

Université de Montréal

**Associations longitudinales entre la qualité du lien d'attachement mère-enfant, la
morphologie du cerveau et le fonctionnement socio-émotionnel de l'enfant**

Par

Élizabel Leblanc

Département de psychologie, Faculté des arts et des sciences

Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.)
en psychologie, option neuropsychologie clinique

Février 2022

© Elizabel Leblanc, 2022

Université de Montréal

Département de psychologie, Faculté des arts et des sciences

Cette thèse intitulée

**Associations longitudinales entre la qualité du lien d'attachement mère-enfant, la
morphologie du cerveau et le fonctionnement socio-émotionnel de l'enfant**

Présentée par

Élizabeth Leblanc

A été évaluée par un jury composé des personnes suivantes

Sébastien Héту
Président-rapporteur

Annie Bernier
Directrice de recherche

Miriam Beauchamp
Codirectrice de recherche

Simona Brambati
Membre du jury

Jean-François Lepage
Examineur externe

Résumé

La théorie de l'attachement a donné lieu à un nombre considérable d'études démontrant l'importance de l'attachement parent-enfant pour le développement des enfants. Néanmoins, les associations entre la qualité des liens d'attachement parent-enfant et la morphologie du cerveau demeurent largement inexplorées. L'objectif général de la thèse est d'étudier les associations longitudinales entre la qualité de la relation d'attachement mère-enfant durant la petite enfance et la morphologie du cerveau à la fin de l'enfance. La thèse est composée de deux articles empiriques.

Le premier article examine les associations entre la sécurité d'attachement à l'âge de 15 mois et la morphologie du cerveau (volume de matière grise et épaisseur corticale) à l'âge de 10 ans. Les résultats indiquent que les enfants ayant évolué au sein d'une relation d'attachement mère-enfant plus sécuritaire dans la petite enfance présentent des volumes de matière grise plus élevés à la fin de l'enfance dans l'hémisphère droit dans les régions du gyrus temporal supérieur, du sulcus temporal supérieur, de la jonction temporo-pariétale et du gyrus précentral à la fin de l'enfance. La sécurité d'attachement dans la petite enfance n'est pas liée significativement à l'épaisseur corticale régionale à la fin de l'enfance.

Le deuxième article examine les associations entre la désorganisation d'attachement à l'âge de 18 mois, la morphologie du cerveau (volume de matière grise et épaisseur corticale) à l'âge de 10 ans et le fonctionnement socio-émotionnel (rejet par les pairs) à l'âge de 11 ans. Les résultats indiquent que les enfants qui montrent plus de comportements d'attachement désorganisés vis-à-vis de leur mère dans la petite enfance présentent une épaisseur corticale plus élevée dans les régions des gyrus frontaux supérieurs et moyens bilatéralement, ainsi que du

gyrus frontal inférieur, du cortex orbitofrontal et de l'insula dans l'hémisphère droit à la fin de l'enfance. Les enfants ayant une épaisseur corticale plus élevée dans ces régions vivent plus de rejet par les pairs un an plus tard. La désorganisation d'attachement dans la petite enfance n'est pas liée au volume de matière grise régionale à la fin de l'enfance.

Suite à ces deux articles, la discussion de la thèse aborde, entre autres, certains mécanismes selon lesquels la qualité des relations d'attachement, la morphologie du cerveau et le fonctionnement socio-émotionnel pourraient être interreliés.

Mots-clés: attachement, petite enfance, enfance, cerveau social, développement du cerveau, fonctionnement socio-émotionnel, relation avec les pairs, imagerie par résonance magnétique, épaisseur corticale, volume de matière grise.

Abstract

Attachment theory has given rise to a large body of research demonstrating the importance of parent–child attachment for child development. However, studies linking attachment quality to brain morphology are scarce. The main objective of this thesis is to examine the associations between mother–child attachment relationship quality in infancy and brain morphology in late childhood. The thesis includes two empirical articles.

The first article examines the associations between mother–infant attachment security at 15 months and whole-brain gray matter volume and thickness when children are 10 years old. Results indicated that children more securely attached to their mother in infancy had larger grey matter volumes in the superior temporal sulcus and gyrus, temporo-parietal junction, and precentral gyrus in late childhood. No associations between attachment security and cortical thickness were found.

The second article examines the links between infants’ disorganized attachment behaviors toward their mothers at 18 months, whole-brain regional grey matter volume and thickness at 10 years, and socioemotional functioning (peer rejection) at 11 years of age. Results indicated that children who exhibited more disorganized attachment behaviors in infancy had significantly thicker cortices in bilateral middle and superior frontal gyri, and extending to the orbitofrontal and insular cortices in the right hemisphere in late childhood. Moreover, children with thicker cortices in these regions experienced greater peer rejection, as rated by themselves and their teachers. Disorganized attachment was not associated with grey matter volumes.

The thesis discussion addresses mechanisms through which attachment relationship quality, brain morphology, and socioemotional functioning could be interrelated.

Keywords: attachment, infancy, childhood, social brain, brain development, socioemotional functioning, peer relationships, magnetic resonance imaging, cortical thickness, grey matter volume.

Résumé de vulgarisation

Cette thèse vise à mieux comprendre les associations entre la qualité des relations d'attachement parent-enfant, l'anatomie du cerveau de l'enfant et la qualité de ses relations sociales. Dans la petite enfance, les mères et leur enfant ont été rencontrés pour documenter la qualité de l'attachement mère-enfant. Pour ce faire, des évaluatrices formées ont observé les interactions mère-enfant dans différents contextes, en portant une attention particulière aux comportements de recherche de proximité de la part de l'enfant vis-à-vis de sa mère (que nous appelons les comportements d'attachement). À l'aide d'une grille de cotation, la fréquence et la durée des comportements d'attachement de l'enfant vis-à-vis de sa mère ont été comptabilisées : par exemple, certains enfants recherchent le contact physique, d'autres l'évitent; certains sont facilement consolés en situation de détresse, d'autres non.

Une dizaine d'années plus tard, les enfants ont été invités à participer à un scan d'imagerie par résonance magnétique (IRM), une technique qui permet d'obtenir des images de la structure du cerveau en toute sécurité. Le scanner utilise un aimant puissant afin de prendre des centaines de photos du cerveau qui peuvent ensuite être combinées pour obtenir une image du cerveau en trois dimensions. L'IRM permet ainsi de visualiser les différentes régions du cerveau et leur anatomie, notamment l'épaisseur du cortex, qui est le siège des fonctions cérébrales (traitement sensoriel, mémoire, langage, etc.). Un an après l'IRM, les enfants et leur professeur ont complété des questionnaires portant sur la qualité des relations de l'enfant avec ses pairs (relation amicale, inclusion/acceptation, exclusion).

Des analyses statistiques ont été effectuées pour vérifier les liens entre la qualité des relations d'attachement, l'anatomie du cerveau des enfants et la qualité des relations avec leurs pairs. Les résultats indiquent notamment que les enfants qui ont grandi dans une relation

d'attachement de meilleure qualité pendant la petite enfance présentent un cortex plus mince dans une région cérébrale impliquée dans le fonctionnement social et émotionnel (le « cortex orbitofrontal ») à l'âge de 10 ans. Un cortex plus mince peut signifier qu'il est plus spécialisé ou plus efficace. De plus, les enfants ayant un cortex orbitofrontal plus mince entretiennent de meilleures relations sociales avec leurs pairs. En somme, les expériences familiales précoces semblent influencer les expériences futures, via l'effet que ces premières expériences ont sur le cerveau.

Table des matières

RÉSUMÉ	III
ABSTRACT	V
RÉSUMÉ DE VULGARISATION	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX	XI
LISTE DES FIGURES	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XV
REMERCIEMENTS	XIX
CHAPITRE 1 – INTRODUCTION	21
1.1. LA THÉORIE DE L’ATTACHEMENT	22
1.1.1. <i>L’ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DE LA RELATION D’ATTACHEMENT PARENT-ENFANT</i>	24
1.1.2. <i>LES CONSÉQUENCES DÉVELOPPEMENTALES DES RELATIONS D’ATTACHEMENT</i>	28
1.2. LA NEUROIMAGERIE	29
1.2.1. <i>LES TRAJECTOIRES DE DÉVELOPPEMENT DU CERVEAU</i>	30
1.2.2. <i>L’INFLUENCE DE L’ENVIRONNEMENT SUR LE DÉVELOPPEMENT CÉRÉBRAL</i>	32
1.2.3. <i>LE CERVEAU SOCIAL</i>	34
1.3. LA QUALITÉ DE L’ENVIRONNEMENT DE SOINS, LA MORPHOLOGIE CÉRÉBRALE ET SON IMPACT FONCTIONNEL	38
1.3.1. <i>LA QUALITÉ DES COMPORTEMENTS PARENTAUX ET LA MORPHOLOGIE CÉRÉBRALE</i>	38
1.3.2. <i>LA QUALITÉ DES RELATIONS D’ATTACHEMENT ET LA MORPHOLOGIE CÉRÉBRALE</i>	42

1.3.3. <i>LA PORTÉE FONCTIONNELLE DES DIFFÉRENCES DE MORPHOLOGIE CÉRÉBRALE LIÉES À L'ENVIRONNEMENT DE SOINS</i>	44
1.4. OBJECTIFS DE LA THÈSE	45
<u>CHAPITRE 2 – PREMIER ARTICLE</u>	<u>47</u>
<u>CHAPITRE 3 – DEUXIÈME ARTICLE</u>	<u>96</u>
<u>CHAPITRE 4 – DISCUSSION</u>	<u>148</u>
4.1. RÉSUMÉ DES RÉSULTATS	148
4.2. MÉCANISMES EXPLICATIFS	152
4.3. LIMITES ET ÉTUDES FUTURES	157
4.4. RETOMBÉES SCIENTIFIQUES ET CLINIQUES	162
<u>CHAPITRE 5 – BIBLIOGRAPHIE</u>	<u>165</u>
<u>ANNEXE A</u>	<u>CLXXXVII</u>
<u>ANNEXE B</u>	<u>CXCVII</u>
<u>ANNEXE C</u>	<u>CXCIX</u>
<u>ANNEXE D</u>	<u>CCI</u>

Liste des tableaux

CHAPITRE 2 – PREMIER ARTICLE

Tableau 1

Sociodemographic Information and Attachment Security Scores for Families who Accepted versus Declined Participation in the Magnetic Resonance Imaging (MRI) Protocol91

Tableau 2

Correlations between Attachment Security, Average Brain Volumetric Data, and Covariates.....92

Tableau 3

Regional Volumes Significantly Associated with Attachment Security in Infancy ($p < .05$, False Discovery Rate correction)93

CHAPITRE 3 – DEUXIÈME ARTICLE

Tableau 1

Socio-demographic Information, Attachment Scores, and Peer Rejection Scores for Children who Underwent the Magnetic Resonance Imaging (MRI) Exam ($n = 35$) and those who Declined ($n = 25$) or were not Eligible ($n = 4$) to participate in the MRI Exam143

Tableau 2

Areas of Regional Cortical Thickness Significantly Associated with Levels of Disorganized Attachment Behaviors in Infancy while Controlling for Attachment Security145

Tableau 3

*Areas of Regional Cortical Thickness Significantly Associated with Levels of
Disorganized Attachment Behaviors in Infancy, without Controlling for Attachment
Security*146

Tableau 4

Correlations among the Main Variables147

Liste des figures

CHAPITRE 1 – INTRODUCTION

Figure 1

Une représentation de l'épaisseur et de la surface corticale.....30

Figure 2

Une représentation des cinq réseaux neuronaux sous-tendant des processus importants pour les comportements sociaux36

CHAPITRE 2 – PREMIER ARTICLE

Figure 1

Association between Attachment Security in Infancy and GM Volume in Late Childhood94

CHAPITRE 3 – DEUXIÈME ARTICLE

Figure 1

Association between Levels of Disorganized Attachment Behaviors in Infancy and Cortical Thickness in Late Childhood while Controlling for Attachment Security139

Figure 2

Association between Levels of Disorganized Attachment Behaviors in Infancy and Cortical Thickness in Late Childhood, without Controlling for Attachment Security ...140

Figure 3

Scatterplots for Associations between the Main Variables141

CHAPITRE 4 – DISCUSSION

Figure 1

*Une représentation de la cascade développementale liant les relations d'attachement au
fonctionnement socio-émotionnel156*

Liste des sigles et abréviations

AngG : gyrus angulaire (jonction temporopariétal)

AQS : Attachment Behavior Q-Sort

BA = Brodmann area

cACC : cortex cingulaire antérieur caudal

CSF : cerebrospinal fluid

CT : cortical thickness

dmPFC : cortex préfrontal dorsomédial

dTP : pôle temporal dorsomédial

Ent : cortex entorhinal

FoV : field of view

FWHM : full-width-at-half- maximum

FDR : false discovery rate

FG : gyrus fusiforme

GM : grey matter

GMV : gray matter volume

ICC : intra-class correlation

ICV : intracranial volume

Ins : insula

IPS : sulcus intrapariétal

IRM : Imagerie par résonance magnétique

k = number of voxels

IOFC : cortex orbitofrontal latéral

M : Moyenne (*mean*)

MNI : Montreal Neurological Institute

MRI : magnetic resonance imaging

PCC : cortex cingulaire postérieur

PHip : cortex parahippocampique

Precun : précuneus

PreMC : cortex prémoteur

pSTS : sulcus temporal supérieur postérieur

rACC : cortex cingulaire antérieur rostral

SBM : surface-based morphometry

SD : Standard deviation

SSP : Strange Situation Procedure

STS : sulcus temporal supérieur

sgACC : cortex cingulaire antérieur subgénéral

SII : cortex somatosensoriel secondaire

SPM : Statistical Parametric Mapping

TE : echo time

TFCE : threshold-free cluster enhancement

TR : repetition time (TR)

VBM : voxel-based morphometry

vlSt : striatum ventrolatéral

vmPFC : cortex préfrontal ventromédial

vmSt : striatum ventromédial

vTP : pôle temporal ventrolatéral

WEIRD : Western, Educated, Industrialized, Rich, Democratic

WM : white matter

WMV : white matter volume

À mes figures d'attachement – mes parents,

Remerciements

Je remercie les familles qui ont accepté de participer au projet *Grandir Ensemble*, d'ouvrir la porte de leur demeure à mes collègues et moi, de donner de leur temps libre et de nous permettre de voir grandir leurs enfants à travers les années.

Je remercie ma directrice de recherche, Annie Bernier, et ma co-directrice de recherche, Miriam Beauchamp, qui ont cru en moi alors que je n'avais qu'une vague idée de ce qu'était le monde de la recherche en psychologie. Je les remercie d'être pour moi des modèles de réussite de femmes en sciences.

Je remercie mes superviseur.e.s de stage et d'internat qui m'ont accompagné dans la portion clinique de ce doctorat. Avec votre soutien, je me suis permis de me remettre en question et de surmonter les obstacles qui se sont présentés.

Je remercie mes collègues du laboratoire *Grandir Ensemble* avec qui j'ai passé de beaux moments autant entre les murs de l'université qu'à l'extérieur de ceux-ci, en plus d'avoir permis de rejoindre l'utile à l'agréable lors de nos présentations en congrès. Je remercie particulièrement Fanny Dégeilh, qui a été pour moi une excellente mentore dans l'apprentissage de l'analyse de données d'imagerie par résonance magnétique. Merci d'avoir été ma « grande sœur ».

Je remercie mes collègues du Groupe d'Intérêt en Neuropsychologie avec qui j'ai eu beaucoup de fous rires et de réflexions approfondies sur des sujets qui, sans vous, me seraient à ce jour inconnus. Je me compte de chanceuse de vous avoir.

Je remercie mes parents d'avoir toujours fait tout en leur pouvoir pour m'offrir le meilleur sur terre. Votre soutien s'est avéré un point ancrage pour mon épanouissement et je vous en serai éternellement reconnaissante.

Je remercie mes amies de longue date, mes BSFS, qui sont une constante dans ma vie depuis des années. Merci de vos encouragements, votre écoute et votre présence. Nos supersacoques m'ont souvent permis de me recentrer sur l'essentiel.

Le marathon qu'est le doctorat aurait été difficilement surmontable sans l'organisme Thèsez-Vous?, qui m'a permis de voir la lumière au bout du tunnel un objectif SMART à la fois, ainsi que le Mouvement Happy Fitness, qui m'a apporté mouvement et contentement. Je les remercie de tout cœur.

Je me compte également choyée d'avoir pu recevoir de l'appui financier tout au long de mon parcours doctoral de la part du Conseil de recherche en sciences humaines du Canada (CRSH), du Fonds québécois de recherche sur la santé (FRQS), du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), du département de psychologie, de la Faculté des Études Supérieures de l'Université de Montréal et de mes directrices de recherche.

Chapitre 1 – Introduction

La tendance d'un enfant à s'attacher à des figures parentales est innée. En effet, les comportements d'attachement visent à maintenir une proximité physique entre l'enfant et les adultes proches qui l'entourent (p. ex., ses parents, des éducateurs), favorisant ainsi sa protection et sa survie (Cassidy, 2016). Les associations entre la qualité des liens d'attachement parent-enfant durant la petite enfance et le fonctionnement socio-émotionnel subséquent de l'enfant sont largement établies (p. ex., Cooke et al., 2016, 2019; Deneault et al., 2021; Fearon et al., 2010; Groh et al., 2014, 2017; Madigan et al., 2013; Pallini et al., 2014, 2018). Selon certains auteurs, ces associations robustes suggèrent que les expériences vécues au sein des relations d'attachement, qui suscitent chez l'enfant l'utilisation de ses habiletés socio-cognitives et affectives, pourraient influencer la morphologie du cerveau dans les régions sous-tendant le fonctionnement socio-émotionnel (Gunnar et al., 2006; Tottenham, 2014). La morphologie du cerveau, ainsi façonnée par les relations d'attachement, pourrait en retour influencer le fonctionnement de l'enfant (Belsky & de Haan, 2011). Néanmoins, peu d'études ont examiné les associations entre les variations normatives de qualité de l'environnement de soins (*caregiving environment*) et la morphologie du cerveau des enfants et aucune ne s'est penchée sur les liens spécifiques entre 1) la qualité des relations d'attachement parent-enfant durant la petite enfance, 2) la morphologie du cerveau et 3) le fonctionnement socio-émotionnel durant l'enfance.

Dans cette introduction, nous aborderons dans un premier temps les concepts clés de la théorie de l'attachement, ainsi que les méthodes d'évaluation de l'attachement parent-enfant dans la petite enfance et ses corrélats. Puis, une brève revue du développement cérébral sera présentée, en plus d'une description des mécanismes par lesquels l'environnement familial pourrait en venir à influencer les trajectoires de développement cérébral et d'un portrait des régions plus précises

dont la morphologie est susceptible d'être liée à la qualité des liens d'attachement. Finalement, sera présentée une recension de la littérature portant sur les associations documentées à ce jour entre les variations normatives de la qualité de l'environnement de soins (comportements parentaux et attachement), la morphologie du cerveau et le fonctionnement subséquent de l'individu.

1.1. La théorie de l'attachement

Au début du vingtième siècle, les théoriciens de courant psychanalytique et comportemental postulaient que l'attachement entre un enfant et son parent était tout simplement dérivé de l'association qu'en vient à faire l'enfant entre le parent et la nourriture (*second-drive theory*; Cassidy, 2016). Les travaux de Harlow (1958) sont venus ébranler cette théorie de longue date en démontrant que les jeunes primates recherchaient le réconfort lors de moments de détresse auprès de figures parentales leur offrant un contact « chaleureux » plutôt qu'auprès de celles leur fournissant de la nourriture. Par la suite, dans un effort de proposer une nouvelle conceptualisation du lien d'attachement parent-enfant qui est détaillée dans la trilogie *Attachment and Loss* (1969/1982, 1973, 1980a), John Bowlby reprend le concept éthologique de « système comportemental » qui postule que l'humain viendrait au monde avec différents systèmes comportementaux. Un système comportemental peut être compris comme un ensemble de comportements organisés, ayant une même fonction, qui tendrait à favoriser la survie et l'évolution de l'espèce. Selon Bowlby, l'un de ces systèmes comportementaux serait le système d'attachement. Ce dernier s'activerait lorsque l'enfant perçoit une menace et mettrait en branle un répertoire de comportements d'attachement destinés à rechercher la proximité d'une figure adulte protectrice (Bowlby, 1969/1982). Les jeunes enfants posséderaient aussi un système comportemental d'exploration qui leur conférerait une motivation innée à explorer l'environnement et donc à en apprendre plus sur le monde qui les entoure et à développer leurs

compétences, ce qui, selon une perspective éthologique, confère également à l'espèce un avantage évolutif.

