuvent aussi avoir une influence positive. Par exemple, les résultats et la motivation scolaires s'améliorent lorsque les élèves passent du temps avec des pairs qui ont de bons résultats scolaires (Ryan, 2001). Une autre étude a montré que le comportement prosocial des adolescents augmente lorsqu'ils passent du temps avec des adolescents démontrant plus de comportements prosociaux (Wentzel, Barry et Caldwell, 2004).

Au-delà de l'influence des pairs, l'adolescence est une période importante du développement social, pendant laquelle les individus cherchent leur place dans la société indépendamment de leur famille, mais doivent aussi développer des compétences sociales appropriées pour leur culture (Burnett et Blakemore, 2009). Par exemple, la capacité à prendre en compte la perspective d'autrui, un élément de la cognition sociale, continue à s'améliorer pendant l'adolescence (Dumontheil, Apperly et Blakemore, 2010; Humphrey et Dumontheil, 2016; Symeonidou, Dumontheil, Chow et Breheny, 2016). Une autre étude a montré que la capacité à prédire l'état mental affectif d'autrui était meilleure chez les adultes que chez des adolescents de 11-16 ans (Sebastian et al., 2012). Même en l'absence de différences de réponses à des tests de cognition sociale, il a été observé dans des études utilisant des paradigmes divers que les adolescents présentaient une plus grande activation du cortex médial préfrontal et une moindre activation du cortex temporal (sillon temporal supérieur ou pôle temporal) que les adultes (Blakemore, 2010; Crone et Dahl, 2012; Dumontheil, 2016). Ces résultats démontrent donc une maturation prolongée du fonctionnement du « cerveau social » pendant l'adolescence (Blakemore, 2010). Ces travaux, en général, utilisent l'âge comme variable indiquant l'étape de développement,

cependant, une étude utilisant un paradigme comparant des scénarios d'émotions sociales (embarras, culpabilité), qui impliquent de penser aux pensées d'autres individus, à des scénarios d'émotions basiques (peur, dégoût) a montré que dans un groupe d'adolescentes de 11-13 ans, certaines différences d'activité du cerveau social étaient liées à l'âge chronologique, tandis que d'autres étaient liées à des différences hormonales reflétant le développement pubertaire (Goddings *et al.*, 2012).

Sur la base de ces résultats, il a été proposé que l'éducation pourrait essayer de promouvoir le développement des capacités de conscience de soi, de prise de perspective et d'interactions sociales pendant cette phase de développement social qu'est l'adolescence (Blakemore, 2010).

5. Développement de la régulation des émotions

La période de l'adolescence est une fenêtre temporelle pendant laquelle émerge un certain nombre de pathologies mentales (Kessler *et al.*, 2005; Paus *et al.*, 2008; Powers et Casey, 2015). Cependant, les pathologies socio-émotionnelles, telles que la phobie sociale, les troubles des conduites alimentaires, la dépression et le trouble anxieux généralisé semblent être les seules qui débutent spécifiquement pendant l'adolescence (Rapee *et al.*, 2019), en plus de la schizophrénie (Kessler *et al.*, 2005). Améliorer notre compréhension du développement typique de la régulation des émotions pourrait nous aider à mieux comprendre comment un développement atypique peut mener à des troubles pathologiques socio-émotionnels, ainsi qu'à développer des interventions qui puissent promouvoir un développement socio-émotionnel optimal (Clarke *et al.*, 2015; Pandey *et al.*, 2018).

La régulation des émotions comprend diverses stratégies pour augmenter, maintenir, ou diminuer l'intensité, la durée, ou la trajectoire d'émotions positives et négatives (Young, Sandman et Craske, 2019). Pendant l'enfance, les émotions sont souvent exprimées ouvertement et l'enfant cherche un soutien externe, typiquement un parent. Pendant l'adolescence, on observe une diminution de l'utilisation du soutien parental, et la régulation interne des émotions est encore peu efficace. Enfin, à l'âge adulte, les émotions sont régulées grâce à des stratégies de régulation interne (Young *et al.*, 2019). Le modèle proposé par Gross (1998, 2015) fait la distinction entre les stratégies orientées vers les antécédents de l'émotion et celles orientées vers la réponse émotionnelle. Des stratégies de sélection de la situation peuvent être appliquées à des situations externes. Le redéploiement de l'attention et la réévaluation de la situation peuvent être appliquées à des situations internes. Enfin, la réponse émotionnelle peut être modulée par modification ou suppression des réponses physiologiques ou expressives (Gross, 1998, 2015). La réévaluation et la suppression sont les stratégies de régulation les plus étudiées, mais il y en a bien d'autres (40 dans une étude chez des adultes, voir Heij et Cheavens, 2014). Les adolescents qui utilisent des stratégies de désengagement (par exemple, le déni ou l'évitement) ou de rumination ont plus de symptômes dépressifs et de