Une autre figure importante de la théorie de l'attachement est Mary Salter Ainsworth qui a appliqué les principes éthologiques amenés par Bowlby comme cadre conceptuel dans l'observation des interactions de la vie quotidienne entre les mères et leurs enfants. Ses travaux soulignent l'importance de l'*équilibre* entre les systèmes comportementaux d'attachement et d'exploration. Selon Ainsworth (1972), la manière selon laquelle l'enfant utilise sa figure d'attachement comme « base de sécurité » nous informe sur la qualité ou la sécurité de la relation d'attachement parent-enfant. Ainsi, un enfant qui est à l'aise d'explorer un environnement nouveau et de s'éloigner de sa figure d'attachement pour jouer, mais qui recherche la proximité de celle-ci lorsqu'il est face à une situation de détresse (se blesser en jouant; être face à un étranger ou un jouet apeurant), pour ensuite retourner à l'exploration après avoir été réconforté, démontre un équilibre approprié entre les comportements d'attachement et d'exploration. Ainsworth et al. (1978) décrivent que cet équilibre entre les comportements d'attachement et d'exploration est adaptatif sur le plan de l'évolution et caractérise une relation d'attachement qui est dite *sécuré*. Selon les observations d'Ainsworth, d'autres enfants présentent un déséquilibre entre les comportements d'attachement et d'exploration qui tend à favoriser davantage un système comportemental plutôt que l'autre. Dans une relation d'attachement *insécure-évitante*, le déséquilibre est en faveur de l'exploration, au détriment de la recherche de proximité avec la figure d'attachement. Ce patron d'attachement peut être vu comme une adaptation à un environnement de soins qui est généralement perçu par l'enfant comme rejetant. Dans une relation d'attachement *insécure-résistante/ambivalente*, le déséquilibre penche du côté de la recherche de proximité au détriment de l'exploration, et ceci peut être vu comme une adaptation à

un environnement de soins qui ne répondrait pas de manière cohérente aux signaux d'attachement de l'enfant (Ainsworth et al., 1978).

Finalement, Main et Solomon (1986) ont décrit un quatrième patron d'attachement, dit *désorganisé*. Les enfants évoluant dans une relation d'attachement désorganisée semblent confus par rapport à quels comportements adoptés lorsqu'ils recherchent la proximité de leur figure d'attachement et ils peuvent parfois montrer une réaction de peur face à celle-ci, particulièrement à des moments où il est attendu que leur système d'attachement soit activé. La nature même des comportements d'attachement désorganisés (c.-à-d. contradictoire; p. ex., un enfant qui recule tout en tendant les bras à sa figure d'attachement) suggère une perturbation du système d'attachement dans sa capacité à mettre en place des comportements visant à rechercher la proximité de la figure d'attachement en situation de détresse (Hesse & Main, 2000).

En somme, la théorie de l'attachement s'inscrit dans une perspective éthologique et soutient que l'être humain naît avec un ensemble de systèmes comportementaux. Tout en étant innés, ces systèmes sont façonnés par l'environnement et auraient eu pour fonction, à long terme, de favoriser la survie de l'espèce. L'équilibre entre les systèmes d'attachement et d'exploration nous informe sur la qualité ou la sécurité des relations d'attachement.

1.1.1. *L'évaluation de la qualité de la relation d'attachement parent-enfant*

Lorsque le système d'attachement d'un enfant est activé, il déploie une variété de comportements visant à atteindre la proximité avec sa figure d'attachement. Par exemple, certains comportements d'attachement comme les sourires et les vocalisations encouragent la figure d'attachement à accorder son attention au nourrisson et à s'en rapprocher. D'autres comportements d'attachement sont aversifs (pleurs, cris) et amènent le parent à agir pour qu'ils cessent. Le nourrisson peut également rechercher activement la proximité de sa figure d'attachement en s'en approchant ou en la suivant lorsqu'elle s'éloigne. Certaines procédures

d'évaluation ont donc été conçues pour activer le système d'attachement et permettre l'observation des comportements de l'enfant envers sa figure d'attachement.

Ils existent deux procédures classiques pour évaluer la qualité des relations d'attachement parent-enfant durant la petite enfance : la procédure de la Situation étrangère (*Strange Situation Procedure*; Ainsworth et al., 1978) et le tri de cartes d'attachement (*Attachment Q-set*; Waters & Deane, 1985). La Situation étrangère (Ainsworth et al., 1978) est une procédure de laboratoire qui permet la manipulation systématique de l'activation des systèmes d'attachement et d'exploration par l'exposition à des stimuli nouveaux et modérément stressants pour l'enfant (p. ex., la séparation parent-enfant, le contact avec un étranger) à travers huit épisodes de trois minutes. La procédure permet l'observation de l'équilibre dynamique chez l'enfant entre les systèmes d'attachement et d'exploration et nous informe sur le patron d'attachement caractérisant la relation entre l'enfant et cette figure adulte (c.-à-d., classification sécuritaire, insécure-évitante, insécure résistante/ambivalente, désorganisée). Des scores dimensionnels sont également disponibles pour qualifier les comportements de l'enfant pendant la Situation étrangère (évitement, résistance, désorganisation, recherche de proximité, maintien du contact). D'un autre côté, le tri de cartes d'attachement (Waters & Deane, 1985) est utilisé pour mesurer la qualité ou la sécurité des comportements d'attachement d'un enfant envers sa figure d'attachement dans un environnement familial comme le domicile familial. Un avantage de cette méthode est qu'elle permet de quantifier les fines variations inter-individuelles sur un continuum allant de la sécurité à l'insécurité d'attachement, plutôt que de forcer la classification des enfants dans un patron d'attachement en particulier. En revanche, cette procédure ne nous informe pas sur les comportements d'attachement désorganisés, qui peuvent être observés lors des épisodes de séparation et de réunion parent-enfant de la Situation étrangère. Elle ne permet

pas non plus de faire la distinction entre un enfant qui présenterait plus de comportements insécures-évitants ou insécures-résistants.

La majorité des études portant sur l'attachement parent-enfant dans la petite enfance ont utilisé la Situation étrangère (et non le tri de cartes) et très peu de ces études ont utilisé les échelles continues pourtant disponibles avec la Situation étrangère. Par exemple, la méta-analyse de Fearon et al. (2010) portant sur l'attachement parent-enfant et les comportements externalisés indiquent que 43 études ont utilisé la Situation étrangère, en comparaison à seulement sept qui ont utilisé le tri de cartes d'attachement. Conséquemment, la plupart des études en attachement ont classifié les dyades parent-enfant selon les différentes catégories (attachement sécure, insécure-évitant, insécure résistant/ambivalent, désorganisé). Néanmoins, la question selon laquelle les différences inter-individuelles sont distribuées de manière continue ou catégorielle est vastement débattue en psychologie (Haslam, 2019; Liu, 2016), notamment en ce qui concerne l'attachement (Cummings, 2003; Fraley et al., 2015; Fraley & Spieker, 2003a, 2003b; Waters et al., 2019). À cet égard, les analyses taxométriques — qui permettent de déterminer si un construit se décline en des entités distinctes (classifications, groupes) ou plutôt sur un continuum — suggèrent que les différences individuelles sur le plan de l'attachement parent-enfant se conçoivent mieux à travers une perspective dimensionnelle que catégorielle (Fraley & Spieker, 2003a). Les scores d'attachement dimensionnels permettent de quantifier des variations fines entre les individus et réduisent les erreurs de mesure liées au choix d'une classification précise chez les enfants qui peuvent présenter dans la réalité des comportements de sécurité, de résistance, d'évitement et de désorganisation à divers degrés (Deneault et al., 2020). De plus, les scores d'attachement dimensionnels augmentent la puissance statistique (Deneault et al., 2020) et procurent une meilleure prédiction du fonctionnement de l'enfant que les scores catégoriels (Pallini et al., 2018).

Par ailleurs, tant le tri de cartes d'attachement que la Situation étrangère présentent de bonnes propriétés psychométriques. Notamment, une étude indique que les scores dimensionnels de la Situation étrangère montrent une bonne validité discriminante pour identifier la classification d'attachement des dyades mère-enfant (Simonelli et al., 2014). De plus, le score dimensionnel de désorganisation d'attachement, plus particulièrement, montre une bonne validité de construit, ainsi qu'une bonne validité prédictive, puisque ce score est associé dans la direction attendue aux comportements parentaux dans la petite enfance, à la résilience socio-émotionnelle de l'enfant, au développement de la psychopathologie, aux niveaux de cortisol, aux représentations mentales du *parenting*, et à la qualité des relations subséquentes avec la mère et les pairs (Bernard & Dozier, 2010; Carlson, 1998; Huber et al., 2015a, 2015b; Rifkin-Graboi et al., 2019). En ce qui concerne le tri de cartes d'attachement, deux méta-analyses indiquent que cette mesure présente une excellente validité de construit, puisque les scores d'attachement convergent avec les scores de sensibilité maternelle, de sécurité d'attachement mesurée avec la Situation étrangère et d'adaptation socio-émotionnelle de l'enfant (Cadman et al., 2017; Van IJzendoorn et al., 2004). Le tri de cartes d'attachement a également une bonne validité discriminante étant donné que le score de sécurité d'attachement issu de cette mesure est seulement modérément corrélé au tempérament (Cadman et al., 2017; Van IJzendoorn et al., 2004). Les données méta-analytiques soulignent que la stabilité entre le score de sécurité du tri de cartes d'attachement à différent temps de mesure est de $r = .41$ (Cadman et al., 2017). Finalement, tant le tri de cartes d'attachement que la Situation étrangère présentent une bonne fiabilité d'entente inter-juges lorsque les codificateurs sont dûment formés (Cadman et al., 2017; Simonelli, 2014).

Donc, autant le score dimensionnel de désorganisation d'attachement tiré de la Situation étrangère que le score de sécurité du tri de cartes d'attachement apparaissent comme des mesures

valides de la qualité de la relation parent-enfant. Étant donné leurs avantages tant sur le plan conceptuel que méthodologique, les scores dimensionnels de sécurité d'attachement (telle que mesurée par le tri de cartes d'attachement) et de désorganisation d'attachement (telle que mesurée par la Situation étrangère) sont utilisés dans cette thèse.

1.1.2. *Les conséquences développementales des relations d'attachement*

La venue de mesures standardisées de la qualité des relations d'attachement parent-enfant a permis d'examiner empiriquement les hypothèses de la théorie de l'attachement. À cet égard, l'un des principes fondamentaux de cette théorie est que la qualité des relations d'attachement précoces soit d'une grande importance pour le développement socio-émotionnel de l'enfant et particulièrement pour le développement de ses relations sociales (Ainsworth, 1967). Le fonctionnement socio-émotionnel est un construit hétérogène qui rassemble divers comportements liés au développement social et affectif (Thompson, 1988). Chez l'enfant, un bon fonctionnement socio-émotionnel se manifeste par plus de comportements prosociaux, moins de problèmes relationnels avec les pairs, ainsi que moins de problèmes comportementaux intériorisés (p. ex. anxiété, dépression) et extériorisés (p. ex. agressivité). De nombreuses études longitudinales, quoique non-expérimentales, ont ainsi eu pour objectif de prédire le fonctionnement socio-émotionnel à partir des différences individuelles de qualité des relations d'attachement parent-enfant. Les études méta-analytiques démontrent que les enfants ayant des relations d'attachement sécurisées durant la petite enfance, tel que mesuré par le tri de cartes d'attachement ou la Situation étrangère, présentent un meilleur fonctionnement socio-émotionnel subséquent: ils ont de meilleures compétences sociales (Groh et al., 2014, 2017), plus de facilité à comprendre les émotions (Cooke et al., 2016, 2019), de meilleures capacités de régulation émotionnelle (Pallini et al., 2018), des relations de meilleure qualité avec leurs pairs (Pallini et

al., 2014) et moins de troubles de comportements intériorisés (Deneault et al., 2021; Groh et al., 2012, 2017; Madigan et al., 2013) et extériorisés (Deneault et al., 2021; Fearon et al., 2010; Groh et al., 2017).

En prenant appui sur les nombreuses études empiriques démontrant l'importance de la qualité des relations d'attachement sur le développement des enfants, cette thèse propose d'une part que les expériences d'attachement seraient associées à la morphologie du cerveau et d'autre part que les différences interindividuelles de morphologie du cerveau se traduiraient par des variations sur le plan du fonctionnement socio-émotionnel chez les enfants. Dans cette thèse, le fonctionnement socio-émotionnel sera évalué par la qualité des relations sociales, plus particulièrement le rejet par les pairs, étant donné ses liens théoriques et empiriques avec la qualité des relations d'attachement précoces. La morphologie du cerveau sera quant à elle mesurée par l'imagerie par résonance magnétique (IRM), ce qui sera abordé dans la prochaine section.

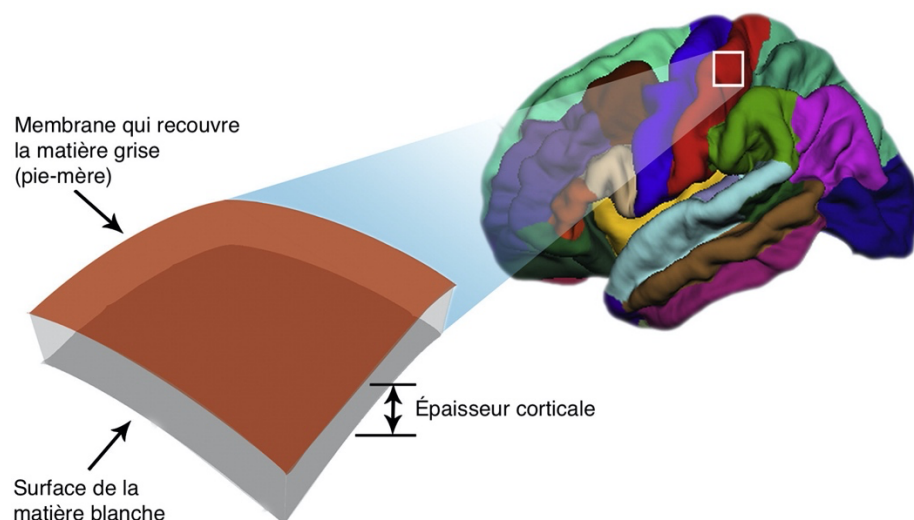
1.2. La neuroimagerie

L'IRM structurelle a révolutionné le domaine médical dans les années 1970 étant donné qu'elle permet de visualiser l'anatomie des structures corticales et sous-corticales du cerveau de manière non-invasive. L'utilisation de l'IRM dans le milieu de la recherche a par la suite été facilitée par la venue à la fin des années 1980 de méthodes automatisées qui permettent la segmentation des images du cerveau selon ses différents tissus (la matière grise, la matière blanche et le liquide céphalo-rachidien) ainsi que l'analyse de différentes caractéristiques de la morphologie du cerveau, telles que le volume, la surface corticale et l'épaisseur corticale (Bigler et al., 2015). La surface corticale correspond à l'aire de la surface de la matière blanche (en cm^2); l'épaisseur corticale est la distance entre la surface de la matière blanche et la membrane

recouvrant la matière grise (en mm) et le volume cortical est le résultat du produit de la surface et de l'épaisseur corticales (en cm^3 ; voir la Figure 1). De nombreuses études ont eu recours à l'IRM afin de caractériser les différences inter-individuelles de morphologie et les trajectoires de développement du cerveau à partir de ces différents marqueurs. Cette section de l'introduction détaillera les trajectoires normales de développement du cerveau, les processus par lesquels l'environnement peut influencer ces trajectoires et les régions cérébrales dont la morphologie est susceptible d'être associée à la qualité de l'environnement de soins.

Figure 1

Une représentation de l'épaisseur et de la surface corticale.



Note. Figure adaptée et traduction libre de “Figure 1 : Graphical representation of cortical thickness and surface area” par Wierenga et al., 2014, *Unique developmental trajectories of cortical thickness and surface area*, p. 122 (<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.11.010>), avec la permission de Elsevier.

1.2.1. *Les trajectoires de développement du cerveau*

Le développement du cerveau est le résultat d'interactions complexes entre des facteurs biologiques et environnementaux. Des études longitudinales et transversales ont permis aux

chercheurs d'identifier des trajectoires de développement normal de la morphologie du cerveau, notamment du volume de matière grise et de l'épaisseur corticale. À cet égard, Giedd et al. (1999) furent les premiers à décrire ces trajectoires à l'aide de données longitudinales. Leurs résultats indiquaient que le volume de matière grise suit un patron non-linéaire caractérisé par une augmentation de volume pendant la période pré-adolescente, culminant pendant l'adolescence à des âges différents selon le lobe cérébral, suivi par une diminution de volume suite à l'adolescence. Néanmoins, cette découverte n'a pas toujours été répliquée dans les échantillons indépendants. Comme le souligne la revue de la littérature menée par Vijayakumar et al. (2018), les études subséquentes révèlent des inconsistances en ce qui concerne la nature exacte des trajectoires de développement (curvilinéaire ou non, l'âge exact de l'atteinte du volume maximal). En ce qui concerne l'épaisseur corticale, les résultats sont également contradictoires. Une revue de la littérature de Walhovd et al. (2016) établit le contraste entre certaines études qui décrivent des trajectoires de développement de l'épaisseur corticale curvilinéaires (augmentation de l'épaisseur corticale pendant l'enfance qui culmine à un âge différent selon les régions, puis diminution graduelle, p. ex., Shaw et al., 2011) et celles qui rapportent des trajectoires développementales caractérisées par une diminution graduelle de l'épaisseur corticale dès l'âge préscolaire (p. ex., Mills et al., 2014).

En somme, les études s'entendent sur le fait que le volume et l'épaisseur corticale tendent à diminuer avec l'âge, bien que l'âge à partir duquel cette diminution commence est contesté. Les inconsistances en ce qui concerne la nature exacte des trajectoires de développement peuvent être expliquées notamment par des différences en ce qui a trait aux échantillons (leur taille et la représentativité pour chaque groupe d'âge), au devis expérimental (étude transversale, longitudinale, séquentielle), ainsi qu'aux modèles statistiques utilisés pour vérifier l'ajustement des données (LeWinn et al., 2017; Vijayakumar et al., 2018; Walhovd et al., 2016).

1.2.2. *L'influence de l'environnement sur le développement cérébral*

Le développement du volume de matière grise, ainsi que de l'épaisseur corticale, est guidé par des processus biologiques tels que la différenciation des neurones (processus durant lequel les cellules souches neurales se différencient en sous-populations de neurones propres aux différentes régions du système nerveux), ainsi que la synaptogénèse et l'élagage synaptique (la création et l'élimination de connexions synaptiques; Rakic, 1988). Toutefois, les expériences vécues, notamment au sein l'environnement de soins, peuvent aussi influencer le développement du cerveau à travers les processus « en attente de l'expérience » (*experience-expectant*) et les processus « dépendants de l'expérience » (*experience-dependent*; Greenough et al, 1987; Kolb & Gibb, 2014; May, 2011). La plasticité en attente de l'expérience réfère aux changements cérébraux qui se produisent en réponse à des caractéristiques de l'environnement qui sont typiquement attendues chez les membres d'une espèce (par exemple l'exposition à des stimuli auditifs et visuels complexes) et qui sont requises pour le développement optimal des fonctions sensorielles et motrices (Greenough et al., 1987). La présence d'une figure d'attachement est attendue chez le nouveau-né (Tottenham, 2012). La privation d'une figure parentale est associée à des conséquences sévères sur la santé de l'enfant (p. ex., retard de développement, statut infectieux, etc.) et sur son développement cérébral, tel qu'il a pu être documenté dans le cas des enfants élevés dans les orphelinats roumains au moment de la chute du régime Ceausescu – un contexte social qui ne leur aura pas permis de former des liens d'attachement avec une figure parentale (Nelson, 2014). Les études montrent que la privation d'une figure parentale pendant la petite enfance – malgré l'intégration subséquente à un foyer familial d'adoption qui permettait l'établissement de liens d'attachement parent-enfant – a un impact durable sur la morphologie du cerveau (i.e., Mackes et al., 2020). Les enfants élevés en orphelinats roumains montrent, à l'âge adulte, une diminution du volume de matière grise et de la surface corticale au niveau du gyrus

frontal inférieur droit et une augmentation du volume, de la surface et de l'épaisseur corticale du gyrus temporal inférieur droit, en comparaison aux adultes précédemment adoptés qui n'ont pas été privés de figure parentale à la petite enfance (Mackes et al., 2020). De plus, dans cette étude, la durée de la privation parentale était liée positivement au volume de matière grise et à la surface de la région du cortex préfrontal médial à l'âge adulte.