comportements d'externalisation (Silk, Steinberg et Morris, 2003). Ceux qui ont des problèmes d'internalisation utilisent plus souvent des stratégies de rumination ou d'attribution de fautes et moins souvent les stratégies de réévaluation (Garnefski, Kraaij et van Etten, 2005, voir Ahmed, Bittencourt-Hewitt et Sebastian, 2015 pour une synthèse).

Au point de vue cérébral, différents circuits sont impliqués dans la régulation des émotions. Comme discuté précédemment, les stimuli saillants (des stimuli avec une signification émotionnelle positive ou négative, ou des conditions de stress) et les stimuli associés à des signaux de récompense sont traités par les régions sous-corticales, l'amygdale et l'insula, et le striatum ventral, respectivement – ces circuits sont liés à la réactivité émotionnelle (Martin et Ochsner, 2016). La régulation cognitive est permise par le cortex cingulaire antérieur et le cortex préfrontal médial, qui estiment les besoins de contrôle cognitif et dirigent les signaux émotionnels, et le cortex préfrontal latéral dorsal et ventral, qui est impliqué dans l'attention sélective, la mémoire de travail et le contrôle inhibiteur (*Ibid.*). Il a été proposé que les circuits neuronaux impliqués dans la régulation des émotions évoluent au cours du développement, avec un passage de circuits sous-corticaux pendant l'enfance à des circuits corticaux à l'âge adulte (Casey, Heller, Gee et Cohen, 2019). Pendant l'enfance, il y aurait une forte connectivité entre l'amygdale et le striatum ventral, associée à des actions impulsives envers des signaux émotionnels. Ensuite, pendant le début de l'adolescence, cette connectivité diminuerait et il y aurait une augmentation de la connectivité entre l'amygdale et le cortex préfrontal ventromédial, associée à une réduction progressive de la réactivité émotionnelle. Pendant la fin de l'adolescence, la connectivité entre l'amygdale et le cortex préfrontal ventromédial s'inverserait, signifiant les débuts d'une régulation de la réactivité émotionnelle associée aux régions sous-corticales par le cortex préfrontal. Enfin, à l'âge adulte, il y aurait une augmentation de la connectivité entre le cortex préfrontal latéral et le cortex préfrontal ventromédial. Ce circuit refléterait le recrutement du contrôle cognitif permettant par exemple la redirection de l'attention lors des stratégies de réévaluation des émotions (Casey *et al.*, 2019). Cette synthèse de la recherche en neurosciences du développement de la régulation des émotions est une extension des modèles proposés en 2008 (Casey, Getz et Galvan, 2008; Steinberg, 2008), selon lesquels la plus grande influence du contexte social et émotionnel sur le comportement des adolescents correspondrait à une période de décalage (*imbalance*) entre une maturation plus précoce des circuits sous-corticaux de traitement des émotions et des récompenses en opposition à une maturation plus tardive des circuits impliquant le cortex préfrontal, qui permettent la cognition sociale et le contrôle cognitif. Plutôt que de considérer cette phase du développement sous un terme négatif de décalage, Crone et Dahl (2012) suggèrent que les spécificités du cerveau et de la cognition des adolescents permettent une période d'exploration et de flexibilité cognitive (voir aussi Telzer, 2016). Telzer, van Hoorn, Rogers et Do (2018) soulignent l'importance de mieux comprendre comment les influences sociales familiales, amicales, et au-

delà, pourraient être utilisées pour promouvoir un développement sain des adolescents.