La plasticité dépendante de l'expérience réfère aux changements cérébraux qui varient en fonction des stimulations ou des caractéristiques spécifiques de l'environnement, ainsi que des apprentissages qui diffèrent d'un individu à l'autre (Greenough et al., 1987). Par exemple, les études animales ont démontré que les variations de qualité des soins maternels ont des conséquences à long terme sur le développement du cerveau, notamment au niveau de régions cérébrales gouvernant les comportements sociaux, la régulation du stress et les réponses à la récompense (Meaney, 2001; Pena et al., 2014; Yu et al., 2013). Également, une revue systématique de la littérature fait état d'une neuroplasticité (i.e., des changements cérébraux, notamment sur le plan de la morphologie du cerveau) en lien avec les expériences, les nouveaux apprentissages et la pratique d'une habileté durant l'enfance (Tymofiyeva & Gaschler, 2021). Par exemple, les adolescents qui participent à un entraînement à la méditation pleine conscience présentent des changements cérébraux entre les mesures pré- et post-entraînement (Yuan et al., 2020). Ces changements se caractérisent dans cette étude par une diminution du volume de matière grise dans l'hémisphère gauche au niveau de l'insula postérieure, du thalamus et du putamen. Bien qu'assez éloignée du propos de cette thèse, une telle étude apporte un certain appui à l'hypothèse que les expériences vécues avant l'âge adulte, par exemple au sein des relations d'attachement, pourraient elles aussi contribuer à façonner le cerveau en développement via des processus de neuroplasticité dépendante de l'expérience.

L'influence de l'environnement sur le développement cérébral est susceptible d'être plus importante au cours de périodes développementales spécifiques, comme la petite enfance et l'adolescence. En effet, entre la naissance et l'âge de deux ans, le cerveau se développe plus rapidement que dans n'importe quelle autre période développementale (Gilmore et al., 2018), ce qui en fait un moment particulièrement intéressant pour étudier l'impact de l'environnement sur le développement du cerveau. À cet égard, une étape développementale importante à cet âge est la formation des liens d'attachement entre l'enfant et ses parents (Tottenham, 2012). Pour les tout-petits, la qualité des liens d'attachement est effectivement un indicateur central de la qualité de l'environnement de soins. Les expériences vécues au sein des relations d'attachement (soins sensibles, encouragement de l'exploration, régulation émotionnelle) sont donc susceptibles d'influencer le développement du cerveau des enfants. De plus, la fin de l'enfance et le début de l'adolescence sont de leur côté caractérisés par une importance de plus en plus grande accordée aux relations avec les pairs, à un moment où le cerveau se réorganise et affine ses connexions (Blakemore, 2008), ce qui en fait une période développementale pertinente pour examiner le lien entre la morphologie cérébrale et le fonctionnement socio-émotionnel.

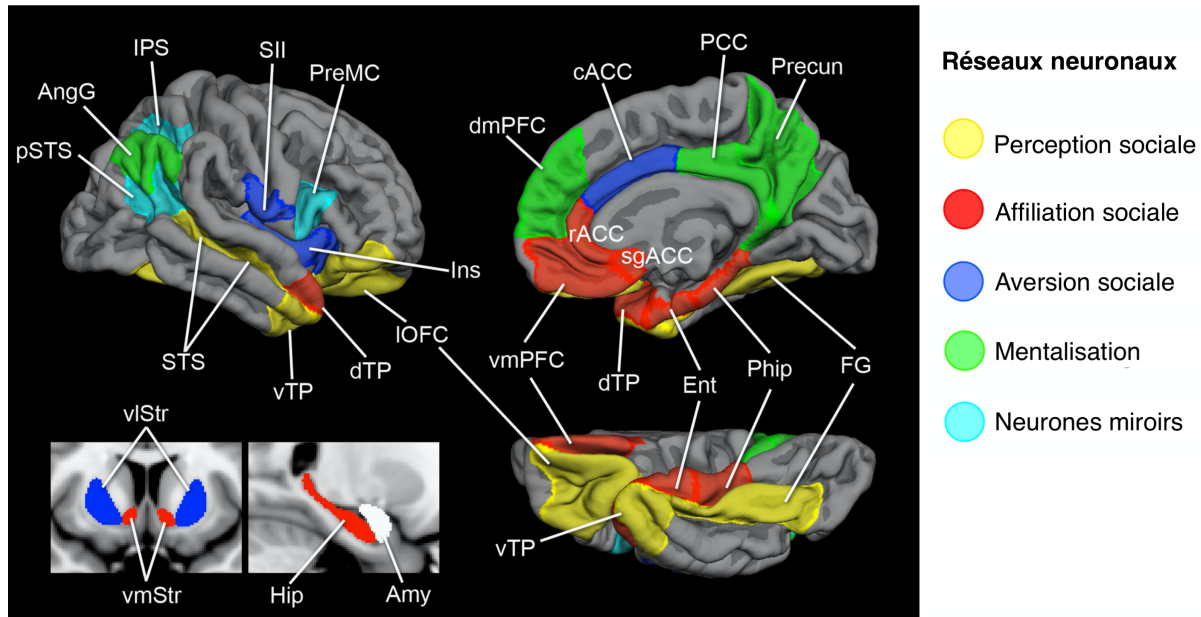
1.2.3. *Le cerveau social*

Il a été proposé que la qualité des relations d'attachement parent-enfant est susceptible d'influencer plus spécifiquement la morphologie du cerveau dans des régions impliquées dans le fonctionnement socio-émotionnel (Rilling & Young, 2014; Tottenham, 2014). À cet égard, les chercheurs en neurosciences ont avancé l'idée que l'être humain possède un « cerveau social » (*social brain*), c'est-à-dire un réseau de régions cérébrales impliquées dans le traitement des stimuli sociaux (Adolphs, 2009; Blakemore, 2008).

Les tentatives d'identification des substrats neuronaux du cerveau social ont commencé par des recherches animales et ont mené à la description des composantes de base du cerveau social, soit le cortex orbitofrontal, l'amygdale et le sulcus temporal supérieur (Brothers, 1990), qui sous-tendent, entre autres, le traitement des informations sociales. À celles-ci se sont ajoutées par la suite d'autres régions cérébrales, comme le cortex préfrontal médial et le cortex cingulaire antérieur (Frith & Frith, 2006). Plus récemment, une revue de la littérature de Bickart et al. (2014) a synthétisé les données neuropsychologiques, anatomiques et fonctionnelles de la recherche portant sur le cerveau social. Les auteurs ont ainsi dressé le portrait de cinq réseaux neuronaux qui composeraient ensemble ce que l'on appelle le cerveau social et qui sous-tendraient des fonctions cérébrales utiles pour le fonctionnement socio-émotionnel. Il s'agit du : 1) réseau de la perception sociale; 2) réseau de l'affiliation sociale; 3) réseau de l'aversion sociale; 4) réseau des neurones miroirs; et 5) réseau de la mentalisation (voir la Figure 22, pour un détail des régions cérébrales impliquées dans chacun des réseaux).

Figure 2

Une représentation des cinq réseaux neuronaux sous-tendant des processus importants pour les comportements sociaux.



Notes. Amy = amygdale; cette structure ferait partie des cinq réseaux neuronaux sous-tendant des processus importants pour les comportements sociaux. En jaune, les structures formant le réseau de la perception sociale : IOFC = cortex orbitofrontal latéral; vTP = pôle temporal ventrolatéral; FG = gyrus fusiforme; STS = sulcus temporal supérieur. En rouge, les structures formant le réseau de l'affiliation sociale : dTP = pôle temporal dorsomédial; rACC = cortex cingulaire antérieur rostral; sgACC = cortex cingulaire antérieur subgénual; vmPFC = cortex préfrontal ventromédial; Ent = cortex entorhinal; PHip = cortex parahippocampique; vmSt = striatum ventromédial. En bleu foncé, les structures formant le réseau de l'aversion sociale : cACC = cortex cingulaire antérieur caudal; Ins = insula; SII = cortex somatosensoriel secondaire; vlSt = striatum ventrolatéral. En vert, les structures formant le réseau de la mentalisation : dmPFC = cortex préfrontal dorsomédial; PCC = cortex cingulaire postérieur; Precun = précuneus; AngG = gyrus angulaire (jonction temporo-pariétal). En bleu cyan, les structures formant le réseau

des neurones miroirs : pSTS = sulcus temporal supérieur postérieur; IPS = sulcus intrapariétal; PreMC = cortex prémoteur. Figure adaptée et traduction libre de “Figure 4 : A schematic of five large-scale brain networks subserving processes important for social behavior” par Bickart et al., 2014, *The amygdala as a hub in brain networks that support social life*, p. 243 (<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.08.013>), avec la permission de Elsevier.

La grande majorité de la littérature sous-tendant l’identification des régions cérébrales composant le cerveau social se base sur des données issues de la neuroimagerie fonctionnelle, c’est-à-dire les régions activées lors de tâches à caractère social ou émotionnel. Notons par ailleurs que la morphologie de certaines régions du cerveau social (notamment, l’amygdale, le cortex préfrontal médial et le sulcus temporal supérieur) est associée positivement à la taille du réseau social de l’individu (le nombre de personnes avec qui un participant entretient des liens sociaux; voir Lamblin et al., 2017; Liu et al., 2018, pour des revues de la littérature). Ceci souligne que la morphologie de ces régions cérébrales peut aussi nous informer sur la capacité des individus à naviguer dans un monde social complexe et entretenir des échanges de qualité avec les pairs. Ainsi, la description des réseaux cérébraux qui sous-tendent le fonctionnement socio-émotionnel (la perception sociale, l’affiliation sociale, l’aversion sociale, la mentalisation et les neurones miroirs), ainsi que l’identification des régions cérébrales qui les composent, peuvent servir de cadre conceptuel dans l’étude des liens entre l’attachement et la morphologie du cerveau.

En somme, les études en neurosciences développementales nous indiquent que le développement de la matière grise (volume et épaisseur corticale) suit une trajectoire caractérisée par une diminution avec l’âge. Cette trajectoire de développement peut être influencée par des facteurs environnementaux, tels que l’environnement de soins. Les expériences de soins définissant la relation parent-enfant sont présumées être plus susceptibles d’influencer le

développement du cerveau dans les régions impliquées dans le fonctionnement socio-émotionnel, qui se regroupent au sein d'un réseau surnommé le « cerveau social ».

1.3. La qualité de l'environnement de soins, la morphologie cérébrale et son impact fonctionnel

La prochaine section se penche sur la littérature ayant examiné les liens entre les variations normatives de la qualité de l'environnement de soins et la morphologie du cerveau. À elle seule, cette littérature permet difficilement de rendre compte des retombées positives ou négatives des différences morphologiques associées à l'environnement de soins. C'est pourquoi la question de la portée fonctionnelle de ces associations dans le quotidien des individus est ensuite abordée.

1.3.1. *La qualité des comportements parentaux et la morphologie cérébrale*

La sensibilité parentale, qui réfère à la capacité du parent à décoder et à répondre de manière adaptée aux signaux de l'enfant (Pederson & Moran, 1995), est l'un des comportements parentaux les plus étudiés en lien avec la morphologie du cerveau. Des niveaux plus élevés de sensibilité maternelle sont associés de manière concomitante à un volume total de matière grise sous-corticale plus élevé chez les enfants de cinq mois (Sethna et al., 2017), alors que des niveaux plus élevés de sensibilité *paternelle* sont associés à un volume cérébelleux plus petit (Sethna et al., 2019). Les chercheurs d'une autre équipe ont démontré que des niveaux plus élevés de sensibilité maternelle sont associés de manière concomitante à des volumes hippocampiques réduits chez les enfants de six mois (Rifkin-Graboi et al., 2015) et de manière longitudinale à un volume réduit de l'amygdale gauche à l'âge de six ans, quoique seulement chez les garçons (Lee et al., 2019). À l'âge scolaire, les enfants ayant bénéficié de plus de sensibilité parentale durant la petite enfance présentent des volumes totaux du cerveau et de la matière grise plus élevés, ainsi qu'une épaisseur corticale plus élevée au niveau des gyri

précentral, post central et frontal moyen à gauche, et des gyri précentral et frontal moyen à droite (Kok et al., 2015). D'un autre côté, notre équipe (Bernier et al., 2019) a observé que bien que le score global de sensibilité maternelle durant la petite enfance ne soit pas associé aux volumes de l'amygdale et de l'hippocampe vers l'âge de 10 ans, les sous-composantes de cette mesure le sont. Ainsi, une plus grande disponibilité maternelle est associée à un volume réduit de l'amygdale droite et une plus grande positivité maternelle est liée à un volume réduit de l'hippocampe bilatéralement. Dans d'autres études, le soutien maternel à l'autonomie, qui peut être conçu comme les comportements maternels favorisant le système comportemental d'exploration de l'enfant (Whipple et al., 2011), est associé au volume et à la croissance volumétrique de l'hippocampe bilatéralement à l'âge scolaire (Luby et al., 2012, 2016). De plus, une fréquence plus élevée de comportements maternels positifs à la fin de l'enfance est associée à un amincissement cortical plus prononcé du cortex cingulaire antérieur droit (uniquement chez les garçons) et du cortex orbitofrontal bilatéralement, ainsi qu'à une croissance volumétrique atténuée de l'amygdale droite à l'adolescence (Whittle et al., 2014). Au contraire des études précédentes, certaines études se sont penchées sur les variations normatives de comportements parentaux qui pourraient être qualifiés de plus négatifs. Les résultats indiquent que des niveaux plus élevés d'hostilité maternelle auto-rapportée durant la petite enfance sont associés à un volume total de matière grise plus faible à 15 ans (Lévesque et al., 2015). Similairement, des niveaux plus élevés de pratiques parentales dures (*harsh parenting*) de la part de la mère auprès de son enfant d'âge préscolaire sont associés à un volume total de matière grise réduit, de même que des volumes réduits de l'amygdale, à la fin de l'enfance (Cortes-Hidalgo et al., 2021). De plus, l'exposition à une fréquence élevée de comportements maternels négatifs à l'adolescence est associée à un amincissement moins prononcé des gyri frontal supérieur, pariétal supérieur et supramarginal dans l'hémisphère droit, ainsi qu'une réduction volumétrique atténuée du noyau

accumbens à gauche entre 12 et 19 ans, en comparaison aux adolescents exposés à moins de comportements maternels négatifs (Whittle et al., 2016).

En somme, la qualité des comportements parentaux est associée à la morphologie du cerveau des enfants, autant au niveau sous-cortical que cortical, quoique de manière inconsistante sur le plan de la direction de l'association et des structures exactes impliquées. Il semble qu'en termes de mesures globales, les enfants ayant bénéficié de plus de comportements parentaux positifs présentent un volume total de matière grise plus élevé (Kok et al., 2015; Sethna et al., 2017), et inversement en ce qui concerne les comportements parentaux négatifs (Cortes-Hidalgo et al., 2021; Lévesque et al., 2015), quoique d'autres études rapportent des liens non-significatifs (Luby et al., 2012). Sur le plan des régions cérébrales exactes impliquées dans de telles associations, plusieurs études rapportent que la qualité des comportements parentaux est associée à la morphologie de l'amygdale et de l'hippocampe, qui sont deux structures limbiques notamment impliquées dans le traitement des stimuli émotionnels et leur encodage (Labar & Cabeza, 2006). En ce qui concerne l'amygdale, les comportements parentaux de meilleure qualité sont associés à un volume diminué ou à un développement volumétrique atténué de cette structure sous-corticale (Bernier et al., 2019; Cortes-Hidalgo et al., 2021; Lee et al., 2019, Whittle et al., 2014), bien que l'association soit non-significative et quasi nulle dans un autre échantillon (Kok et al., 2015). Les résultats sont moins clairs concernant l'hippocampe : les études concluent parfois à un volume hippocampique diminué (Bernier et al., 2019; Rifkin-Graboi et al., 2015), parfois à un volume plus élevé ou une croissance volumétrique plus prononcée (Luby et al., 2012, 2016) en lien avec les comportements parentaux positifs, ou encore à des associations non-significatives (Cortes-Hidalgo et al., 2021, Whittle et al., 2014). D'autres études montrent des liens avec le volume, l'épaisseur corticale ou le développement des régions du « cerveau social » (cortex orbitofrontal, cingulaire antérieur, gyrus supramarginal; Whittle et al., 2014, 2016), du

réseau de la récompense (noyau accumbens; Whittle et al., 2016) et plus généralement des régions impliquées dans les processus sensoriels, moteurs et attentionnels (Kok et al., 2015; Sethna et al., 2019; Whittle et al., 2016).

Plusieurs facteurs pourraient expliquer les divergences de résultats à travers les études, notamment l'âge auquel la qualité des comportements parentaux et la morphologie du cerveau sont mesurées. La revue de littérature de Teicher et Samson (2016) souligne à cet égard que le lien entre les comportements parentaux et la morphologie du cerveau peut différer (et même aller dans des directions opposées) selon la période développementale durant laquelle l'un ou l'autre est mesuré. Notons également les différences en termes d'analyses statistiques à travers les études qui peuvent expliquer pourquoi les conclusions sont différentes d'une étude à l'autre (Botvinik-Nezer et al., 2020). À cet égard, la plupart des études tentant d'identifier les régions au sein desquelles la qualité des comportements parentaux est associée à la morphologie cérébrale ont utilisé une approche analytique par régions d'intérêt (c.-à-d., les analyses statistiques sont effectuées seulement à l'intérieur des régions pré-déterminées, les autres régions étant exclues des analyses), en limitant souvent leurs analyses à l'amygdale et l'hippocampe. À l'inverse, le peu d'études ayant utilisé une approche analytique régionale appliquée au cerveau en entier (*whole-brain regional analyses*; c.-à-d., ne se limitant pas à certaines régions pré-déterminées) ont identifié un réseau plus élargi de régions corticales dont la morphologie est associée aux comportements parentaux (p. ex., Kok et al., 2015; Whittle et al., 2016). Il est également intéressant de constater que les pratiques parentales positives et négatives ne semblent pas représenter les extrêmes d'un même continuum allant du négatif au positif, comme le soulignent Whittle et al. (2014), mais devraient plutôt être conceptualisées comme deux aspects des comportements parentaux ayant un impact distinct sur la morphologie du cerveau des enfants, notamment quant aux régions cérébrales impliquées. Il s'avère donc important de tenir compte

séparément des pratiques parentales positives et négatives et de leur impact sur l'ensemble des régions du cerveau (approche analytique régionale appliquée au cerveau en entier), afin d'obtenir une compréhension complète de l'association entre l'environnement de soins et la morphologie cérébrale.

Par ailleurs, les données méta-analytiques indiquent que l'association entre la qualité des comportements parentaux et la qualité des relations d'attachement est de taille modeste ($r = 0,32$ à $0,35$; Cadman et al., 2017; Verhage et al., 2016), ce qui peut suggérer que ce sont deux construits associés, mais distincts. Considérant aussi l'importance bien documentée de l'attachement parent-enfant pour le fonctionnement socio-émotionnel de l'enfant (Thompson, 2016), il importe de mesurer l'attachement directement (et non uniquement les comportements parentaux) afin de mieux comprendre la nature des associations entre la qualité de l'environnement de soins, la morphologie du cerveau et le fonctionnement socio-émotionnel de l'enfant.

1.3.2. *La qualité des relations d'attachement et la morphologie cérébrale*

Très peu d'études ont investigué l'association entre la qualité des liens d'attachement parent-enfant à proprement dit durant la petite enfance et la morphologie du cerveau plus tard dans la vie, et la plupart de celles-ci ont restreint leurs analyses à des régions sous-corticales prédéterminées (amygdale, hippocampe, noyau caudé et thalamus). Les résultats d'une de ces études indiquent que les adultes qui avaient développé un attachement mère-enfant insécure (évitant, résistant/ambivalent, désorganisé) durant la petite enfance présentent un volume plus élevé des amygdales que ceux qui avaient développé un attachement sécure (Moutsiana et al., 2015). De manière similaire, Lyons-Ruth et al. (2016) montrent que l'attachement mère-enfant désorganisé durant la petite enfance prédit un volume plus élevé de l'amygdale droite à l'âge adulte. Ces deux études ont été les premières à démontrer que la qualité des liens d'attachement durant la petite

enfance pourrait exercer une influence à long terme sur la morphologie cérébrale. Plus récemment, Cortes Hidalgo et al. (2019) ont examiné la morphologie du cerveau durant l'enfance au sein d'un large échantillon ($n = 551$) et leurs résultats basés sur une analyse par régions d'intérêt indiquent que l'attachement mère-enfant désorganisé durant la petite enfance prédit un volume plus élevé de l'hippocampe bilatéralement à la fin de l'enfance. Au niveau du cerveau entier, ils n'ont trouvé aucun lien significatif entre l'attachement mère-enfant désorganisé et le volume régional de matière grise corticale.