6. Interventions pour promouvoir la régulation des émotions

Quel pourrait être le rôle de l'éducation dans la promotion de la régulation des émotions? Il est important de garder à l'esprit que les capacités de régulation dépendent du contexte physique et mental d'un individu. L'éducation peut par exemple promouvoir ou encadrer les exercices physiques, et promouvoir de bonnes habitudes de nutrition et de sommeil pour maximiser les capacités cognitives des élèves. En ce qui concerne spécifiquement la régulation des émotions, Martin and Ochsner (2016) proposent, par exemple, que dans un contexte éducatif, incorporer plus d'interactions entre pairs dans un contexte d'apprentissage pourrait être bénéfique pendant l'adolescence – les adolescents pourraient être particulièrement sensibles aux évaluations de leurs pairs et à l'exemple donné par leurs pairs. Une étude dans 56 écoles et plus de 24 000 élèves âgés de 11 à 15 ans a montré qu'une intervention encourageant un groupe d'élèves à afficher ouvertement leur perception négative des conflits à l'école (harcèlement, violence) était plus efficace sur le climat scolaire lorsque le groupe d'élèves en question contenait un plus grand nombre de « référents sociaux », des individus avec lesquels les autres élèves décidaient de passer plus de temps (Paluck, Shepherd et Aronow, 2016). La complexité de la sensibilité des adolescents aux caractéristiques du contexte social est aussi démontrée par une étude montrant que l'influence qu'avait la présence d'un observateur sur la performance d'adolescents réalisant un test de raisonnement dépendait de leur âge, de la difficulté de la tâche, ainsi que de la nature de l'observateur : un pair (ami) ou un adulte (le chercheur) (Wolf et al., 2015).

Martin and Ochsner (2016) proposent aussi que le curriculum scolaire pourrait inclure des programmes ayant pour but d'améliorer les capacités de régulation des émotions négatives et de promotion des émotions positives. Une méta-analyse a identifié 50 études évaluant l'efficacité de programmes ayant pour but de promouvoir la régulation de soi et des émotions (Pandey et al., 2018). Ces programmes reposaient sur des approches diverses (exercices physiques, interventions sur les capacités d'interactions sociales, yoga, pleine conscience, etc.) et étaient implantés à l'école par des enseignants ou bien au sein de cellules familiales via les parents, par exemple. Les résultats obtenus ont montré que les différents types d'intervention étaient majoritairement efficaces, et 66 % des études démontraient un effet, y compris sur des mesures expérimentales de régulation du comportement et des émotions (Pandey et al., 2018). De plus, ces interventions se sont même révélées efficaces pour améliorer les résultats scolaires (11 études sur 13 ayant collecté ce type de données), l'abus de substances (4/5), les troubles de conduite (3/3), les capacités sociales (2/2), la dépression (2/2), les problèmes de comportement (2/2) et le nombre d'expulsions d'élèves (1/1) (Pandey et al., 2018). Ces résultats prometteurs suggèrent qu'une panoplie

d'interventions pourraient être mises en place dans les écoles, et peut-être se compléter, pour améliorer la régulation des émotions chez les adolescents et potentiellement retarder ou diminuer l'apparition de troubles socio-émotionnels, tels que la dépression, ou de troubles du comportement, tels que l'abus de substances et de comportements menant à l'exclusion.

7. Conclusion

L'adolescence est une période de changements hormonaux, de changements structurels et fonctionnels du cerveau, ainsi que de changements cognitifs. Ces derniers sont particulièrement observés dans les domaines du traitement des émotions et des récompenses, de la cognition sociale, des fonctions exécutives et de la régulation des émotions. Les adolescents sont particulièrement sensibles au contexte socio-émotionnel et motivationnel, qui a un impact sur leur prise de décision. Ces facteurs dans leur ensemble influencent le comportement, la santé mentale et l'apprentissage des adolescents. Un certain nombre d'interventions avec des approches variées ont été développées pour promouvoir la régulation des émotions et semblent avoir des effets positifs, s'étendant aussi à des bénéfices de performance scolaire et de santé mentale. Un défi pour la recherche est maintenant de tenter d'évaluer de manière objective comment le contexte technologique constamment changeant pourrait affecter le développement cognitif des adolescents, par exemple en ayant des effets négatifs sur le sommeil (Mireku et al., 2019), mais il sera difficile d'identifier clairement la direction d'associations observées (Jenkins et al., 2019).