Ces études présentent néanmoins des résultats qui apparaissent contradictoires (l'attachement insécuré/désorganisé est associé au volume de l'amygdale à l'âge adulte, mais au volume de l'hippocampe à l'enfance), illustrant l'importance d'investiguer cette relation davantage. Également, plusieurs avenues de ce champ de recherche demeurent à ce jour inexplorées. Les études actuelles en lien avec la morphologie du cerveau ont toutes utilisé la procédure de la Situation étrangère et ses classifications d'attachement pour caractériser la qualité des relations d'attachement mère-enfant. Aucune étude examinant la morphologie cérébrale n'a utilisé une approche dimensionnelle pour mesurer la qualité des liens d'attachement : ni le tri de cartes d'attachement, qui est une mesure plus écologique et permettant une analyse plus fine de la sécurité d'attachement; ni le score dimensionnel de désorganisation d'attachement, qui est pourtant disponible d'emblée avec la Situation étrangère, n'ont été utilisés. De plus, aucune étude n'a exploré le lien entre la qualité des relations d'attachement parent-enfant à la petite enfance et l'*épaisseur corticale* en utilisant une approche analytique régionale appliquée au cerveau entier, bien que les études examinant les liens entre les comportements parentaux et la morphologie cérébrale montrent qu'une telle approche soit pertinente.

1.3.3. *La portée fonctionnelle des différences de morphologie cérébrale liées à l'environnement de soins*

Groh et al. (2014) ont rapporté des données méta-analytiques qui soulignent l'importance de la qualité des liens d'attachement parent-enfant dans la petite enfance pour le développement des relations sociales chez les enfants et les adolescents. Ils ont par le fait même mis de l'avant que les futures études devraient porter une attention particulière à l'exploration des mécanismes qui pourraient expliquer cette association durable et robuste. À cet égard, certains chercheurs proposent que l'association entre l'attachement et le fonctionnement social des enfants pourrait être médiée par la morphologie du cerveau (Belsky & de Haan, 2011; Gunnar et al., 2006; Thompson, 2016; Tottenham, 2014). Toutefois, il existe un manque remarquable de données scientifiques pour supporter cette hypothèse.

Quelques études ont abordé cette question, toutefois en se penchant sur le rôle médiateur de la morphologie du cerveau dans la relation entre des indicateurs négatifs de la qualité de l'environnement de soins et des indices d'inadaptation sévère chez l'individu, comme le décrochage scolaire, la sévérité des symptômes psychiatriques, ainsi que le niveau de suicidalité et de comportements d'automutilation. Whittle et al. (2016) ont observé que la trajectoire de développement de l'épaisseur corticale du gyrus frontal supérieur était un médiateur de la relation entre les comportements maternels négatifs au début de l'adolescence et le décrochage scolaire à la fin de l'adolescence. Une autre étude indique que le volume de l'amygdale à l'âge adulte agit en tant que médiateur de l'association entre la désorganisation d'attachement durant la petite enfance et l'irritabilité limbique à l'âge adulte, définie par la présence des symptômes psychiatriques d'hallucinations, de perturbations somatiques ou de dissociation, entre autres (Lyons-Ruth et al., 2016). Dans le même échantillon, Khoury et al. (2019) ont observé que le volume hippocampique gauche à l'âge adulte médie partiellement l'association entre les

comportements maternels de retrait émotionnel ou physique dans la petite enfance et la suicidalité subséquente. Tout en soulignant l'importance potentielle de la morphologie cérébrale comme médiateur du lien entre l'environnement de soins et le fonctionnement adaptatif ultérieur, ces trois études ont examiné des conséquences développementales extrêmes qui ne s'appliquent qu'à une minorité de la population et qui laissent en plan la sphère du fonctionnement socio-émotionnel qui, elle, s'applique à une plus grande partie de la population. À cet égard, une étude de Kok et al. (2017) indique que le volume cérébral total est un médiateur de l'association entre la sensibilité parentale lors la petite enfance — qui est associée, mais non équivalente, à l'attachement — et les comportements prosociaux à l'âge scolaire (quoique seulement chez les filles). Cependant, cette étude n'a pas cherché à déterminer les régions cérébrales précises dont le volume ou l'épaisseur corticale médiait cette association, limitant ainsi la portée des résultats. En somme, aucune des études actuellement disponibles ne permet de vérifier directement l'hypothèse selon laquelle l'association entre la qualité des liens d'attachement tôt dans la vie et le fonctionnement socio-émotionnel subséquent pourrait être expliquée par une variable intermédiaire, soit la morphologie de certaines régions cérébrales.

1.4. Objectifs de la thèse

L'objectif général de cette thèse est d'étudier les associations longitudinales entre la qualité de la relation d'attachement mère-enfant durant la petite enfance et la morphologie du cerveau à la fin de l'enfance. Pour ce faire, deux indicateurs dimensionnels de la qualité de l'attachement mère-enfant sont utilisés, dans l'optique de capturer de fines variations individuelles autant dans les aspects positifs que négatifs du lien d'attachement mère-enfant. De plus, la thèse vise à vérifier si les différences de morphologie cérébrales liées à la désorganisation d'attachement mère-enfant se traduisent par des différences sur le plan du fonctionnement socio-

émotionnel à la fin de l'enfance, plus précisément la qualité des relations avec les pairs. La sécurité d'attachement est mesurée à l'âge de 15 mois à l'aide du tri de cartes d'attachement et la désorganisation d'attachement est mesurée à l'âge de 18 mois à l'aide de la Situation étrangère. La morphologie du cerveau a été évaluée à l'âge de 10 ans. Le rejet par les pairs est rapporté par l'enfant et le professeur à l'âge de 11 ans.

Le premier article de la thèse vise spécifiquement à examiner les associations entre la sécurité d'attachement durant la petite enfance et la morphologie du cerveau à la fin de l'enfance (volume de matière grise, épaisseur corticale) en utilisant une approche régionale sur le cerveau en entier.

Le deuxième article de la thèse vise spécifiquement à examiner les associations entre la désorganisation d'attachement durant la petite enfance, la morphologie du cerveau à la fin de l'enfance (volume de matière grise, épaisseur corticale) et la qualité des relations avec les pairs, opérationnalisée dans cette thèse par le rejet vécu par l'enfant de la part de ses pairs.

Chapitre 2 – Premier article

Attachment Security in Infancy: A Preliminary Study of Prospective Links to Brain
Morphometry in Late Childhood

Leblanc, É., Dégeilh, F., Daneault, V., Beauchamp, M. H., & Bernier, A. (2017). Attachment security in infancy: a preliminary study of prospective links to brain morphometry in late childhood. *Frontiers in Psychology*, 8, 2141. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.02141>

**Attachment Security in Infancy: A Preliminary Study of Prospective Links to Brain
Morphometry in Late Childhood**

Élizabeth Leblanc¹, Fanny Dégeilh^{1,2}, Véronique Daneault^{1,3,4}, Miriam H. Beauchamp^{1,2}, & Annie
Bernier¹

¹ Department of Psychology, University of Montreal, Quebec, Canada

² Sainte-Justine Research Center, Montreal, Quebec, Canada

³ Functional Neuroimaging Unit, University of Montreal's Geriatric Institute, Montreal, Quebec,
Canada

⁴ Center for Advanced Research in Sleep Medicine, Hôpital du Sacré-Cœur de Montréal,
Montreal, Quebec, Canada

Author Notes

Élizabeth Leblanc <https://orcid.org/0000-0002-1258-2162>

Fanny Dégeilh <https://orcid.org/0000-0002-5802-4975>

Véronique Daneault <https://orcid.org/0000-0002-8950-9043>

Miriam H. Beauchamp <https://orcid.org/0000-0002-8637-6361>

Annie Bernier <https://orcid.org/0000-0002-2359-9808>

Fanny Dégeilh is now at University of Rennes, CNRS, Inria, Inserm, IRISA UMR 6074,
Empenn Team ERL U 1228, Rennes, France

Correspondence concerning this article should be addressed to: Annie Bernier,
Department of Psychology, University of Montreal, P.O. Box 6128, Downtown Station,
Montreal, QC H3C 3J7, Canada. annie.bernier@umontreal.ca

Abstract

A large body of longitudinal research provides compelling evidence for the critical role of early attachment relationships in children's social, emotional, and cognitive development. It is expected that parent-child attachment relationships may also impact children's brain development, however, studies linking normative caregiving experiences and brain structure are scarce. To our knowledge, no study has yet examined the associations between the quality of parent-infant attachment relationships and brain morphology during childhood. The aim of this preliminary study was to investigate the prospective links between mother-infant attachment security and whole-brain gray matter (GM) volume and thickness in late childhood. Attachment security toward the mother was assessed in 33 children when they were 15 months old. These children were then invited to undergo structural magnetic resonance imaging at 10-11 years of age. Results indicated that children more securely attached to their mother in infancy had larger GM volumes in the superior temporal sulcus and gyrus, temporo-parietal junction, and precentral gyrus in late childhood. No associations between attachment security and cortical thickness were found. If replicated, these results would suggest that a secure attachment relationship and its main features (e.g., adequate dyadic emotion regulation, competent exploration) may influence GM volume in brain regions involved in social, cognitive, and emotional functioning through experience-dependent processes.

Keywords: mother-child attachment, infancy, childhood, brain development, social brain, gray matter, volumetrics, cortical thickness

Attachment Security in Infancy: A Preliminary Study of Prospective Links to Brain Morphometry in Late Childhood

Seminal work by Harlow and Harlow (1962) suggested that the primate tendency to attach to a caregiver is innate and does not merely reflect physiological needs. Human children attach to a caregiver who is physically present, even if the caregiver does not fulfill a primary physical need, such as feeding, and even if the caregiver adopts abusive behaviors (Bowlby, 1956; Ainsworth, 1967; Cyr et al., 2010). Attachment is a specific, preferential, and enduring emotional tie between an infant and a caregiver, promoting survival and allowing children to feel safe and protected (Bowlby, 1969/1982). Infant attachment is expressed by behaviors such as separation distress, greeting reactions upon reunion, and the tendency to turn to a specific caregiver for reassurance when distressed (Sroufe, 1979; Cassidy, 2016). These innate, universal behavioral tendencies are driven by a biologically based attachment system (Cassidy, 2016). Importantly, however, they are subsequently gradually modulated by caregiver responses, progressively leading to the development of individual differences in the expression and organization of infant attachment behavior (Ainsworth et al., 1978; Fearon and Belsky, 2016). These individual differences are considered to index the “quality” or “security” of attachment relationships. Specifically, a critical tenet of attachment theory is that securely attached children have confident expectations of themselves as being able to solicit the caregiver’s proximity, and of the caregiver as being responsive and available when needed (Bowlby, 1973, 1988). In contrast, infants develop insecure attachments over the course of interactions with caregivers who have difficulty responding adequately to their emotional needs (see meta-analysis by De Wolff and Van IJzendoorn, 1997). Hence, virtually all children become attached to a caregiver, but not all develop secure attachment relationships (Cassidy, 2016).

Decades of longitudinal research have supported the notion that individual differences in infant and child attachment security to primary caregivers are of critical importance for child social, emotional, and cognitive development. Several meta-analyses suggest that variations in attachment security are associated with individual differences in a range of child outcomes: higher attachment security (as compared to insecurity) is associated with better social competence (Groh et al., 2014, 2017a), emotion understanding (Cooke et al., 2016), quality of peer relationships (Pallini et al., 2014), language competence (Van IJzendoorn et al., 1995), as well as fewer internalizing (Groh et al., 2012, 2017a; Madigan et al., 2013) and externalizing behavior problems (Fearon et al., 2010; Groh et al., 2017a).

Such associations between attachment security and child social, emotional, and cognitive development are sometimes interpreted as suggesting that attachment experiences influence the development of children's brain structures underlying socio-emotional and cognitive functioning (Gunnar et al., 2006; Belsky and de Haan, 2011; Tottenham, 2014). Indeed, although many brain development processes, such as neuronal differentiation, synaptogenesis, and pruning, are guided largely by biological factors (Rakic, 1988), caregiving experiences can also shape brain development in two ways. Experience-expectant processes refer to development that occurs in response to experiences that are typically shared by all members of a species (Greenough et al., 1987). Caregiver presence is expected in humans, and indeed caregiver deprivation is associated with alterations of brain structure and function (Eisenberger and Cole, 2012; Tottenham, 2012). Closer to our purposes, experience-dependent processes refer to brain development that varies from one person to another as a result of specific individual experiences (Greenough et al., 1987). For example, animal studies indicate that variations in the quality of caregiving have long-term consequences for brain development, notably in brain areas that support stress regulation, social behaviors, and reward processing (Meaney, 2001; Yu et al., 2013; Peña et al., 2014).

Accordingly, it is plausible that the security of parent–child attachment, as an important indicator of the quality of the early caregiving environment, may contribute to shaping the developing brain.

This hypothesis is sensible when considering that a core feature of a secure attachment relationship is that the caregiver acts as a secure base from which the child can confidently explore, and seek proximity when distressed (Ainsworth, 1985). During exploration, securely attached children can freely play an active, purposeful role in exploring the surrounding social and physical world, which provides rich stimulation for the developing brain. When, however, they encounter a distressing event during exploration (e.g., hurting oneself while playing), the very nature of their secure attachment relationship allows these children to return to their caregiver for help and soothing (Ainsworth, 1985), which gradually fosters the development of emotion regulation (Calkins, 2004; Cole et al., 2004). Overall, secure attachment relationships are believed to favor both confident exploration and effective emotion regulation in children, which are likely to influence structural development in brain regions involved in a range of social, emotional, and cognitive functions. In fact, it has been proposed that the quality of the attachment bond between children and their caregivers is especially likely to be associated with brain structures underpinning social functioning (Rilling and Young, 2014; Tottenham, 2014), known as the “social brain” and including the superior temporal sulcus, medial prefrontal and anterior cingulate cortices, inferior frontal gyrus, anterior insula, as well as the amygdala (Blakemore, 2008; Adolphs, 2009).

Yet, in contrast to the abundance of research linking attachment security to behavioral outcomes, the links between brain structure and child attachment are still poorly understood (Coan, 2016). Indirect evidence comes from studies of children exposed to maltreatment, which suggest that severely adverse caregiving experiences can lead to morphological alterations in

brain regions underpinning social, emotional, and cognitive functions later in life (Teicher and Samson, 2016). Children and adults exposed to childhood maltreatment present abnormal brain volumes and thickness compared to non-exposed individuals in several brain regions (see Lim et al., 2014; Riem et al., 2015, for meta-analyses; Kelly et al., 2013; Whittle et al., 2013; Teicher and Samson, 2016). Nonetheless, these findings should be considered alongside the numerous confounding factors that characterize maltreating families (e.g., poor mental and physical health, poverty, poor quality of sleep, prenatal drug and alcohol use; Edwards et al., 2003; Hussey et al., 2006; Smith et al., 2007; Cuddihy et al., 2013). Given that these factors also influence brain development (Jednoróg et al., 2012; Goodkind et al., 2015; Urrila et al., 2017), the poor quality of parent–child relationships may or may not be the cause of the structural abnormalities observed in the brains of maltreated children (Belsky and de Haan, 2011). Studies in the general population are required to fully understand the association between caregiving experiences and brain morphology.

In contrast to the relatively large body of research on maltreatment, empirical evidence for links between normative variations in parent–child relationship quality and brain development in typically developing children is scarce, and almost all relevant studies have examined parental behavior rather than parent–child relationship quality per se. Overall, these studies suggest that normative variations in different dimensions of parental behavior are associated with differences in gray matter (GM) volume and thickness in several brain regions, although directionality varies. Specifically, higher maternal sensitivity has been found to relate to larger subcortical GM volume in infants (Sethna et al., 2017), but also to smaller hippocampal volumes and to (marginally) smaller amygdalar volume in infants (Rifkin- Graboi et al., 2015). Kok et al.’s (2015, 2017) longitudinal studies suggested that parental sensitivity in infancy was not associated with hippocampal and amygdalar volumes in school- aged children, but was associated with larger

total GM volume as well as thicker cortex in the bilateral middle frontal gyri, precentral gyri, and left postcentral gyrus. Greater maternal support during the preschool years is associated with larger hippocampal volumes in school-aged children (Luby et al., 2012, 2013, 2016), while self-reported parental praise is related to larger left insula in children aged 5–18 years (Matsudaira et al., 2016). The presence of more positive maternal behavior has been linked to decreased volumetric development in the right amygdala as well as accelerated cortical thinning in the right anterior cingulate and bilateral prefrontal cortices in adolescence (Whittle et al., 2014). On the other hand, negative aspects of parental behavior (e.g., self-reported hostility and observed aggressive behavior) are related to smaller total GM volume (Lévesque et al., 2015) and attenuated cortical thinning in the right superior frontal, superior parietal, and supramarginal gyri, as well as a reduced volumetric development in the left nucleus accumbens in adolescence (Whittle et al., 2016). These brain structures are crucial for children’s social, emotional, and cognitive development, given that they underpin social cognition, emotion regulation, threat detection, attention monitoring, stress regulation and reward processing (Meaney, 2001; Dölen and Malenka, 2014; Frank et al., 2014; Kalisch and Gerlicher, 2014; Deen et al., 2015).

In light of the growing literature pertaining to specific dimensions of parental behavior and brain morphology, it is surprising that almost no research has focused directly on the quality of the parent–child dyadic relationship, of which attachment security is perhaps the best documented and most widely recognized indicator. Given that the quality of parenting behavior is moderately associated with parent–child attachment security (De Wolff and Van IJzendoorn, 1997), the body of literature presented above suggests that parent–child attachment security may relate to children’s brain morphology. Yet, to our knowledge, only two studies have examined the relations between brain structure and the quality of parent–child attachment relationships, and both focused on subcortical volumes (amygdala, hippocampus, caudate nucleus, thalamus)

once participants reached adulthood. These studies suggest that poorer attachment quality to mother in infancy (assessed with the Strange Situation Procedure; SSP, Ainsworth et al., 1978) relates to larger volume of the amygdalae in adulthood (Moutsiana et al., 2015; Lyons-Ruth et al., 2016). These two longitudinal studies highlight the potentially long-lasting link between early parent– child attachment and subcortical brain structure. However, it is not known whether the longitudinal links are already apparent during childhood, whether the direction of association is stable, and whether attachment may also relate to other brain regions. These are important questions in light of increasing evidence that developmental considerations play a crucial role in the links between caregiving experiences and regional brain development, including directionality of such links (Tottenham and Sheridan, 2009; Teicher et al., 2016). For example, higher-quality parenting is associated with smaller hippocampal volumes in infants and children (Luby et al., 2012, 2013, 2016; Rifkin-Graboi et al., 2015; but see Sethna et al.’s (2017) results indicating larger subcortical GM volume); however, higher-quality parenting is associated with larger hippocampal volume in adolescence (albeit in a sample of children exposed to cocaine during gestation; Rao et al., 2010).

Building on previous studies (Moutsiana et al., 2015; Lyons-Ruth et al., 2016), the current report examines the longitudinal associations between mother–infant attachment security and whole-brain GM volume and thickness in late childhood. Previous studies have used an a priori regions-of-interest approach to investigate the links between parent–child relationship quality and brain structure, which may limit the scope of the conclusions that can be drawn; a whole-brain approach was therefore used here. We assessed early mother– child attachment security with the Attachment Behavior Q-Sort (AQS; Waters and Deane, 1985), which yields a continuous score for attachment security rather than assignment to a particular attachment category. This approach maximizes statistical power by affording excellent detection of fine

individual differences, and may be especially appropriate in the context of small sample sizes (Groh et al., 2017b). Psychometric work also suggests that a dimensional approach is coherent with the underlying structure of individual differences in attachment (Fraley and Spieker, 2003). Given the scarcity of literature on attachment security and brain morphology in typically developing children, and the fact that a large number of brain regions have been variously linked to caregiving experiences, the statistical analyses were exploratory and no a priori hypotheses were formulated with regards to the location of putative associations or the direction of associations, considering also that some aspects of brain development trajectories follow an inverted U-shape (Shaw et al., 2008; Giedd et al., 2015).

Material and methods

Participants

Participants included in the present study ($n = 33$) were followed annually as part of a larger longitudinal research project that documents the prospective associations between the early caregiving environment and several facets of child development (see Bélanger et al., 2015). In the present study, we report on attachment security assessed at 15 months of age (T1; $M = 15.65$, $SD = 0.97$, range = 14.50 – 18.00) and structural magnetic resonance imaging (MRI) data collected when children were 10–11 years of age (T2, $M = 10.59$, $SD = 0.46$, range = 10.0 – 11.67 years). The study was approved by the local research ethics committee of aging-neuroimaging of the CIUSSS du Centre-Sud-de-l'île-de-Montréal and all families provided written informed consent for participation.

Families were recruited from random birth lists of a large Canadian metropolitan area, provided by the Ministry of Health and Social Services. Inclusion criteria for participation were full-term pregnancy (i.e., at least 37 weeks of gestation) and the absence of any known physical or mental disability, severe developmental delay in the infant, acquired brain injury, and standard

MRI counter-indications. For the current analyses, 64 families were invited to participate in structural MRI when children reached 10 years of age; among them, 35 (54.69%) agreed to participate. Families who agreed to participate ($n = 35$) did not differ from those who refused ($n = 29$) in terms of family income, parental age, education, and ethnicity, as well as child attachment security to mother in infancy (all $ps > 0.21$, see Table 1). Of the 35 families who agreed to take part in the MRI protocol, one child was excluded from the analyses because of excessive head motion (translation > 2.5 mm or rotation > 2.5 degrees) and one because of suspected neuropathology. Consequently, data from 33 children [20 girls and 13 boys; $\chi^2(1) = 1.46$, $p = 0.23$] were used in the analyses. Group comparisons between families included in the analyses ($n = 33$) and those who declined the MRI protocol ($n = 29$) were not significant.

Attachment security assessment

Mother–infant attachment security was assessed at T1 using the Attachment Behavior Q-Sort (AQS; Waters and Deane, 1985). The observer-version of the AQS is considered one of the gold-standard measures of attachment (van IJzendoorn et al., 2004) as it shows excellent construct validity, converging with attachment security assessed with the SSP, with child socio-emotional adaptation, and with maternal sensitivity (see van IJzendoorn et al., 2004; Cadman et al., 2017 for meta-analytic evidence), while also demonstrating discriminant validity with respect to child temperament (Cadman et al., 2017). In fact, meta-analytic data suggest that the AQS is more closely related to child outcomes than the SSP (Fearon et al., 2010), which makes it an instrument of choice to study putative associations between early attachment and brain morphology.

In this study, trained research assistants observed infant behaviors throughout a 70- to 90-min home visit modeled after the work of Pederson and Moran (1995). This visit was purposely designed to create a situation during which maternal attention was solicited by both infant

demands and research- related tasks (e.g., mothers had to fill in questionnaires while infants were not cared for by the research assistant). This aimed at challenging mothers' capacity to divide their attention between competing demands, thus reproducing the natural conditions of daily life when caring for an infant. Restricting maternal availability to infant demands is a classic trigger of the attachment system in infancy (Ainsworth et al., 1978). The research assistants completed the AQS immediately after the visit. In order to maximize the reliability of the observations performed during these home visits, which was central to this study, we followed Pederson and Moran's (1995) recommendations for training our home visitors. Research assistants first attended a 2-day training workshop on techniques of home visiting and structured observation of mother–infant interactions. They reviewed several videotapes to practice coding the AQS. The assistants then performed their first few home visits with a more experienced colleague, and the two completed the AQS together. When the junior home visitors were deemed ready to lead home visits independently, the next two or three visits were followed by a debriefing session with an experienced graduate student, to review the salient elements of the visit before scoring the AQS. Inter-rater reliability testing (described below) took place only after assistants had successfully completed this training.

The AQS consists of 90 items measuring the quality of the child's attachment behaviors toward a specific figure (the mother in this case). Each item of the AQS describes a potential child behavior. Based on observations performed during the entire home visit, research assistants sorted those behaviors into nine clusters of 10 items each, ranging from “very similar” to “very unlike” the observed child's behaviors. The global score for attachment security consists of the correlation between the observer's sort of the 90 items and a criterion sort for the prototypically secure infant (Waters and Deane, 1985). Attachment security scores can thus range from -1.0 (highly insecure) to 1.0 (highly secure). Prototypical security represents a fluid balance between

exploration of the environment and appropriate reliance on the caregiver for support when needed. To examine inter-rater reliability, 23.1% of the home visits were conducted by two research assistants, who then completed the AQS independently. Agreement between the two raters' sorts was satisfactory, intra-class correlation (ICC) = 0.71.

Pubertal status

A parent-report version of the rating scale for pubertal development (Carskadon and Acebo, 1993) was completed at the time of the MRI (T2). Parents evaluated their child's pubertal development using a scale ranging from 1 = "not yet started" to 4 = "seems completed." Children's pubertal status was derived from three items for both boys (body hair growth, voice change, facial hair growth) and girls (body hair growth, breast development, menarche), as described by Carskadon and Acebo (1993).

Structural Magnetic Resonance Imaging

Acquisition

Neuroimaging data were collected at T2 using a 32-channel head coil on a Siemens 3 Tesla scanner (MAGNETOM Trio, Siemens, Erlangen, Germany). Structural data were acquired using a three-dimensional T1-weighted 4-echo magnetization- prepared rapid gradient-echo sequence [3D-T1-4echo-MPRAGE sagittal; repetition time (TR): 2530 ms; first echo time (TE): 1.64 ms; echo spacing Δ TE: 1.86 ms; flip angle: 7°; 176 slices; slice thickness: 1 mm; no gap; matrix: 256 × 256; field of view (FoV): 256 mm; in-plane resolution: 1 mm × 1 mm; duration: 363 s].

Pre-processing

Pre-processing for the voxel-based morphometry (VBM) and the surface-based morphometry (SBM) analyses were performed using the SPM12 package (Statistical Parametric

Mapping, Institute of Neurology, London, United Kingdom) and the CAT12 Toolbox¹ running on MATLAB version R2016a (MathWorks, Inc., Natick, MA, United States). For VBM, T1-weighted images were segmented into GM, white matter (WM), and cerebrospinal fluid (CSF) using age- appropriate stereotaxic tissue probability maps (NIHPD 7.5-13.5 asymmetric²; Fonov et al., 2011). Pediatric templates were used to minimize the potential confounds introduced by developmental differences in cortical morphometry (Yoon et al., 2009). Next, the segments were spatially normalized to the Montreal Neurological Institute (MNI) space with a voxel size of 1.5 mm × 1.5 mm × 1.5 mm. Finally, the resulting GM maps were modulated and smoothed with 8-mm full-width-at-half- maximum (FWHM) smoothing kernels. For SBM, T1-weighted images were segmented and spatially normalized as for VBM. The cortical surface was reconstructed from volumetric data using the projection-based thickness method. The cortical thickness maps were resampled onto the cortical surface and smoothed with a standard 15-mm FWHM smoothing kernel.

Statistical Analyses

The threshold-free cluster enhancement (TFCE) method implemented in CAT12 was used to identify statistically significant clusters. TFCE is a cluster-based thresholding method that overcomes the problem of choosing an arbitrary cluster- forming threshold, while keeping the sensitivity advantage of cluster-based thresholding (Smith and Nichols, 2009). TFCE uses a permutation approach that maximizes statistical power in small sample studies (Pernet et al., 2015). Using 5,000 permutations and non-parametric testing, a voxel-wise p-value map is produced. An explicit GM mask based on the mean normalized GM images of all participants

¹ www.neuro.uni-jena.de/cat/

² www.bic.mni.mcgill.ca/ServicesAtlases/NIHPD-obj1

was used to ensure that the analyses were restricted to GM. Resulting statistical maps were thresholded at $p < 0.05$ corrected for multiple comparisons by false discovery rate (FDR; Chumbley et al., 2010).

Main analysis

The main analyses focused on GM volume and thickness. A multiple regression analysis was performed using CAT12 to predict GM volumes in late childhood from attachment security in infancy, after accounting for confounding variables (described below). Similar analyses were performed to predict cortical thickness, and right and left hemispheres were analyzed separately. In order to account for differences in overall brain size, total intracranial volume (ICV) was controlled for in the VBM analyses (Barnes et al., 2010; Malone et al., 2015). As ICV is not related to cortical thickness (Toro et al., 2008; Winkler et al., 2010), it was not controlled for in the SBM analyses. Child age and sex, pubertal status, as well as maternal education are associated with cortical volume and thickness (Barnes et al., 2010; Blakemore et al., 2010; Jednoróg et al., 2012), and were therefore included as covariates in both the VBM and SBM analyses.

The AQS score was missing for one child. In line with recommendations for best practices for handling missing data, multiple imputation was employed to estimate the missing value (Enders, 2010) using the Markov Chain Monte Carlo procedure (Geyer, 1992) in SPSS software version 24.0 (IBM Corp., Armonk, NY, United States). Ten imputations were used and then averaged to maximize the precision of imputed data (Graham, 2009; Enders, 2010). To reach maximal accuracy, the imputations were performed based on the original 64 families using child sex and age at T1, as well as parental age and education at the time of recruitment as predictors in the imputation equation.

Results

Descriptive statistics

At the time of initial recruitment (when children were 7 months old; $n = 33$), mothers and fathers were, respectively, on average 31.73 ($SD = 5.10$) and 33.27 ($SD = 5.00$) years old and had on average 15.36 ($SD = 2.28$; range 10–18) and 15.58 ($SD = 2.00$; range 11–17) years of education. The families' average income fell in the \$60,000 to \$79,000 bracket. The majority of mothers (78.80%) and fathers (75.80%) were Caucasian. Most families had French as their first language (78.80%). Attachment security scores at T1 varied from -0.28 to 0.75 ($M = 0.49$, $SD = 0.26$).

At T2, almost half of the children (45%) were pre-pubertal, two were early pubertal (6%), 15 were mid-pubertal (45%), and one was post-pubertal (3%). Average brain volumetric data were: 1529.34 cm^3 ($SD = 106.58$, range = 1317.63 – 1854.37) for total ICV; 833.27 cm^3 ($SD = 53.40$, range = 725.37 – 987.76) for total GM volume; 442.40 cm^3 ($SD = 44.44$, range = 367.07 – 552.58) for total WM volume; and 253.67 cm^3 ($SD = 23.68$, range = 205.73 – 314.04) for total CSF. Table 2 displays the bivariate correlations among attachment security, child age and sex, pubertal status, maternal education, and volumetric data (total ICV, total GM volume, total WM volume, and total CSF). No outliers were identified on any of the attachment or anatomical measures.

Voxel-Based Morphometry

Multiple regression analysis indicated that after accounting for child age, sex, pubertal status, maternal education, and total ICV, children who were more securely attached to their mother in infancy had larger GM volumes in the right hemisphere covering the superior temporal sulcus and gyrus, extending to the middle temporal gyrus, and into the temporo-parietal junction. Increased GM volume in the left superior temporal sulcus and in the bilateral precentral gyri was

also related to higher attachment quality (see Figure 1 and Table 3). No significant supra-threshold voxels were found for negative contrasts.

Surface-Based Morphometry

Multiple regression analysis indicated that attachment security in infancy was not significantly related to cortical thickness in late childhood, neither positively nor negatively, over and above child age, sex, pubertal status, and maternal education ($p > 0.001$, uncorrected).

Discussion

To our knowledge, this is the first study to examine the prospective associations between attachment security in infancy and whole-brain GM volume and thickness in childhood. The main findings indicate that children who were more securely attached to their mother in infancy (15 months) had larger GM volume in the bilateral superior temporal sulci, right superior temporal gyrus, right temporo-parietal junction, and the bilateral precentral gyri in late childhood (10–11 years). These results survived a multiple comparisons correction after controlling for several potentially confounding variables. No significant association was found between attachment security and cortical thickness. Consistent with animal studies indicating that enriched caregiving is associated with optimal brain development (Greenough et al., 1987; Van Praag et al., 2000; Meaney, 2001), the current study provides rare data in humans consistent with the idea that attachment relationships may affect children's brain development, as reflected by larger GM volume in the frontal and temporal lobes. Moreover, these results contribute to the emerging literature indicating that variations in the quality of caregiving experiences within the normative range are associated with child brain morphology (Luby et al., 2012, 2016; Whittle et al., 2014, 2016; Kok et al., 2015, 2017).

Specifically, better quality mother–child relationships in infancy were found to be predictive of larger GM volume in the superior and middle temporal gyri, superior temporal sulci,

temporo-parietal junction, and precentral gyri in late childhood. This appears to be the first evidence of a relation between a direct observational measure of caregiving quality (whether parenting or attachment) and GM volume in these specific brain regions. The lack of prior comparable findings may be partly expected, given that no previous studies have investigated the association between parent–child relationship quality or parental behaviors and *whole-brain* GM volume in a pediatric community sample. However, the current findings are broadly consistent with studies reporting smaller GM volume or surface in the superior and middle temporal gyri of maltreated children (Hanson et al., 2010; De Brito et al., 2013; Kelly et al., 2013, 2015; Lim et al., 2014). These areas are critical for processing emotional stimuli (Allison et al., 2000), a function that is impaired in maltreated children, as indicated by event-related potential and functional MRI studies (see da Silva Ferreira et al., 2014 for a systematic review; Pollak et al., 2001). Importantly, the preliminary results presented here suggest that even normative variations in relationship quality may have a long-lasting impact on the development of these brain regions. This is a promising first step, but independent replication is necessary.

In contrast to previous studies reporting an association between parental behavior and cortical thickness in typically developing children (Whittle et al., 2014, 2016; Kok et al., 2015), no significant association was found in this sample between attachment security in infancy and cortical thickness in late childhood. Methodological differences, such as the modest sample size and related limited statistical power in the current study, may account for this discrepancy. Developmental considerations may also be at play. Brain volume and thickness follow an inverted U-shape developmental trajectory characterized by an increase during childhood, a region-specific peak in late childhood and early adolescence, and a subsequent decrease (Shaw et al., 2008; Giedd et al., 2015). Results reported here are age-specific (10–11 years); in a younger or older sample, results may be different. Previous work by Kok et al. (2015) indicates that

maternal sensitivity in early childhood is associated with brain volume and thickness in 8-year-old children. Moreover, as Teicher and Samson (2016) underscore, caregiving experiences may not relate to brain structures at one specific period of development, but rather, they may be associated with the trajectory of brain development over time (see also Whittle et al., 2014). Thus, one intriguing possibility that could be investigated in future work is that attachment security may not relate to cortical thickness at specific ages, but rather to the rhythm of cortical thickening and then thinning over time. Alternatively, the findings may be theoretically meaningful, indicating for instance that, although related to an extent, parenting behavior and parent–child attachment may have a different impact on brain development. Of note, we did not find links between attachment and amygdalar volume as observed by Moutsiana et al. (2015) and Lyons-Ruth et al. (2016). In addition to the different composition of the samples studied and the different attachment measure used, developmental considerations may again underlie discrepant findings, given that the previous studies found links between early attachment and amygdalar volume in adulthood. Longitudinal designs including repeated MRI would be useful to more accurately depict the developmental aspects of the brain-attachment associations.

Attachment and the developing brain: Proposed mechanisms

Children more securely attached to their primary caregivers are exposed to a variety of experiences that differ from those characterizing insecurely attached children. These experiences may influence children’s brain development in regions involved in social, cognitive, and emotional functioning. A central way in which the experience of securely attached infants differs from that of their insecurely attached counterparts is with regards to the quality of the emotion regulation provided by the caregiver. Indeed, one of the hallmarks of a secure attachment relationship is the caregiver’s capacity to provide adequate external regulation when the infant encounters an affectively challenging situation during exploration (e.g., frustration when faced

with a complex toy, fear of a large dog in the park). As a result, securely attached children are exposed to repeated experiences of successful regulation in emotionally taxing situations, which provides a strong basis for the gradual development of self-regulation (Calkins, 2004; Cole et al., 2004). The superior and middle temporal gyri are activated when subjects need to down-regulate their negative affect (Ochsner et al., 2004; Frank et al., 2014), and extensive evidence from human and non-human primates points to a crucial role for the superior temporal gyrus and sulcus for processing emotional faces stimuli (Britton et al., 2006; Pagliaccio et al., 2013). If replicated, the current findings would suggest that the repeated experiences of successful emotion regulation that characterize secure attachment relationships may promote optimal development in brain regions that subsume socio-emotional regulation, such as the superior and middle temporal gyri, through experience-dependent processes.

An alternative hypothesis for the observed relation between attachment and brain structure pertains to one of the central notions of attachment theory, that of “internal working models” (Bowlby, 1969/1982, 1973, 1980, 1988). These models consist of mental representations of self and others, which are thought to be shaped by daily interactions with primary caregivers. The repeated experiences of responsive care that characterize secure attachment are believed to promote the development of positive internal working models of self and others (Bretherton and Munholland, 2016). It is theorized that these models are progressively internalized, becoming an integral part of the child’s personality, and are increasingly generalized to new relationships, guiding behavior and interpretation in new social situations and helping children correctly anticipate future social interactions (Bretherton and Munholland, 2016). Empirical evidence indeed shows that securely attached infants develop positive expectations about social interactions (Johnson et al., 2010; Biro et al., 2015). Importantly, the superior and middle temporal gyri, temporo- parietal junction, and precentral gyrus are involved in the representation

and elaboration of past and future events (Kelley et al., 2002; Addis et al., 2007; Spreng et al., 2009; Holland et al., 2011; Jacques et al., 2011) and representation of self and others (Ruby and Decety, 2001; Ochsner et al., 2004). The positive expectations about social relationships characterizing secure attachment working models may lead securely attached children to engage more confidently in social interactions. Thus, these children are likely to be more frequently engaged in stimulating social interactions which may result in recurrent activation of brain regions involved in the representation of self and others in social contexts. As such, secure attachment could promote the optimal structural development of the superior and middle temporal gyri, temporo-parietal junction, and precentral gyrus.

Lastly, social perception and social cognition may play a role in the attachment-brain structure links uncovered here. Social perception is an important basis for the development of attachment relationships. In order to effectively attain a caregiver's proximity, children have to adapt their attachment behaviors toward their caregivers according to the context, caregiver location, and the specific characteristics of the caregiver with whom they are interacting (Cassidy, 2016; Sroufe, 2016). Recognizing the caregiver's face and affective state as well as following his or her eye gaze and movements support the contextual adaptation of infant attachment behavior for proximity seeking. As such, empirical evidence indicates that higher levels of attachment security in infancy are associated with better emotion recognition skills up to 10 years later (Steele et al., 2008). Assuming that future research replicates the current results, the association between attachment security and GM volume in the superior and middle temporal gyri may therefore be related to the importance of these brain regions for social perception, such as the detection of faces, eye gaze, and biological motion (Puce et al., 1998; Allison et al., 2000; Haxby et al., 2000; Engell and Haxby, 2007; Saygin, 2007). It is possible that securely attached children are more successful in adapting their attachment behaviors to the context by recruiting

temporal regions involved in social perception, which in turn promotes the development of these regions. The value of attachment security for complex social cognitive processes and social functioning is also well established (Thompson, 2016), and numerous studies have underscored the role of the superior temporal sulcus and gyrus, middle temporal gyrus, and the temporo-parietal junction in theory of mind, moral reasoning, and empathy (see Bzdok et al., 2012, for a meta-analysis). Larger GM volumes in the superior and middle temporal gyri have been related to more optimal social skills, such as better emotion recognition (Shdo et al., 2017) and better ability to predict others' behavior based on mental states (Powell et al., 2014). Conversely, reduced GM thickness or volume in the superior and middle temporal gyri has been associated with lack of empathy and compassion and severity of conduct disorder symptomatology (Huebner et al., 2008; Fahim et al., 2011; Wallace et al., 2014). Overall, these studies suggest that GM volume and functional activity in the superior temporal sulcus and gyrus, middle temporal gyrus, and temporo-parietal junction are closely linked with social cognition and social functioning, of which attachment security is a well-known predictor (Thompson, 2016). Social cognitive experiences embedded in secure attachment relationships provide children with a more sophisticated understanding of the psychological dimensions of social interactions (Thompson, 2016) and may therefore contribute to shaping the structural development of regions involved in social cognition, such as the superior temporal sulcus and gyrus, the middle temporal gyrus, and the temporo-parietal junction.

Limitations

The results presented here must be interpreted in the context of some limitations. First, the longitudinal but non-experimental design precludes causal inference and determination of directionality. The possibility that larger GM volumes in the superior and middle temporal gyri, the superior temporal sulci, the temporo-parietal junction, and the precentral gyri were already

present in these children in infancy, and may have predisposed them to develop secure attachment to their mothers, cannot be excluded. In fact, given that developmental processes are transactional by nature (Sameroff, 2009), it is reasonable to expect that any caregiving-brain associations are probably bidirectional, reflecting the action of mutual reciprocal influences between parent and child (Serbin et al., 2015). The non-experimental design also leaves open some third-variable explanations, notably the possibility that shared genes between mother and child may be partly responsible for the links observed. This is unlikely to have played a major role in the current results though, given that several genetically informed studies show that the variance in mother-child attachment security (Bokhorst et al., 2003; O'Connor and Croft, 2001; Roisman and Fraley, 2008) and the variance in maternal caregiving behavior (Roisman and Fraley, 2008) are almost entirely attributable to environmental influences, with small to negligible genetic contributions. Other third- variable explanations are possible though, one of which being that caregiving experiences (e.g., exposure to higher parental sensitivity) could influence both the quality of attachment relationships and the development of corresponding brain regions. Second, the small sample size and the use of several covariates reduced statistical power, potentially leading to underestimation of the links between attachment and brain volumes and thickness. Clearly, replication in larger independent samples is necessary to confirm the links reported here, especially for clusters in the right temporo-parietal junction and precentral gyrus, as well as in the left precentral gyrus and superior temporal sulcus, due to the small number of voxels contained in these clusters. Third, the attachment measure used in the current study does not allow the assessment of attachment disorganization (the most extreme form of attachment insecurity, assessed exclusively through the SSP), which one study found to be related to amygdalar volume (Lyons-Ruth et al., 2016). Disorganized attachment relationships are associated with the development of psychopathology, poor emotion regulation skills, and poor

relationships with peers and adults (Lyons-Ruth and Jacobvitz, 2016), which could be reflected in children's brain morphology, especially in brain regions known to be involved in socio-emotional functioning (limbic system, social brain). Fourth, we did not assess father– child attachment security, which may differentially influence brain development given that fathers have unique contributions to children's social and cognitive development (see Cabrera and Tamis-LeMonda, 2013). However, Kok et al. (2015) reported that the associations between parental sensitivity and brain morphology were similar for mothers and fathers in their sample.