Références

- Ahmed, S. P., Bittencourt-Hewitt, A. et Sebastian, C. L. (2015). Neurocognitive bases of emotion regulation development in adolescence. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 15, 11–25.
<https://doi.org/10.1016/j.dcn.2015.07.006>
- Biro, F. M., Greenspan, L. C. et Galvez, M. P. (2012). Puberty in girls of the 21st century. *Journal of Pediatric and Adolescent Gynecology*, 25(5), 289–294.
<https://doi.org/10.1016/j.jpog.2012.05.009>
- Blakemore, S.-J. (2010). The developing social brain: Implications for education. *Neuron*, 65(6), 744–747.
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.03.004>
- Blakemore, S.-J. (2012). Imaging brain development: The adolescent brain. *NeuroImage*, 61(2), 397–406.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.11.080>
- Blakemore, S.-J. (2018). Avoiding social risk in adolescence. *Current Directions in Psychological Science*, 27(2), 116–122.
<https://doi.org/10.1177/0963721417738144>

- 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. *Cerebral Cortex*, 22(1), 1–12. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhr018>
- Brookman-Byrne, A. et Dumontheil, I. (2020) Brain and cognitive development during adolescence: Implications for science and mathematics education. Dans J. Harrington, J. Beale, A. Fancourt et C. Lutz (dir.), *The 'BrainCanDo' Handbook of Teaching and Learning* (p. 205–221). New York, NY : Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429197741-10>
- Burnett, S. et Blakemore, S.-J. (2009). The development of adolescent social cognition. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1167(1), 51–56. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04509.x>
- Carlozzi, N. E., Beaumont, J. L., Tulsy, D. S. et Gershon, R. C. (2015) The NIH Toolbox Pattern Comparison Processing Speed Test: Normative data. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 30(5), 359–368. <https://doi.org/10.1093/arclin/acv031>
- Casey, B. J., Getz, S. et Galvan, A. (2008). The adolescent brain. *Developmental Review*, 28(1), 62–77. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2007.08.003>
- Casey, B. J., Heller, A. S., Gee, D. G. et Cohen, A. O. (2019). Development of the emotional brain. *Neuroscience Letters*, 693, 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2017.11.055>
- Cauffman, E., Shulman, E. P., Steinberg, L., Claus, E., Banich, M.T., Graham, S. et Woolard, J. (2010). Age differences in affective decision making as indexed by performance on the Iowa Gambling Task. *Developmental Psychology*, 46(1), 193–207. <https://doi.org/10.1037/a0016128>
- Chein, J., Albert, D., O'Brien, L., Uckert, K. et Steinberg, L. (2011). Peers increase adolescent risk taking by enhancing activity in the brain's reward circuitry. *Developmental Science*, 14(2), F1–F10. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.01035.x>
- Clarke, A. M., Morreale, S., Field, C.-A., Hussein, Y. et Barry, M.M. (2015). *What works in enhancing social and emotional skills development during childhood and adolescence? A review of the evidence on the effectiveness of school-based and out-of-school programmes in the UK*. Rapport produit par le World Health Organization Collaborating Centre. Galway, Irlande : Health Promotion Research Centre. En ligne : https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/411492/What_works_in_enhancing_social_and_emotional_skills_development_during_childhood_and_adolescence.pdf
- Cohen, J. R., Asarnow, R. F., Sabb, F. W., Bilder, R. M., Bookheimer, S. Y., Knowlton, B. J. et Poldrack, R. A. (2010). A unique adolescent response to reward prediction errors. *Nature Neuroscience*, 13(6), 669–671. <https://doi.org/10.1038/nn.2558>
- Crone, E. A. et Dahl, R. E. (2012). Understanding adolescence as a period of social-affective engagement and goal flexibility. *Nature Reviews Neuroscience*, 13(9), 636–650. <https://doi.org/10.1038/nrn3313>
- Crone, E. A. et Steinbeis, N. (2017). Neural perspectives on cognitive control development during childhood and adolescence. *Trends in Cognitive Sciences*, 21(3), 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2017.01.003>
- Dahl, R. E. (2004). Adolescent brain development: A period of vulnerabilities and opportunities. Keynote address. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1021(1), 1–22. <https://doi.org/10.1196/annals.1308.001>
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology*, 64(1), 135–168. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- Duell, N., Steinberg, L., Icenogle, G., Chein, J., Chaudhary, N., Di Giunta, L., ... et Chang, L. (2018). Age patterns in risk taking across the world. *Journal of Youth and Adolescence*, 47(5), 1052–1072. <https://doi.org/10.1007/s10964-017-0752-y>
- Dumontheil, I. (2014). Development of abstract thinking during childhood and adolescence: The role of rostralateral prefrontal cortex. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 10, 57–76. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2014.07.009>
- Dumontheil, I. (2016). Adolescent brain development. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 10, 39–44. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.04.012>
- Dumontheil, I., Apperly, I. A. et Blakemore, S.-J. (2010). Online usage of theory of mind continues to develop in late adolescence. *Developmental Science*, 13(2), 331–338. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00888.x>
- Dumontheil, I. et Mareschal, D. (2020). An introduction to brain and cognitive development - the key concepts you need to know. Dans M. S. C. Thomas, D. Mareschal et I. Dumontheil (dir.), *Educational Neuroscience: Development Across the Life Span*. New York, NY et Londres, Royaume-Uni : Routledge.
- Education Endowment Foundation. (2019). *Metacognition and self-regulated learning*. Guidance Report. En ligne : https://educationendowmentfoundation.org.uk/public/files/Publications/Metacognition/EEF_Metacognition_and_self-regulated_learning.pdf