Conclusion

This 9-year longitudinal study suggests that better mother–child attachment quality in infancy is related to greater GM volume in the superior temporal sulcus and gyrus, the temporo-parietal junction, and precentral gyrus in late childhood, whereas no associations with measures of cortical thickness were found. This appears to be the first study to investigate the link between infant-caregiver attachment quality and brain morphometry in childhood. The use of a gold-standard observational measure of attachment security in the ecological context of the family home, along with whole-brain analyses using a pediatric template, enabled the identification of novel associations between attachment and brain regions involved in social, cognitive, and emotional functioning, and these associations were robust to several important covariates. Although preliminary and in need of replication, the present results provide further evidence that infant quality of attachment toward a primary caregiver is important not only for children's social, emotional, and cognitive functioning, but may also be involved in their brain development. As in previous studies focusing on maltreatment (e.g., da Silva Ferreira et al., 2014; Puetz et al., 2017), future research in normative samples could test, using other methodologies (e.g., diffusion tensor imaging, functional connectivity, event-related potentials), the breadth of the links between attachment security in infancy and brain morphology and functions.

Declarations

Ethic statement

The research ethics committee of aging-neuroimaging of the CIUSSS du Centre-Sud-de-l'île-de-Montréal approved the study. The goal of the study was explained to children and their parents, who signed a detailed informed consent form. We report how we determined our sample size, all manipulations, and all measures in the study.

Author contributions

ÉL participated in data collection, performed statistical analyses, and drafted the initial manuscript. AB designed the study, wrote parts of the manuscript and revised it for intellectual content. MB contributed to designing the study, edited and revised the manuscript for intellectual content. FD contributed to data analyses and interpretation, wrote parts of the manuscript and revised it for intellectual content. VD participated in data collection and methodological choices, and revised the manuscript for intellectual content. All authors gave their final approval of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work.

Funding

This work was supported by grants awarded to AB by the Canadian Institutes of Health Research [MOP-119390], the Social Sciences and Humanities Research Council of Canada [410-2010-1366], and the Fonds de Recherche du Québec - Société et Culture [2012-RP-144923].

Acknowledgement

The authors wish to acknowledge Natasha Ballen, Marie-Ève Bélanger, Stéphanie Bordeleau, Andrée-Anne Bouvette-Turcot, Catherine Cimon-Paquet, Isabelle Demers, Marie Deschênes, Christine Gagné, Sarah Hertz, Véronique Jarry-Boileau, Jessica Laranjo, Élodie Larose-Grégoire, Nadine Marzougui, Célia Matte-Gagné, Rachel Perrier, Émilie Rochette, Marie-Soleil Sirois, Émilie Tétreault, and Natasha Whipple for help with data collection. The

authors also want to express special gratitude to the participating families of the Grandir Ensemble project who generously opened their homes to us. The authors thank Andre van der Kouwe from the Massachusetts General Hospital for the use of the MPAGE 4-echo sequence.

References

- Addis, D. R., Wong, A. T., and Schacter, D. L. (2007). Remembering the past and imagining the future: Common and distinct neural substrates during event construction and elaboration. *Neuropsychologia*, *45*(7), 1363–1377. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2006.10.016
- Adolphs, R. (2009). The social brain: Neural basis of social knowledge. *Annual Review of Psychology*, *60*, 693-716. doi: 10.1146/annurev.psych.60.110707.163514
- Ainsworth, M. D. S. (1967). *Infancy in Uganda: Infant care and the growth of attachment*. Johns Hopkins University Press.
- Ainsworth, M. D. S. (1985). Patterns of infant–mother attachment: Antecedents and effects on development. *Bulletin of the New York Academy of Medicine*, *61*(9), 771–791.
- Ainsworth, M. D. S., Blehar, M. C., Waters, E., and Wall, S. (1978). *Patterns of Attachment*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Allison, T., Puce, A., and McCarthy, G. (2000). Social perception from visual cues: Role of the STS region. *Trends in Cognitive Sciences*, *4*(7), 267–278. doi: 10.1016/S1364-6613(00)01501-1
- Barnes, J., Ridgway, G. R., Bartlett, J., Henley, S. M., Lehmann, M., Hobbs, N. et al. (2010). Head size, age and gender adjustment in MRI studies: A necessary nuisance? *NeuroImage*, *53*(4), 1244–1255. doi: 10.1016/j.neuroimage.2010.06.025
- Belsky, J., and de Haan, M. (2011). Annual research review: Parenting and children’s brain development: The end of the beginning. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *52*(4), 409–428. doi: 10.1111/j.1469-7610.2010.02281.x
- Biro, S., Alink, L. R., Huffmeijer, R., Bakermans-Kranenburg, M. J., and Van IJzendoorn, M. H. (2015). Attachment and maternal sensitivity are related to infants' monitoring of animated social interactions. *Brain and Behavior*, *5*(12), e00410. doi: 10.1002/brb3.410

- Blakemore, S. J. (2008). The social brain in adolescence. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(4), 267-277. doi: 10.1038/nrn2353
- Blakemore, S. J., Burnett, S., and Dahl, R. E. (2010). The role of puberty in the developing adolescent brain. *Human Brain Mapping*, 31(6), 926–933. doi: 10.1002/hbm.21052
- Bokhorst, C. L., Bakermans-Kranenburg, M. J., Fearon, R. P., Van IJzendoorn, M. H., Fonagy, P., and Schuengel, C. (2003). The importance of shared environment in mother–infant attachment security: A behavioral genetic study. *Child Development*, 74(6), 1769–1782. doi: 10.1046/j.1467-8624.2003.00637.x
- Bowlby, J. (1956). The growth of independence in the young child. *Royal Society of Health Journal*, 76, 587–591.
- Bowlby, J. (1973). *Attachment and Loss: Vol. 2*. Basic Books.
- Bowlby, J. (1980). *Attachment and Loss: Vol. 3*. Basic Books.
- Bowlby, J. (1982). *Attachment and loss: Vol. I* (2nd ed.). Basic Books. (Original work published 1969)
- Bowlby, J. (1988). *A Secure Base: Clinical applications of attachment theory*. Basic Books.
- Bretherton, I., & Munholland, K. A. (2016). The internal working model construct in light of contemporary neuroimaging research. In J. Cassidy, & P. R. Shaver (Eds.), *Handbook of Attachment: Theory, Research, and Clinical Applications* (pp. 102–127). Guilford Press.
- Britton, J. C., Phan, K. L., Taylor, S. F., Welsh, R. C., Berridge, K. C., and Liberzon, I. (2006). Neural correlates of social and nonsocial emotions: An fMRI study. *NeuroImage*, 31(1), 397–409. doi: 10.1016/j.neuroimage.2005.11.027
- Bzdok, D., Schilbach, L., Vogeley, K., Schneider, K., Laird, A. R., Langner, R. et al. (2012). Parsing the neural correlates of moral cognition: ALE meta-analysis on morality, theory

of mind, and empathy. *Brain Structure and Function*, 217(4), 783–796. doi:
10.1007/s00429-012-0380-y

Cabrera, N. J., and Tamis-LeMonda, C. S. (2013). *Handbook of Father Involvement: Multidisciplinary Perspectives*. Taylor and Francis.

Cadman, T., Diamond, P. R., and Fearon, R. P. (2017). Reassessing the validity of the Attachment Q-Sort: An updated meta-analysis. *Infant and Child Development*. In press. doi: 10.1002/icd.2034

Calkins, S. D. (2004). Early attachment processes and the development of self regulation. In R. F. Baumeister, & K. D. Vohs (Eds.), *Handbook of Self Regulation: Research, Theory and Applications* (pp. 324–339). Guilford Press.

Carskadon, M. A., and Acebo, C. (1993). A self-administered rating scale for pubertal development. *Journal of Adolescent Health*, 14(3), 190–195. doi: 10.1016/1054-139X(93)90004-9

Cassidy, J. (2016). The nature of child's tie. In J. Cassidy, & P. R. Shaver (Eds.), *Handbook of Attachment: Theory, Research, and Clinical Applications* (pp. 3–24). Guilford Press.

Chumbley, J., Worsley, K., Flandin, G., and Friston, K. (2010). Topological FDR for neuroimaging. *NeuroImage*, 49(4), 3057–3064. doi: 10.1016/j.neuroimage.2009.10.090

Coan, J. A. (2016). Toward a neuroscience of attachment. In J. Cassidy, & P. R. Shaver (Eds.), *Handbook of Attachment: Theory, Research, and Clinical Applications* (pp. 242–269). Guilford Press.

Cole, P. M., Martin, S. E., and Dennis, T. A. (2004). Emotion regulation as a scientific construct: Challenges and directions for child development research. *Child Development*, 75(2), 317–333. doi: 10.1111/j.1467-8624.2004.00673.x

- Cooke, J. E., Stuart-Parrigon, K. L., Movahed-Abtahi, M., Koehn, A. J., and Kerns, K. A. (2016). Children's emotion understanding and mother-child attachment: A meta-analysis. *Emotion, 16*(8), 1102–1106. doi: 10.1037/emo0000221
- Cuddihy, C., Dorris, L., Minnis, H., and Kocovska, E. (2013). Sleep disturbance in adopted children with a history of maltreatment. *Adoption and Fostering, 37*(4), 404–411. doi: 10.1177/0308575913508715
- Cyr, C., Euser, E. M., Bakermans-Kranenburg, M. J., and Van IJzendoorn, M. H. (2010). Attachment security and disorganization in maltreating and high-risk families: A series of meta-analyses. *Development and Psychopathology, 22*(1), 87–108. doi: 10.1017/S0954579409990289
- da Silva Ferreira, G. C., Crippa, J. A., and de Lima Osorio, F. (2014). Facial emotion processing and recognition among maltreated children: A systematic literature review. *Frontiers in Psychology, 5*(1460), 1-10. doi: 10.3389/fpsyg.2014.01460
- De Brito, S. A., Viding, E., Sebastian, C. L., Kelly, P. A., Mechelli, A., Maris, H. et al. (2013). Reduced orbitofrontal and temporal grey matter in a community sample of maltreated children. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, 54*(1), 105–112. doi: 10.1111/j.1469-7610.2012.02597.x
- De Wolff, M. S., and Van IJzendoorn, M. H. (1997). Sensitivity and attachment: A meta-analysis on parental antecedents of infant attachment. *Child Development, 68*(4), 571–591. doi: 10.1111/j.1467-8624.1997.tb04218.x
- Deen, B., Koldewyn, K., Kanwisher, N., and Saxe, R. (2015). Functional organization of social perception and cognition in the superior temporal sulcus. *Cerebral Cortex, 25*(11), 4596–4609. doi: 10.1093/cercor/bhv111

- Dölen, G., and Malenka, R. C. (2014). The emerging role of nucleus accumbens oxytocin in social cognition. *Biological Psychiatry*, *76*, 354–355. doi: 10.1016/j.biopsych.2014.06.009
- Edwards, V. J., Holden, G. W., Felitti, V. J., and Anda, R. F. (2003). Relationship between multiple forms of childhood maltreatment and adult mental health in community respondents: Results from the adverse childhood experiences study. *American Journal of Psychiatry*, *160*(8), 1453–1460. doi: 10.1176/appi.ajp.160.8.1453
- Eisenberger, N. I., and Cole, S. W. (2012). Social neuroscience and health: Neurophysiological mechanisms linking social ties with physical health. *Nature Neuroscience*, *15*(5), 669–674. doi: 10.1038/nn.3086
- Enders, C. K. (2010). *Applied missing data analysis*. Guilford Press.
- Engell, A. D., and Haxby, J. V. (2007). Facial expression and gaze-direction in human superior temporal sulcus. *Neuropsychologia*, *45*(14), 3234–3241. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2007.06.022
- Fahim, C., He, Y., Yoon, U., Chen, J., Evans, A., and Pérusse, D. (2011). Neuroanatomy of childhood disruptive behavior disorders. *Aggressive Behavior*, *37*(4), 326–337. doi: 10.1002/ab.20396
- Fearon, R. P., Bakermans-Kranenburg, M. J., Van IJzendoorn, M. H., Lapsley, A. M., and Roisman, G. I. (2010). The significance of insecure attachment and disorganization in the development of children's externalizing behavior: A meta-analytic study. *Child Development*, *81*(2), 435–456. doi: 10.1111/j.1467-8624.2009.01405.x
- Fearon, R. P., and Belsky, J. (2016). Precursors of attachment security. In J. Cassidy, & P. R. Shaver (Eds.), *Handbook of Attachment: Theory, Research, and Clinical Applications* (pp. 291–313). Guilford Press.

- Fonov, V., Evans, A. C., Botteron, K., Almli, C. R., McKinstry, R. C., Collins, D. L. et al. (2011). Unbiased average age-appropriate atlases for pediatric studies. *NeuroImage*, *54*(1), 313–327. doi: 10.1016/j.neuroimage.2010.07.033
- Fraley, R. C., and Spieker, S. J. (2003). Are infant attachment patterns continuously or categorically distributed? A taxometric analysis of strange situation behavior. *Developmental Psychology*, *39*(3), 387–404. doi: 10.1037/0012-1649.39.3.387
- Frank, D. W., Dewitt, M., Hudgens-Haney, M., Schaeffer, D. J., Ball, B. H., Schwarz, N. F. et al. (2014). Emotion regulation: Quantitative meta-analysis of functional activation and deactivation. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *45*, 202–211. doi: 10.1016/j.neubiorev.2014.06.010
- Geyer, C. J. (1992). Practical markov chain monte carlo. *Statistical Science*, *7*(4), 473–483.
- Giedd, J. N., Raznahan, A., Alexander-Bloch, A., Schmitt, E., Gogtay, N., and Rapoport, J. L. (2015). Child psychiatry branch of the National Institute of Mental Health longitudinal structural magnetic resonance imaging study of human brain development. *Neuropsychopharmacology*, *40*(1), 43-49. doi: 10.1038/npp.2014.236
- Goodkind, M., Eickhoff, S. B., Oathes, D. J., Jiang, Y., Chang, A., Jones-Hagata, L. B. et al. (2015). Identification of a common neurobiological substrate for mental illness. *JAMA Psychiatry*, *72*(4), 305–315. doi: 10.1001/jamapsychiatry.2014.2206
- Graham, J. W. (2009). Missing data analysis: Making it work in the real world. *Annual Review of Psychology*, *60*, 549–576. doi: 10.1146/annurev.psych.58.110405.085530
- Greenough, W. T., Black, J. E., and Wallace, C. S. (1987). Experience and brain development. *Child Development*, *58*(3), 539-559.
- Groh, A. M., Fearon, R. P., Bakermans-Kranenburg, M. J., Van IJzendoorn, M. H., Steele, R. D., and Roisman, G. I. (2014). The significance of attachment security for children’s social

competence with peers: A meta-analytic study. *Attachment and Human Development*, 16(2), 103–136. doi: 10.1080/14616734.2014.883636

Groh, A. M., Fearon, R. P., Van IJzendoorn, M. H., Bakermans-Kranenburg, M. J., and Roisman, G. I. (2017a). Attachment in the early life course: Meta-analytic evidence for its role in socioemotional development. *Child Development Perspectives*, 11(1), 70–76. doi: 10.1111/cdep.12213

Groh, A. M., Propper, C., Mills-Koonce, R., Moore, G. A., Calkins, S., and Cox, M. (2017b). Mothers' physiological and affective responding to infant distress: Unique antecedents of avoidant and resistant attachments. *Child Development*. In press. doi: 10.1111/cdev.12912

Groh, A. M., Roisman, G. I., Van IJzendoorn, M. H., Bakermans-Kranenburg, M. J., and Fearon, R. P. (2012). The significance of insecure and disorganized attachment for children's internalizing symptoms: A meta-analytic study. *Child Development*, 83(2), 591–610. doi: 10.1111/j.1467-8624.2011.01711.x

Gunnar, M. R., Fisher, P. A., and the Early Experience Stress and Prevention Science Network (2006). Bringing basic research on early experience and stress neurobiology to bear on preventive interventions for neglected and maltreated children. *Development and Psychopathology*, 18(3), 651–677. doi: 10.1017/S0954579406060330

Hanson, J. L., Chung, M. K., Avants, B. B., Shirtcliff, E. A., Gee, J. C., Davidson, R. J. et al. (2010). Early stress is associated with alterations in the orbitofrontal cortex: A tensor-based morphometry investigation of brain structure and behavioral risk. *Journal of Neuroscience*, 30(22), 7466–7472. doi: 10.1523/jneurosci.0859-10.2010

Harlow, H. F., and Harlow, M. K. (1962). Social deprivation in monkeys. *Scientific American*, 207, 136–146.

- Haxby, J. V., Hoffman, E. A., and Gobbini, M. I. (2000). The distributed human neural system for face perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(6), 223–233. doi: 10.1016/S1364-6613(00)01482-0
- Holland, A. C., Addis, D. R., and Kensinger, E. A. (2011). The neural correlates of specific versus general autobiographical memory construction and elaboration. *Neuropsychologia*, 49(12), 3164–3177. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2011.07.015
- Huebner, T., Vloet, T. D., Marx, I., Konrad, K., Fink, G. R., Herpertz, S. C. et al. (2008). Morphometric brain abnormalities in boys with conduct disorder. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 47(5), 540–547. doi: 10.1097/CHI.0b013e3181676545
- Hussey, J. M., Chang, J. J., and Kotch, J. B. (2006). Child maltreatment in the United States: Prevalence, risk factors, and adolescent health consequences. *Pediatrics*, 118(3), 933–942. doi: 10.1542/peds.2005-2452
- Jacques, P. L. S., Conway, M. A., Lowder, M. W., and Cabeza, R. (2011). Watching my mind unfold versus yours: An fMRI study using a novel camera technology to examine neural differences in self-projection of self versus other perspectives. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(6), 1275–1284. doi: 10.1162/jocn.2010.21518
- Jednoróg, K., Altarelli, I., Monzalvo, K., Fluss, J., Dubois, J., Billard, C. et al. (2012). The influence of socioeconomic status on children’s brain structure. *PloS one*, 7(8), e42486. doi: 10.1371/journal.pone.0042486
- Johnson, D. E., Guthrie, D., Smyke, A. T., Koga, S. F., Fox, N. A., Zeanah, C. H. et al. (2010a). Growth and associations between auxology, caregiving environment, and cognition in socially deprived Romanian children randomized to foster vs ongoing institutional care.