- Gardner, M. et Steinberg, L. (2005). Peer influence on risk taking, risk preference, and risky decision making in adolescence and adulthood: An experimental study. *Developmental Psychology*, 41(4), 625–635. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.41.4.625>
- Garnefski, N., Kraaij, V. et van Etten, M. (2005). Specificity of relations between adolescents' cognitive emotion regulation strategies and Internalizing and Externalizing psychopathology. *Journal of Adolescence*, 28(5), 619–631. <https://doi.org/10.1016/j.adolescence.2004.12.009>
- Gathercole, S. E. et Alloway, T. P. (2013). *Understanding working memory: A classroom guide*. Londres, Royaume-Uni : Hartcourt Assessment.
- Goddings, A.-L., Burnett Heyes, S., Bird, G., Viner, R. M. et Blakemore, S.-J. (2012). The relationship between puberty and social emotion processing. *Developmental Science*, 15(6), 801–811. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2012.01174.x>
- Goddings, A.-L., Mills, K. L., Clasen, L. S., Giedd, J. N., Viner, R. M. et Blakemore, S.-J. (2014). The influence of puberty on subcortical brain development. *NeuroImage*, 88, 242–251. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.09.073>
- Gogtay, N., Giedd, J. N., Lusk, L., Hayashi, K. M., Greenstein, D., Vaituzis, A. C., ... et Thompson, P. M. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(21), 8174–8179. <https://doi.org/10.1073/pnas.0402680101>
- Gross, J. J. (1998). Antecedent- and response-focused emotion regulation: Divergent consequences for experience, expression, and physiology. *Journal of Personality and Social Psychology*, 74(1), 224–237. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.74.1.224>
- Gross, J. J. (2015). Emotion regulation: Current status and future prospects. *Psychological Inquiry*, 26(1), 1–26. <https://doi.org/10.1080/1047840x.2014.940781>
- Hare, T. A., Tottenham, N., Galvan, A., Voss, H. U., Glover, G. H. et Casey, B. J. (2008). Biological substrates of emotional reactivity and regulation in adolescence during an emotional Go-Nogo task. *Biological Psychiatry*, 63(10), 927–934. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2008.03.015>
- Heiy, J. E. et Cheavens, J. S. (2014). Back to basics: A naturalistic assessment of the experience and regulation of emotion. *Emotion*, 14(5), 878–891. <https://doi.org/10.1037/a0037231>
- Herting, M. M., Maxwell, E. C., Irvine, C. et Nagel, B. J. (2012). The impact of sex, puberty, and hormones on white matter microstructure in adolescents. *Cerebral Cortex*, 22(9), 1979–1992. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhr246>
- Howard-Jones, P. A. et Jay, T. (2016). Reward, learning and games. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 10, 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.04.015>
- Huizinga, M., Dolan, C. V et van der Molen, M. W. (2006). Age-related change in executive function: Developmental trends and a latent variable analysis. *Neuropsychologia*, 44(11), 2017–2036. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.01.010>
- Humphrey, G. et Dumontheil, I. (2016). Development of risk-taking, perspective-taking, and inhibitory control during adolescence. *Developmental Neuropsychology*, 41(1–2), 59–76. <https://doi.org/10.1080/87565641.2016.1161764>
- Huttenlocher, P. R. et Dabholkar, A. S. (1997). Regional differences in synaptogenesis in human cerebral cortex. *Journal of Comparative Neurology*, 387(2), 167–178. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9861\(19971020\)387:2%3C167::aid-cne1%3E3.0.co;2-z](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9861(19971020)387:2%3C167::aid-cne1%3E3.0.co;2-z)
- Jenkins, R., Shen, C., Dumontheil, I., Thomas, M., Rösli, M., Elliott, P. et Toledano, M. (2019). Social networking site use in young adolescents: Association with health-related quality of life and behavioural difficulties. *Environmental Epidemiology*, 3, 364. <https://doi.org/10.1097/01.EE9.0000610032.81006.6f>
- Kessler, R. C., Berglund, P., Demler, O., Jin, R., Merikangas, K. R. et Walters, E. E. (2005). Lifetime prevalence and age-of-onset distributions of DSM-IV disorders in the National Comorbidity Survey Replication. *Archives of General Psychiatry*, 62(6), 593–602. <https://doi.org/10.1001/archpsyc.62.6.593>
- Knoll, L. J., Magis-Weinberg, L., Speekenbrink, M. et Blakemore, S.-J. (2015). Social influence on risk perception during adolescence. *Psychological Science*, 26(5), 583–592. <https://doi.org/10.1177/0956797615569578>
- Lebel, C. et Beaulieu, C. (2011). Longitudinal development of human brain wiring continues from childhood into adulthood. *Journal of Neuroscience*, 31(30), 10937–10947. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.5302-10.2011>
- Lee, K., Bull, R. et Ho, R. M. H. (2013). Developmental changes in executive functioning. *Child Development*, 84(6), 1933–1953. <https://doi.org/10.1111/cdev.12096>
- Lewis, M., Shapland, F. et Watts, R. (2016). On the threshold of adulthood: A new approach for the use of maturation indicators to assess puberty in adolescents from medieval England. *American Journal of Human Biology*, 28(1), 48–56. <https://doi.org/10.1002/ajhb.22761>
- Logue, S., Chein, J., Gould, T., Holliday, E. et Steinberg, L. (2014). Adolescent mice, unlike adults, consume more alcohol in the presence of peers than alone. *Developmental Science*, 17(1), 79–85. <https://doi.org/10.1111/desc.12101>
- Luciana, M., Collins, P. F., Olson, E. A. et Schissel, A. M. (2009). Tower of London performance in healthy adolescents: The development of planning skills and associations with self-reported inattention and impulsivity. *Developmental Neuropsychology*, 34(4), 461–475. <https://doi.org/10.1080/87565640902964540>

- Magis-Weinberg, L., Ruud, C. et Dumontheil, I. (2020). Sustained and transient processes in event-based prospective memory in adolescence and adulthood. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 32(10), 1924-1945. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01604
- Martin, R. E. et Ochsner, K. N. (2016). The neuroscience of emotion regulation development: Implications for education. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 10, 142-148. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.06.006>
- Master, S. L., Eckstein, M. K., Gotlieb, N., Dahl, R., Willbrecht, L. et Collins, A. G. E. (2020). Distangling the systems contributing to changes in learning during adolescence. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 41, 100732. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2019.100732>
- Menzies, L., Goddings, A.-L., Whitaker, K. J., Blakemore, S.-J. et Viner, R. M. (2015). The effects of puberty on white matter development in boys. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 11, 116-128. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2014.10.002>
- Mills, K. L., Goddings, A.-L., Herting, M. M., Meuwese, R., Blakemore, S.-J., Crone, E. A., ... et Tamnes, C. K. (2016). Structural brain development between childhood and adulthood: Convergence across four longitudinal samples. *NeuroImage*, 141, 273-281. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.07.044>
- Mireku, M. O., Barker, M. M., Mutz, J., Dumontheil, I., Thomas, M. S. C., Röösli, M., ... et Toledano, M. B. (2019). Night-time screen-based media device use and adolescents' sleep and health-related quality of life. *Environment International*, 124, 66-78. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.11.069>
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A. et Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "Frontal Lobe" tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49-100. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>
- Nguyen, T.-V., McCracken, J., Ducharme, S., Botteron, K. N., Mahabir, M., Johnson, W., ... et Karama, S. (2013). Testosterone-related cortical maturation across childhood and adolescence. *Cerebral Cortex*, 23(6), 1424-1432. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhs125>
- Paluck, E. L., Shepherd, H. et Aronow, P. M. (2016). Changing climates of conflict: A social network experiment in 56 schools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(3), 566-571. <https://doi.org/10.1073/pnas.1514483113>
- Pandey, A., Hale, D., Das, S., Goddings, A.-L., Blakemore, S.-J. et Viner, R. M. (2018). Effectiveness of universal self-regulation-based interventions in children and adolescents. *JAMA Pediatrics*, 172(6), 566. <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2018.0232>
- Paus, T., Keshavan, M. et Giedd, J. N. (2008). Why do many psychiatric disorders emerge during adolescence? *Nature Reviews Neuroscience*, 9(12), 947-957. <https://doi.org/10.1038/nrn2513>
- Petanjek, Z., Judas, M., Kostovic, I. et Uylings, H. B. M. (2008). Lifespan alterations of basal dendritic trees of pyramidal neurons in the human prefrontal cortex: A layer-specific pattern. *Cerebral Cortex*, 18(4), 915-929. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhm124>
- Powers, A. et Casey, B. J. (2015). The adolescent brain and the emergence and peak of psychopathology. *Journal of Infant, Child, and Adolescent Psychotherapy*, 14(1), 3-15. <https://doi.org/10.1080/15289168.2015.1004889>
- Rapee, R. M., Oar, E. L., Johnco, C. J., Forbes, M. K., Fardouly, J., Magson, N. R. et Richardson, C. E. (2019). Adolescent development and risk for the onset of social-emotional disorders: A review and conceptual model. *Behaviour Research and Therapy*, 123, 103501. <https://doi.org/10.1016/j.brat.2019.103501>
- Raznahan, A., Lee, Y., Stidd, R., Long, R., Greenstein, D., Clasen, L. ... et Giedd, J. N. (2010). Longitudinally mapping the influence of sex and androgen signaling on the dynamics of human cortical maturation in adolescence. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(39), 16988-16993. <https://doi.org/10.1073/pnas.1006025107>
- Ryan, A. M. (2001). The peer group as a context for the development of young adolescent motivation and achievement. *Child Development*, 72(4), 1135-1150. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00338>
- Sebastian, C. L., Fontaine, N. M. G., Bird, G., Blakemore, S.-J., De Brito, S. A., McCrory, E. J. P. et Viding, E. (2012). Neural processing associated with cognitive and affective Theory of Mind in adolescents and adults. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 7(1), 53-63. <https://doi.org/10.1093/scan/nsr023>
- Sebastian, C. L., Tan, G. C. Y., Roiser, J. P., Viding, E., Dumontheil, I. et Blakemore, S.-J. (2011). Developmental influences on the neural bases of responses to social rejection: Implications of social neuroscience for education. *NeuroImage*, 57(3), 686-694. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.09.063>
- Sebastian, C. L., Viding, E., Williams, K. D. et Blakemore, S.-J. (2010). Social brain development and the affective consequences of ostracism in adolescence. *Brain and Cognition*, 72(1), 134-145. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2009.06.008>
- Shaw, P., Kabani, N. J., Lerch, J. P., Eckstrand, K., Lenroot, R., Gogtay, N., ... et Wise, S. P. (2008). Neurodevelopmental trajectories of the human cerebral cortex. *Journal of Neuroscience*, 28(14), 3586-3594. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.5309-07.2008>