Archives of Pediatrics and Adolescent Medicine, 164(6), 507–516. doi:

10.1001/archpediatrics.2010.56

Johnson, S. C., Dweck, C. S., Chen, F. S., Stern, H. L., Ok, S. J., and Barth, M. (2010b). At the intersection of social and cognitive development: Internal working models of attachment in infancy. *Cognitive Science*, 34(5), 807–825. doi: 10.1111/j.1551-6709.2010.01112.x

Kalisch, R., and Gerlicher, A. M. (2014). Making a mountain out of a molehill: On the role of the rostral dorsal anterior cingulate and dorsomedial prefrontal cortex in conscious threat appraisal, catastrophizing, and worrying. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 42, 1–8. doi: 10.1016/j.neubiorev.2014.02.002

Kelley, W. M., Macrae, C. N., Wyland, C. L., Caglar, S., Inati, S., and Heatherton, T. F. (2002). Finding the self? An event-related fMRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(5), 785–794. doi: 10.1162/08989290260138672

Kelly, P. A., Viding, E., Puetz, V. B., Palmer, A. L., Mechelli, A., Pingault, J. B. et al. (2015). Sex differences in socioemotional functioning, attentional bias, and gray matter volume in maltreated children: A multilevel investigation. *Development and Psychopathology*, 27(4pt2), 1591–1609. doi: 10.1017/S0954579415000966

Kelly, P. A., Viding, E., Wallace, G. L., Schaer, M., De Brito, S. A., Robustelli, B. et al. (2013). Cortical thickness, surface area, and gyrification abnormalities in children exposed to maltreatment: Neural markers of vulnerability? *Biological Psychiatry*, 74(11), 845–852. doi: 10.1016/j.biopsych.2013.06.020

Kok, R., Prinzie, P., Bakermans-Kranenburg, M. J., Verhulst, F. C., White, T., Tiemeier, H. et al. (2017). Socialization of prosocial behavior: Gender differences in the mediating role of child brain volume. *Child Neuropsychology*, In press. doi: 10.1080/09297049.2017.1338340

- Kok, R., Thijssen, S., Bakermans-Kranenburg, M. J., Jaddoe, V. W. V., Verhulst, F. C., White, T. et al. (2015). Normal variation in early parental sensitivity predicts child structural brain development. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 54(10), 824–831. doi: 10.1016/j.jaac.2015.07.009
- Lévesque, M. L., Fahim, C., Ismaylova, E., Verner, M. P., Casey, K. F., Vitaro, F. et al. (2015). The impact of the in utero and early postnatal environments on grey and white matter volume: A study with adolescent monozygotic twins. *Developmental Neuroscience*, 37, 489–496. doi: 10.1159/000430982
- Lim, L., Radua, J., and Rubia, K. (2014). Gray matter abnormalities in childhood maltreatment: A voxel-wise meta-analysis. *American Journal of Psychiatry*, 171(8), 854–863. doi: 10.1176/appi.ajp.2014.13101427
- Luby, J. L., Barch, D. M., Belden, A., Gaffrey, M. S., Tillman, R., Babb, C. et al. (2012). Maternal support in early childhood predicts larger hippocampal volumes at school age. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(8), 2854–2859. doi: 10.1073/pnas.1118003109
- Luby, J. L., Belden, A., Botteron, K., Marrus, N., Harms, M. P., Babb, C. et al. (2013). The effects of poverty on childhood brain development: The mediating effect of caregiving and stressful life events. *JAMA Pediatrics*, 167(12), 1135–1142. doi: 10.1001/jamapediatrics.2013.3139
- Luby, J. L., Belden, A., Harms, M. P., Tillman, R., and Barch, D. M. (2016). Preschool is a sensitive period for the influence of maternal support on the trajectory of hippocampal development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(20), 5742–5747. doi: 10.1073/pnas.1601443113

- Lyons-Ruth, K., and Jacobvitz, D. (2016). Attachment disorganization from infancy to adulthood: Neurobiological correlates, parenting contexts, and pathways to disorder. In J. Cassidy, & P. R. Shaver (Eds.), *Handbook of Attachment: Theory, Research, and Clinical Applications* (pp. 667-695). Guilford Press.
- Lyons-Ruth, K., Pechtel, P., Yoon, S. A., Anderson, C. M., and Teicher, M. H. (2016). Disorganized attachment in infancy predicts greater amygdala volume in adulthood. *Behavioural Brain Research*, 308, 83–93. doi: 10.1016/j.bbr.2016.03.050
- Madigan, S., Atkinson, L., Laurin, K., and Benoit, D. (2013). Attachment and internalizing behavior in early childhood: A meta-analysis. *Developmental Psychology*, 49(4), 672–689. doi: 10.1037/a0028793
- Matsudaira, I., Yokota, S., Hashimoto, T., Takeuchi, H., Asano, K., Asano, M. et al. (2016). Parental praise correlates with posterior insular cortex gray matter volume in children and adolescents. *PLoS one*, 11(4), e0154220. doi:10.1371/journal.pone.0154220
- Meaney, M. J. (2001). Maternal care, gene expression, and the transmission of individual differences in stress reactivity across generations. *Annual Review of Neuroscience*, 24(1), 1161–1192. doi: 10.1146/annurev.neuro.24.1.1161
- Moutsiana, C., Johnstone, T., Murray, L., Fearon, R. P., Cooper, P. J., Pliatsikas, C. et al. (2015). Insecure attachment during infancy predicts greater amygdala volumes in early adulthood. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 56(5), 540–548. doi: 10.1111/jcpp.12317
- O'Connor, T. G., and Croft, C. M. (2001). A twin study of attachment in preschool children. *Child Development*, 72(5), 1501–1511. doi: 10.1111/1467-8624.00362
- Ochsner, K. N., Knierim, K., Ludlow, D. H., Hanelin, J., Ramachandran, T., Glover, G. et al. (2004). Reflecting upon feelings: An fMRI study of neural systems supporting the

attribution of emotion to self and other. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(10), 1746–1772. doi: 10.1162/0898929042947829

Pagliaccio, D., Luby, J. L., Gaffrey, M. S., Belden, A. C., Botteron, K. N., and Harms, M. P. (2013). Functional brain activation to emotional and nonemotional faces in healthy children: Evidence for developmentally undifferentiated amygdala function during the school-age period. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 13(4), 771–789. doi: 10.3758/s13415-013-0167-5

Pallini, S., Baiocco, R., Schneider, B. H., Madigan, S., and Atkinson, L. (2014). Early child–parent attachment and peer relations: A meta-analysis of recent research. *Journal of Family Psychology*, 28(1), 118–123. doi: 10.1037/a0035736

Pederson, D. R., and Moran, G. (1995). A categorical description of infant-mother relationships in the home and its relation to Q-sort measures of infant-mother interaction. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 60(2–3), 111–132. doi: 10.1111/j.1540-5834.1995.tb00207.x

Peña, C. J., Neugut, Y. D., Calarco, C. A., and Champagne, F. A. (2014). Effects of maternal care on the development of midbrain dopamine pathways and reward-directed behavior in female offspring. *European Journal of Neuroscience*, 39(6), 946–956. doi: 10.1111/ejn.12479

Pernet, C. R., Latinus, M., Nichols, T. E., and Rousselet, G. A. (2015). Cluster-based computational methods for mass univariate analyses of event-related brain potentials/fields: A simulation study. *Journal of Neuroscience Methods*, 250, 85–93. doi: 10.1016/j.jneumeth.2014.08.003

Pollak, S., Klorman, R., Thatcher, J., and Cicchetti, D. (2001). P3b reflects maltreated children's reactions to facial displays of emotion. *Psychophysiology*, 38(2), 267–274.

- Powell, J. L., Kemp, G. J., Dunbar, R. I., Roberts, N., Sluming, V., and García-Fiñana, M. (2014). Different association between intentionality competence and prefrontal volume in left-and right-handers. *Cortex*, *54*, 63-76. doi: 10.1016/j.cortex.2014.02.010
- Puetz, V. B., Parker, D., Kohn, N., Dahmen, B., Verma, R., and Konrad, K. (2017). Altered brain network integrity after childhood maltreatment: A structural connectomic DTI-study. *Human Brain Mapping*, *38*(2), 855-868. doi: 10.1002/hbm.23423
- Puce, A., Allison, T., Bentin, S., Gore, J. C., and McCarthy, G. (1998). Temporal cortex activation in humans viewing eye and mouth movements. *Journal of Neuroscience*, *18*(6), 2188–2199.
- Rakic, P. (1988). Specification of cerebral cortex areas. *Science*, *241*(4862), 170–176. doi: 10.1126/science.3291116
- Rao, H., Betancourt, L., Giannetta, J. M., Brodsky, N. L., Korczykowski, M., Avants, B. B. et al. (2010). Early parental care is important for hippocampal maturation: Evidence from brain morphology in humans. *NeuroImage*, *49*(1), 1144-1150. doi: 10.1016/j.neuroimage.2009.07.003
- Riem, M. M., Alink, L. R., Out, D., Van IJzendoorn, M. H., and Bakermans-Kranenburg, M. J. (2015). Beating the brain about abuse: Empirical and meta-analytic studies of the association between maltreatment and hippocampal volume across childhood and adolescence. *Development and Psychopathology*, *27*(2), 507–520. doi: 10.1017/S0954579415000127
- Rifkin-Graboi, A., Kong, L., Sim, L. W., Sanmugam, S., Broekman, B. F., Chen, H. et al. (2015). Maternal sensitivity, infant limbic structure volume and functional connectivity: A preliminary study. *Translational Psychiatry*, *5*(e668). doi: 10.1038/tp.2015.133

- Rilling, J. K., and Young, L. J. (2014). The biology of mammalian parenting and its effect on offspring social development. *Science*, 345(6198), 771-776. doi: 10.1126/science.1252723
- Roisman, G. I., and Fraley, R. C. (2008). A behavior–genetic study of parenting quality, infant attachment security, and their covariation in a nationally representative sample. *Developmental Psychology*, 44(3), 831–839. doi: 10.1037/0012-1649.44.3.831
- Ruby, P., and Decety, J. (2001). Effect of subjective perspective taking during simulation of action: A PET investigation of agency. *Nature Neuroscience*, 4(5), 546–550. doi: 10.1038/87510
- Sameroff, A. (2009). *The Transactional Model of Development: How Children and Contexts Shape each Other*. Washington, DC: American Psychological Association. doi: 10.1037/11877-006
- Saygin, A. P. (2007). Superior temporal and premotor brain areas necessary for biological motion perception. *Brain*, 130(9), 2452–2461. doi: 10.1093/brain/awm162
- Serbin, L. A., Kingdon, D., Ruttle, P. L., and Stack, D. M. (2015). The impact of children's internalizing and externalizing problems on parenting: Transactional processes and reciprocal change over time. *Development and Psychopathology*, 27(4pt1), 969–986. doi: 10.1017/S0954579415000632
- Sethna, V., Pote, I., Wang, S., Gudbrandsen, M., Blasi, A., McCusker, C. et al. (2017). Mother–infant interactions and regional brain volumes in infancy: An MRI study. *Brain Structure and Function*, 222(5), 2379-2388. doi: 10.1007/s00429-016-1347-1
- Shaw, P., Kabani, N. J., Lerch, J. P., Eckstrand, K., Lenroot, R., Gogtay, N. et al. (2008). Neurodevelopmental trajectories of the human cerebral cortex. *The Journal of Neuroscience*, 28(14), 3586-3594. doi: 10.1523/jneurosci.5309-07.2008

- Shdo, S. M., Ranasinghe, K. G., Gola, K. A., Mielke, C. J., Sukhanov, P. V., Miller, B. L. et al. (2017). Deconstructing empathy: Neuroanatomical dissociations between affect sharing and prosocial motivation using a patient lesion model. *Neuropsychologia*. In press. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2017.02.010
- Smith, D. K., Johnson, A. B., Pears, K. C., Fisher, P. A., and DeGarmo, D. S. (2007). Child maltreatment and foster care: Unpacking the effects of prenatal and postnatal parental substance use. *Child Maltreatment*, *12*(2), 150–160. doi: 10.1177/1077559507300129
- Smith, S. M., and Nichols, T. E. (2009). Threshold-free cluster enhancement: Addressing problems of smoothing, threshold dependence and localisation in cluster inference. *NeuroImage*. *44*(1), 83–98. doi: 10.1016/j.neuroimage.2008.03.061
- Spreng, R. N., Mar, R. A., and Kim, A. S. (2009). The common neural basis of autobiographical memory, prospection, navigation, theory of mind, and the default mode: A quantitative meta-analysis. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *21*(3), 489–510. doi: 10.1162/jocn.2008.21029
- Sroufe, L. A. (1979). The coherence of individual development: Early care, attachment, and subsequent developmental issues. *American Psychologist*, *34*(10), 834–841. doi: 10.1037/0003-066X.34.10.834
- Sroufe, L. A. (2016). The place of attachment in development. In J. Cassidy, & P. R. Shaver (Eds.), *Handbook of Attachment: Theory, Research, and Clinical Applications* (pp. 997–1011). Guilford Press.
- Steele, H., Steele, M., and Croft, C. (2008). Early attachment predicts emotion recognition at 6 and 11 years old. *Attachment and Human Development*, *10*(4), 379–393. doi: 10.1080/14616730802461409

- Teicher, M. H., and Samson, J. A. (2016). Annual research review: Enduring neurobiological effects of childhood abuse and neglect. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 57(3), 241–266. doi: 10.1111/jcpp.12507
- Teicher, M. H., Samson, J. A., Anderson, C. M., and Ohashi, K. (2016). The effects of childhood maltreatment on brain structure, function and connectivity. *Nature Reviews Neuroscience*, 17(10), 652–666. doi: 10.1038/nrn.2016.111
- Thompson, R. A. (2016). Early attachment and later development: Reframing the question. In J. Cassidy, & P. R. Shaver (Eds.), *Handbook of Attachment: Theory, Research, and Clinical Applications* (pp. 330-348). Guilford Press.
- Toro, R., Perron, M., Pike, B., Richer, L., Veillette, S., Pausova, Z. et al. (2008). Brain size and folding of the human cerebral cortex. *Cerebral Cortex*, 18(10), 2352–2357. doi:10.1093/cercor/bhm261
- Tottenham, N. (2012). Human amygdala development in the absence of species-expected caregiving. *Developmental Psychobiology*, 54(6), 598–611. doi: 10.1002/dev.20531
- Tottenham, N. (2014). The importance of early experiences for neuro-affective development. *Current Topics in Behavioral Neuroscience*, 16, 109–129. doi: 10.1007/7854_2013_254
- Tottenham, N., and Sheridan, M. A. (2009). A review of adversity, the amygdala and the hippocampus: A consideration of developmental timing. *The Developing Human Brain*, 3(68), 1–18. doi: 10.3389/neuro.09.068.2009
- Urrila, A. S., Artiges, E., Massicotte, J., Miranda, R., Vulser, H., Bézivin-Frere, P. et al. (2017). Sleep habits, academic performance, and the adolescent brain structure. *Scientific Reports*, 7(41678). doi: 10.1038/srep41678

- Van IJzendoorn, M. H., Dijkstra, J., and Bus, A. G. (1995). Attachment, intelligence, and language: A meta-analysis. *Social Development*, 4(2), 115–128. doi: 10.1111/j.1467-9507.1995.tb00055.x
- Van IJzendoorn, M. H., Vereijken, C. M. J. L., Bakermans-Kranenburg, M. J., and Riksen-Walraven, J. M. (2004). Assessing attachment security with the Attachment Q-sort: Meta-analytic evidence for the validity of the observer AQS. *Child Development*, 75(4), 1188–1213. doi: 10.1111/j.1467-8624.2004.00733.x
- Van Praag, H., Kempermann, G., and Gage, F. H. (2000). Neural consequences of environmental enrichment. *Nature Reviews Neuroscience*, 1(3), 191–198. doi: 10.1038/35044558
- Wallace, G. L., White, S. F., Robustelli, B., Sinclair, S., Hwang, S., Martin, A. et al. (2014). Cortical and subcortical abnormalities in youths with conduct disorder and elevated callous-unemotional traits. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 53(4), 456–465. doi: 10.1016/j.jaac.2013.12.008
- Waters, E., and Deane, K. E. (1985). Defining and assessing individual differences in attachment behavior: Q-methodology and the organization of behavior in infancy and early childhood. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 50(1–2), 41–65.
- Whittle, S., Dennison, M., Vijayakumar, N., Simmons, J. G., Yücel, M., Lubman, D. I. et al. (2013). Childhood maltreatment and psychopathology affect brain development during adolescence. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 52(9), 940–952. doi: 10.1016/j.jaac.2013.06.007
- Whittle, S., Simmons, J. G., Dennison, M., Vijayakumar, N., Schwartz, O., Yap, M. B. et al. (2014). Positive parenting predicts the development of adolescent brain structure: A

longitudinal study. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 8, 7–17. doi:
10.1016/j.dcn.2013.10.006

Whittle, S., Vijayakumar, N., Dennison, M., Schwartz, O., Simmons, J. G., Sheeber, L. et al. (2016). Observed measures of negative parenting predict brain development during adolescence. *PloS one*, 11(1), e0147774. doi: 10.1371/journal.pone.0147774

Winkler, A. M., Kochunov, P., Blangero, J., Almasy, L., Zilles, K., Fox, P. T. et al. (2010). Cortical thickness or grey matter volume? The importance of selecting the phenotype for imaging genetics studies. *NeuroImage*, 53(3), 1135–1146. doi:
10.1016/j.neuroimage.2009.12.028.

Yoon, U., Fonov, V. S., Perusse, D., and Evans, A. C. (2009). The effect of template choice on morphometric analysis of pediatric brain data. *NeuroImage*, 45(3), 769–777. doi:
10.1016/j.neuroimage.2008.12.046

Yu, P., An, S., Tai, F., Wang, J., Wu, R., and Wang, B. (2013). Early social deprivation impairs pair bonding and alters serum corticosterone and the NAcc dopamine system in mandarin voles. *Psychoneuroendocrinology*, 38(12), 3128–3138. doi:
10.1016/j.psyneuen.2013.09.012

Table 1.

Sociodemographic Information and Attachment Security Scores for Families who Accepted versus Declined Participation in the Magnetic Resonance Imaging (MRI) Protocol.

	Accepted MRI <i>n</i> = 35	Declined MRI <i>n</i> = 29	Group comparisons
Parental age at recruitment			
Mothers	31.63 ± 5.05	32.02 ± 3.50	$t(62) = -0.36; p = .73$
Fathers	33.40 ± 5.29	34.07 ± 4.86	$t(62) = -0.52; p = .60$
Parental years of education			
Mothers	15.40 ± 2.23	15.26 ± 2.32	$t(62) = 0.24; p = .81$
Fathers	15.60 ± 1.94	14.97 ± 2.10	$t(62) = 1.30; p = .21$
Ethnicity			
Mothers	80.00	86.21	$\chi^2(1) = 0.43; p = .51$
Fathers	74.30	75.90	$\chi^2(1) = 0.02; p = .89$
Family income	74.29	79.31	$\chi^2(1) = 0.22; p = .64$
Language at home	80.00	82.76	$\chi^2(1) = 0.08; p = .78$
Attachment security	.48 ± .26	.50 ± .20	$t(62) = -0.42; p = .67$

Note. For ethnicity, family income, and language, values represent percentages of families with a Caucasian mother/father, an income above \$60,000, and French as the main language. For parental age, parental education, and attachment security, values represent mean ± standard deviation. Two children who underwent MRI were excluded from main statistical analyses ($n = 33$): excluding them from the group comparisons did not change the results.

Table 2.*Correlations between Attachment Security, Average Brain Volumetric Data, and Covariates.*

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
1. Attachment security	1								
2. Total ICV	-.09	1							
3. Total GMV	.05	.94**	1						
4. Total WMV	-.30	.92**	.80**	1					
5. Total CSF	.04	.66**	.46**	.48**	1				
6. Child sex ^a	.04	-.53**	-.53**	-.51**	-.25	1			
7. Child age	-.26	.03	.00	.15	-.12	-.23	1		
8. Maternal education	.21	-.31	-.27	-.25	-.31	.21	-.10	1	
9. Pubertal status ^b	.13	-.38*	-.39*	-.33 ^t	-.21	-.16	.69***	.11	1

Note. ^aChild sex was coded 1 = boy; 2 = girl. ^bPubertal status was coded 1 = prepubertal; 2 = early pubertal; 3 = mid pubertal; 4 = late pubertal. ICV = intracranial volume; GMV = gray matter volume; WMV = white matter volume; CSF = cerebrospinal fluid. ^t $p < .10$. * $p < .05$. ** $p < .01$. *** $p < .001$.

Table 3.