- Silk, J. S., Steinberg, L. et Morris, A. S. (2003). Adolescents' emotion regulation in daily life: Links to depressive symptoms and problem behavior. *Child Development*, 74(6), 1869–1880. <https://doi.org/10.1046/j.1467-8624.2003.00643.x>
- Smith, A. R., Steinberg, L., Strang, N. et Chein, J. (2015). Age differences in the impact of peers on adolescents' and adults' neural response to reward. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 11, 75–82. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2014.08.010>
- Somerville, L. H. et Casey, B. J. (2010). Developmental neurobiology of cognitive control and motivational systems. *Current Opinion in Neurobiology*, 20(2), 236–241. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2010.01.006>
- Somerville, L. H., Hare, T. et Casey, B. J. (2011). Frontostriatal maturation predicts cognitive control failure to appetitive cues in adolescents. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(9), 2123–2134. <https://doi.org/10.1162/jocn.2010.21572>
- Steinberg, L. (2005). Cognitive and affective development in adolescence. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(2), 69–74. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.12.005>
- Steinberg, L. (2008). A social neuroscience perspective on adolescent risk-taking. *Developmental Review*, 28(1), 78–106. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2007.08.002>
- Steinberg, L., Albert, D., Cauffman, E., Banich, M., Graham, S. et Woolard, J. (2008) Age differences in sensation seeking and impulsivity as indexed by behavior and self-report: Evidence for a dual systems model. *Developmental Psychology*, 44(6), 1764–1778. <https://doi.org/10.1037/a0012955>
- Steinberg, L., Icenogle, G., Shulman, E. P., Breiner, K., Chein, J., Bacchini, D., ... et Takash, H. M. S. (2018). Around the world, adolescence is a time of heightened sensation seeking and immature self-regulation. *Developmental Science*, 21(2), e12532. <https://doi.org/10.1111/desc.12532>
- Symeonidou, I., Dumontheil, I., Chow, W.-Y. et Breheny, R. (2016). Development of online use of theory of mind during adolescence: An eye-tracking study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 149, 81–97. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.11.007>
- Tamm, L., Menon, V. et Reiss, A. L. (2002). Maturation of brain function associated with response inhibition. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 41(10), 1231–1238. <https://doi.org/10.1097/00004583-200210000-00013>
- Tamnes, C. K., Østby, Y., Walhovd, K. B., Westlye, L. T., Due-Tønnessen, P. et Fjell, A. M. (2010). Neuroanatomical correlates of executive functions in children and adolescents: A magnetic resonance imaging (MRI) study of cortical thickness. *Neuropsychologia*, 48(9), 2496–2508. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.04.024>
- Telzer, E. H. (2016). Dopaminergic reward sensitivity can promote adolescent health: A new perspective on the mechanism of ventral striatum activation. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 17, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2015.10.010>
- Telzer, E. H., van Hoorn, J., Rogers, C. R. et Do, K. T. (2018) Social influence on positive youth development: A developmental neuroscience perspective. *Advances in Child Development and Behavior*, 54, 215–258. <https://doi.org/10.1016/bs.acdb.2017.10.003>
- Thomas, M. S. C. et Johnson, M. H. (2008). New advances in understanding sensitive periods in brain development. *Current Directions in Psychological Science*, 17(1), 1–5. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8721.2008.00537.x>
- Vijayakumar, N., Pfeifer, J. H., Flournoy, J. C., Hernandez, L. M. et Dapretto, M. (2019). Affective reactivity during adolescence: Associations with age, puberty and testosterone. *Cortex*, 117, 336–350. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2019.04.024>
- Weil, L. G., Fleming, S. M., Dumontheil, I., Kilford, E. J., Weil, R. S., Rees, G., ... et Blakemore, S.-J. (2013). The development of metacognitive ability in adolescence. *Consciousness and Cognition*, 22(1), 264–271. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2013.01.004>
- Wentzel, K. R., Barry, C. M. et Caldwell, K. A. (2004). Friendships in middle school: Influences on motivation and school adjustment. *Journal of Educational Psychology*, 96(2), 195–203. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.96.2.195>
- Williams, K. D., Cheung, C. K. T. et Choi, W. (2000). Cyberostracism: Effects of being ignored over the internet. *Journal of Personality and Social Psychology*, 79(5), 748–762. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.79.5.748>
- Willoughby, T., Good, M., Adachi, P. J. C., Hamza, C. et Tavernier, R. (2013). Examining the link between adolescent brain development and risk taking from a social-developmental perspective. *Brain and Cognition*, 83(3), 315–323. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2013.09.008>
- Wolf, L. K., Bazargani, N., Kilford, E. J., Dumontheil, I. et Blakemore, S.-J. (2015). The audience effect in adolescence depends on who's looking over your shoulder. *Journal of Adolescence*, 43, 5–14. <https://doi.org/10.1016/j.adolescence.2015.05.003>
- Young, K., Sandman, C. et Craske, M. (2019). Positive and negative emotion regulation in adolescence: Links to anxiety and depression. *Brain Sciences*, 9(4), 76. <https://doi.org/10.3390/brainsci9040076>
- Zelazo, P. D. et Carlson, S. M. (2012). Hot and cool executive function in childhood and adolescence: Development and plasticity. *Child Development Perspectives*, 6(4), 354–360. <https://doi.org/10.1111/j.1750-8606.2012.00246.x>

- Zhou, D., Lebel, C., Treit, S., Evans, A. et Beaulieu, C. (2015). Accelerated longitudinal cortical thinning in adolescence. *NeuroImage*, 104, 138-145.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.10.005>
- Ziermans, T., Dumontheil, I., Roggeman, C., Peyrard-Janvid, M., Matsson, H., Kere, J. et Klingberg, T. (2012). Working memory brain activity and capacity link MAOA polymorphism to aggressive behavior during development. *Translational Psychiatry*, 2(2), e85.
<https://doi.org/10.1038/tp.2012.7>
- Zuckerman, M. (1994). *Behavioral expressions and biosocial bases of sensation seeking*. Cambridge, Royaume-Uni : Cambridge University Press.