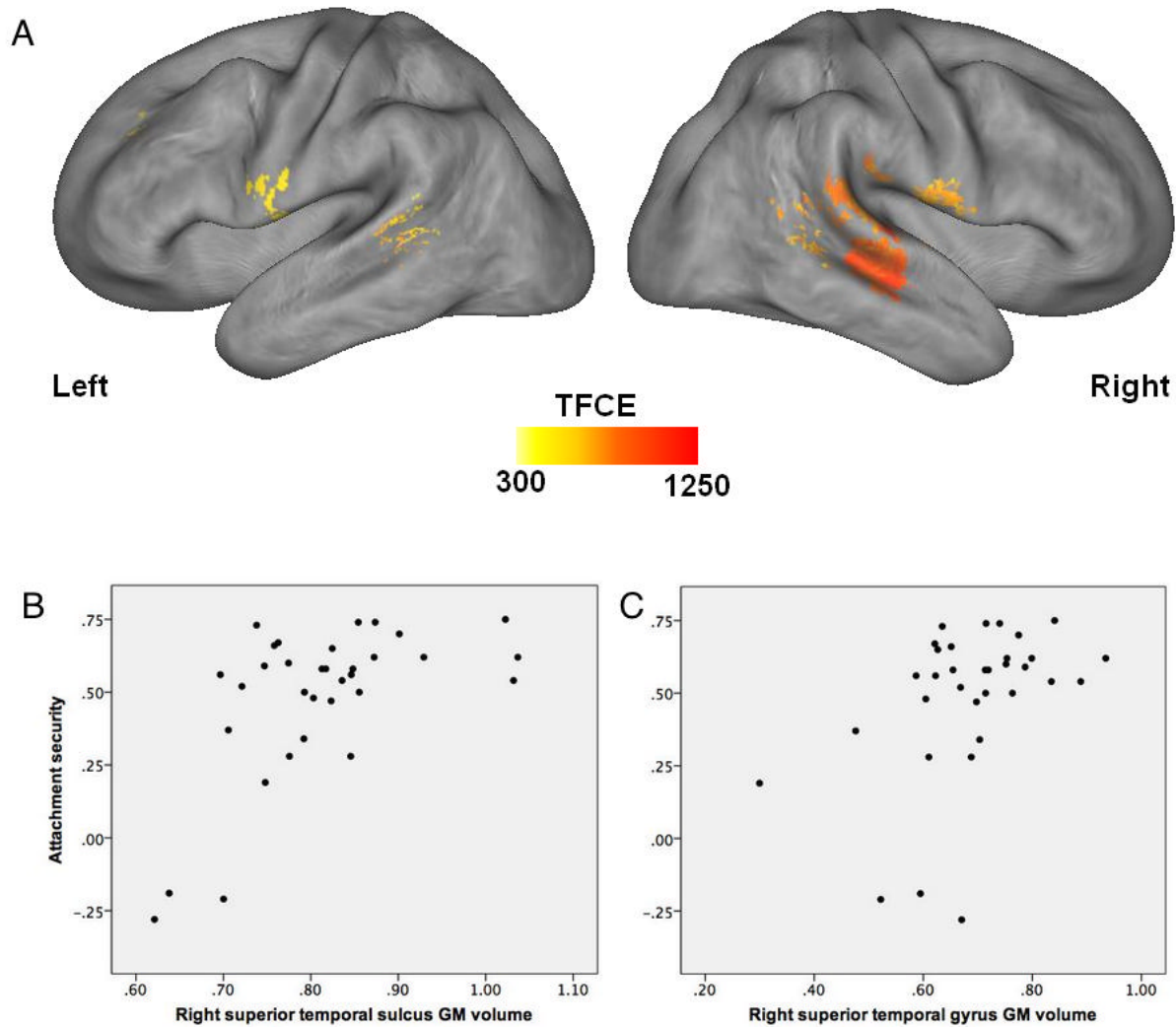
Regional Volumes Significantly Associated with Attachment Security in Infancy ($p < .05$, False Discovery Rate correction).

Regions	BA	k	MNI	$TFCE$
			coordinates (x, y, z)	
Right				
Superior temporal sulcus ^a	48/21	601	45, -21, -4	1122.72*
			57, -24, -3	1120.15*
Superior temporal gyrus	48	150	68, -33, 20	816.95
Temporo-parietal junction	21	34	60, -39, 2	744.62
			60, -48, 9	735.12
Precentral gyrus	48	43	63, -3, 9	649.53
Left				
Superior temporal sulcus	22	22	-58, -40, 8	660.78
Precentral gyrus	48	51	-52, -3, 15	450.97

Note. *Results hold at $p < .05$, Family Wise Error correction. ^aCluster peak was in the superior temporal sulcus, but the cluster also covered the superior and middle temporal gyrus. BA = Brodmann area; k = number of voxels; $TFCE$ = threshold free cluster enhancement statistic.

Figure 1.

Association between Attachment Security in Infancy and GM Volume in Late Childhood.



(A) Higher attachment security in infancy is associated with greater GM volume in the right superior temporal sulcus and gyrus, temporo-parietal junction, and precentral gyrus, as well as in the left superior temporal sulcus and precentral gyrus (FDR corrected, $p < .05$), after accounting for child age, sex, pubertal status, maternal education, and total intracranial volume. **(B)** Correlation between attachment security in infancy and GM volume in the right superior temporal sulcus in late childhood [$x = 45$; $y = -21$; $z = -4$]. **(C)** Correlation between attachment

security in infancy and GM volume in the right superior temporal sulcus in late childhood [x = 68; y = -33; z = 20]. GM = gray matter.

Chapitre 3 – Deuxième article

Disorganized Attachment Behaviors in Infancy as Predictors of Brain Morphology and Peer Rejection in Late Childhood

Leblanc, É., Dégeilh, F., Beauchamp, M. H., & Bernier, A. (2022). Disorganized attachment behaviors in infancy as predictors of brain morphology and peer rejection in late childhood. *Cognitive, Affective, and Behavioral Neuroscience*. <https://doi.org/10.3758/s13415-022-00987-0>

**Disorganized Attachment Behaviors in Infancy as Predictors of Brain Morphology and
Peer Rejection in Late Childhood**

Élizabeth Leblanc¹, Fanny Dégeilh^{1,2}, Miriam H. Beauchamp^{1,2}, & Annie Bernier¹

¹ Department of Psychology, University of Montreal, Quebec, Canada

² Sainte-Justine Research Center, Montreal, Quebec, Canada

Author Notes

Élizabeth Leblanc <https://orcid.org/0000-0002-1258-2162>

Fanny Dégeilh <https://orcid.org/0000-0002-5802-4975>

Miriam H. Beauchamp <https://orcid.org/0000-0002-8637-6361>

Annie Bernier <https://orcid.org/0000-0002-2359-9808>

Fanny Dégeilh is now at University of Rennes, CNRS, Inria, Inserm, IRISA UMR 6074,
Empenn Team ERL U 1228, Rennes, France

Correspondence concerning this article should be addressed to: Annie Bernier,
Department of Psychology, University of Montreal, P.O. Box 6128, Downtown Station,
Montreal, QC H3C 3J7, Canada. annie.bernier@umontreal.ca

Abstract

Studies show robust links between disorganized attachment in infancy and socio-emotional maladjustment in childhood. Little is known, however, about the links between disorganized attachment and brain development, and whether attachment-related differences in brain morphology translate into meaningful variations in child socio-emotional functioning. This study aimed to examine the links between infants' disorganized attachment behaviors toward their mothers, whole-brain regional grey matter volume and thickness, and peer rejection in late childhood. Thirty-three children and their mothers took part in this study. The Strange Situation Procedure was used to assess mother-infant attachment when infants were 18 months old. Magnetic resonance imaging was performed when they were 10 years old to assess cortical thickness and grey matter volumes. Children and teachers reported on peer rejection one year later, as an indicator of socio-emotional maladjustment. Results indicated that disorganized attachment was not associated with grey matter volumes. However, children who exhibited more disorganized attachment behaviors in infancy had significantly thicker cortices in bilateral middle and superior frontal gyri, and extending to the orbitofrontal and insular cortices in the right hemisphere in late childhood. Moreover, children with thicker cortices in these regions experienced greater peer rejection, as rated by themselves and their teachers. Although preliminary, these results are the first to indicate that disorganized attachment may play a role in cortical thickness development, and that changes in cortical thickness are associated with differences in child socio-emotional functioning.

Keywords: attachment, peer relationships, brain morphology, caregiving, cortical thickness, social brain

Disorganized Attachment Behaviors in Infancy as Predictors of Brain Morphology and Peer Rejection in Late Childhood

The quality of early caregiving environments has a meaningful impact on child cognitive, social, and emotional functioning, and these associations are thought to be mediated by underlying neural substrates (Belsky & de Haan, 2011; Gunnar et al., 2006; Thompson, 2016; Tottenham, 2014). Indeed, there is increasing evidence for associations between normative variation in the quality of early caregiving relationships and children's brain morphology and its development. Much of this work has characterized caregiving relationship quality by rating parental behaviors, such as sensitivity, support, and positive affect, on the basis of parent-child interactions (Kok et al., 2015, 2017; Lee et al., 2019; Luby et al., 2012, 2016; Rifkin-Graboi et al., 2015; Sethna et al., 2017; Whittle et al., 2014, 2016). However, much less is known about the links between child brain morphology and what is perhaps the most recognized indicator of the quality of early caregiving relationships, namely parent-child attachment. Furthermore, the functional implications of caregiving-induced changes in brain morphology for child socio-emotional adjustment are largely unknown. The current 10-year longitudinal study extends the emerging literature by examining the links between disorganized attachment in infancy, whole-brain grey matter volume and cortical thickness in late childhood, and subsequent peer rejection.

Disorganized Parent-Child Attachment Relationships

Infants rely on their caregivers when comfort is needed, such as in conditions of illness, fatigue, or threat. Attachment quality is reflected by the emerging organization of infant attachment behaviors (i.e., proximity-seeking, signaling) toward their primary caregiver(s) (Cassidy, 2016). For some infants, suboptimal parent-infant interactions give rise to a particularly adverse form of attachment, namely disorganized attachment (Bernier & Meins, 2008), which consists of incoherent and disorganized attachment strategies such as odd, inexplicable,

contradictory, overtly conflicted, disoriented, and/or fearful infant behaviors during a stressful situation (e.g., separation from the caregiver; Main & Solomon, 1990; Solomon & George, 1999). For instance, the infant may freeze when the parent enters the room with a trancelike expression and hands raised in the air, or rise and then fall prone on the floor. These behaviors are thought to reflect a lack of appropriate coping strategies for seeking comfort in stressful contexts (Lyons-Ruth & Jacobvitz, 2016) and may be observed during the Strange Situation Procedure (SSP; Ainsworth et al., 1978), a classic lab-based method for measuring parent-child relationship quality. Infant disorganized attachment behaviors observed during the SSP are associated with suboptimal parental behaviors outside the lab (e.g., atypical caregiving behaviors; Lyons-Ruth & Jacobvitz, 2016) and do not merely reflect temperamental dispositions (Groh et al., 2017); the same infant may display different attachment patterns with different caregivers (Howes & Spieker, 2016). Infant behaviors toward the caregiver during the SSP are considered to be a key indicator of the overall quality of the parent-child attachment relationship (Ainsworth et al., 1978; Cassidy, 2016) and may thus be particularly relevant in the study of caregiving-driven influences on the developing brain.

Disorganization is a particularly maladaptive form of attachment. Several meta-analyses indicate that children who evolve in disorganized attachment relationships as assessed in the SSP are at especially high risk for developing poor social competence with peers (Groh et al., 2014), poor emotion regulation skills (Pallini et al., 2018), attention problems (Pallini et al., 2019), as well as externalizing and internalizing behavior problems (Fearon et al., 2010; Groh et al., 2012). Given that disorganized attachment shows robust associations with socio-emotional maladjustment, it is important to examine its associations with brain morphology and explore whether individual morphometric differences could, in turn, be related to children's socio-emotional outcomes.

Caregiving Relationships, Child Brain Morphology, and Socio-Emotional Adjustment

During early childhood, the brain undergoes rapid development (Ducharme et al., 2016; Gilmore et al., 2018), conferring increased plasticity whereby environmental stimuli, notably the caregiving experiences embedded in parent-child relationships, are thought to substantially influence the development of brain regions involved in socio-emotional functioning such as the orbitofrontal cortex, the temporo-parietal junction, the superior temporal sulcus, the anterior cingulate cortex, the insula, and the amygdala (Blakemore, 2008; Buhle et al., 2014; Kohn et al., 2014; Tottenham, 2014). To investigate this issue, studies have mostly operationalized the quality of caregiving relationships using assessments of specific parental behaviors. Their results indicate that normative variations in sensitive, supportive, positive, and negative parental behaviors are related to regional brain morphology differences or development in children (Kok et al., 2015; Lee et al., 2019; Luby et al., 2012, 2016; Rifkin-Graboi et al., 2015; Whittle et al., 2014, 2016). This body of literature provides indirect support for the presumed link between the overall quality of parent-child relationships and child brain development. However, research combining gold-standard observational attachment measures, such as the SSP, and neuroimaging data in children are rare. The limited published findings indicate that adults who were insecurely attached (avoidant, resistant, or disorganized attachment) to their mother during infancy have larger amygdalar volumes compared to those who were securely attached (Moutsiana et al., 2015). Similarly, Lyons-Ruth et al. (2016) reported that *disorganized* attachment in infancy predicts larger left amygdalar grey matter volume in a high-risk sample of adults. Closer to the aim of the current study, Cortes Hidalgo et al.'s (2019) population-based study ($n = 551$) considered brain morphology among children and reported that disorganized attachment in infancy predicts larger hippocampal volumes in late childhood. A previous report on the current cohort assessed the association between levels of parent-infant attachment security/insecurity and children's whole-

brain grey matter volume and cortical thickness. Higher levels of attachment security in infancy were related to larger grey matter volume in the superior temporal sulcus and gyrus, temporo-parietal junction, and precentral gyrus in late childhood (Leblanc et al., 2017). In sum, only two studies have examined the longitudinal association between attachment *disorganization* specifically and subsequent brain morphology (sample sizes of $n = 551$ and $n = 18$, respectively, Cortes Hidalgo et al., 2019; Lyons-Ruth et al., 2016), and both found significant group differences in subcortical grey matter volumes between individuals who evolved in organized and disorganized attachment relationships as infants.

Groh et al. (2014) reported meta-analytic data highlighting the enduring predictive significance of early attachment for social competence and suggested that a useful avenue for future research is the exploration of the processes that could account for this robust and enduring association. Researchers have theorized that the documented associations between early attachment and subsequent socio-emotional adjustment may transit through neural substrates (Belsky & de Haan, 2011; Gunnar et al., 2006; Thompson, 2016; Tottenham, 2014). Yet, only four studies to our knowledge have investigated whether caregiving-related morphometric differences have functional implications. Whittle et al. (2016) found that the development of cortical thickness in the superior frontal region from early to late adolescence relates to positive maternal behaviors and is also associated with global functioning – although this association was only found in adolescent boys. In a high-risk sample, Khoury et al. (2019) observed that left hippocampal volume in adulthood partially mediates the association between early maternal withdrawal and later suicidality. In the same sample, Lyons-Ruth et al. (2016) found that left amygdala volume in adulthood mediates the association between attachment disturbance in infancy (a composite of attachment disorganization and maternal disrupted communication) and limbic irritability (the frequency of symptoms of ictal-temporal lobe epilepsy, such as

dissociative experiences and brief hallucinatory events). Finally, Kok et al. (2017) reported that total brain volume mediates the association between parental sensitivity in early childhood and prosocial behaviors during childhood (however only in girls). Thus, only two studies considered children (or adolescents) and neither examined attachment. Nonetheless, these previous findings, taken together, suggest that caregiving-related volumetric brain differences may bear on functional outcomes. Given the robust associations between attachment relationships and later socio-emotional functioning (Thompson, 2016), one may then expect morphometric differences associated with disorganized attachment to translate into variations in children's socio-emotional functioning.

Current study

The current study focused on the associations between attachment disorganization in infancy, regional grey matter volume and cortical thickness in late childhood, and subsequent peer rejection, a documented outcome of disorganized attachment (Groh et al., 2014). Taking into account Cortes Hidalgo et al.'s (2019) large-scale study, we aimed to further contribute to this growing literature in several ways. First, given our small sample size, we used a conservative whole-brain approach to both volume and thickness and examined specific regional differences in putative relations to disorganized attachment behavior. Second, we investigated whether individual differences in brain morphology linked to attachment disorganization have real-life implications, namely if they translate into meaningful differences in children's social interactions with peers (i.e., peer rejection). Third, we used a dimensional approach to operationalize individual differences in attachment disorganization. The question of whether individual differences are categorically or dimensionally distributed is a long-lasting debate in psychological research (Haslam, 2019; Liu, 2016), notably with regard to the attachment construct (Cummings, 2003; Fraley et al., 2015; Fraley & Spieker, 2003a, 2003b; Waters et al., 2019). Taxometric

analyses suggest that individual differences in infant attachment are more consistent with a dimensional rather than a categorical approach (Fraley & Spieker, 2003a). The authors argue that the use of dimensional attachment scores captures fine inter-individual differences, increases statistical power, and reduces errors associated with categorical decision-making. Indeed, categorical assessment implies mutual exclusivity, but a child's true attachment pattern often involves varying degrees of security, avoidance, and disorganization (Deneault et al., 2020). Categorical assessment also blurs individual differences *within* classifications, even though there is considerable variation between children classified within any given attachment category (Deneault et al., 2020; see also Padròn et al., 2014 for a study on infant disorganized attachment subtypes). In fact, it has been observed that a dimensional approach to attachment assessment results in better prediction of child outcomes than categorical assessment (Pallini et al., 2018). Overall, a dimensional approach to attachment assessment offers both conceptual and methodological advantages.

The use of such a dimensional approach together with a whole-brain analytic approach with statistical correction for multiple comparisons allowed for the careful and conservative examination of putative links between fine individual differences in attachment disorganization and specific regional differences in brain morphology in children. As attachment disorganization reflects the infant's inability to elicit caregiver support in times of stress with an organized set of attachment strategies, it was expected that disorganized attachment would be related to morphometric differences in brain regions involved in socio-emotional functioning, such as the orbitofrontal cortex, the temporo-parietal junction, the superior temporal sulcus, the anterior cingulate cortex, and the amygdala (Blakemore, 2008; Buhle et al., 2014; Kohn et al., 2014). In turn, it was expected that morphometric differences would be related to variations in peer rejection.

In order to minimize overlap with the previous report on the same cohort (Leblanc et al., 2017), attachment *security* was included as a covariate, which allowed for conservative predictions specific to *disorganized* attachment. Indeed, although disorganized attachment is a particularly maladaptive form of attachment, it occurs in the context of an otherwise secure, avoidant or ambivalent attachment pattern and represents a temporary breakdown in the secure or insecure behavioral strategy displayed by the infant (Hesse & Main, 2000; Main & Hesse, 1990). Supporting this distinction, attachment security and disorganization are differentially predictive of child outcomes (Smeekens et al., 2009). Consequently, we hypothesized that disorganized attachment would be associated with regional grey matter volume and cortical thickness over and above any effects of attachment security.

Method

Participants

Participants included in this study ($n = 33$) were followed annually as part of a larger longitudinal research project that documents the prospective associations between the early caregiving environment and child development (Bernier, Beauchamp, & Cimon-Paquet, 2020). The study was approved by the aging-neuroimaging research ethics committee of the CIUSSS du Centre-Sud-de-l'île-de-Montréal, and all families provided written informed consent for participation. Families were initially recruited from birth lists randomly generated by the Ministry of Health and Social Services. Inclusion criteria were full-term pregnancy (i.e., at least 36 weeks of gestation) and the absence of any known disability or severe delay in the infant. Attachment security and disorganization were assessed at two different timepoints (at 15 and 18 months, respectively) and using two different age-appropriate measures (described below) to ensure independence of scores. When children were 10 years of age ($M = 10.59$ years, $SD = 0.46$), they were invited to undergo magnetic resonance imaging (MRI). Inclusion criteria for the

MRI study were the absence of neurological or psychiatric disorders and of standard MRI contraindications. Sixty-four families were approached for the MRI study, and 39 (60.94%) agreed to participate. However, four (6.25%) children were not eligible due to standard MRI exclusion criteria (e.g., braces); thus, 35 children participated in the MRI study (54.69%). These 35 families did not differ from those who declined ($n = 25$) or were not eligible ($n = 4$) on socio-demographic variables, attachment behaviors, and peer rejection (see Table 1, all $ps \geq .21$). Two children were scanned but subsequently excluded from the analyses: one because of excessive head motion (translation > 2.5 mm or rotation > 2.5 degrees) and one because of suspected neuropathology. Consequently, data from 33 children (13 boys) were used in the analyses. Of the 33 children who underwent MRI acquisition, 28 had participated with their mother in a laboratory-based visit to assess attachment in infancy. Thirty-two children and 26 of their teachers also completed a report assessing peer rejection one year post-MRI ($M = 12.76$ months after MRI scan, $SD = 2.73$). Children had a mean age of 11.60 years at that time ($SD = 0.57$). Late childhood and early adolescence are characterized by significant brain reorganization and an increased importance of peer relationships (Blakemore, 2008), making it a relevant period to examine the links between brain morphology and peer rejection.

Measures

Disorganized Attachment Behaviors

The Strange Situation Procedure (SSP; Ainsworth et al., 1978) was used to assess disorganized attachment behaviors when infants were aged 18 months ($M = 18.1$; $SD = 0.8$). This standardized laboratory procedure consists of eight brief episodes designed to elicit infant attachment behavioral patterns through a series of mildly stressful infant-mother separations and reunions. Infant behavior during episodes of contact with a female stranger and separation/reunion with the caregiver is videotaped and then scored using standard rating scales.

The vast majority of research with the SSP has used a categorical approach (e.g., disorganized vs. organized attachment, insecure vs. secure attachment), including investigations of associations with brain morphology (Cortes Hidalgo et al., 2019; Lyons-Ruth et al., 2016; Moutsiana et al., 2015). However, disorganized attachment can readily be assessed dimensionally, as it is first scored on a 1-9 severity scale based on child behavior during the SSP; it is only in a second step that the 1-9 score is transformed into a dichotomous organized versus disorganized classification. The original 1-9 dimensional score of disorganized attachment has been used in previous studies. Results indicate that levels of infant disorganized behaviors are associated in theoretically-consistent ways with early parenting, subsequent relationship quality with mothers and peers, development of psychopathology, parents' caregiving representations, as well as child socio-emotional resilience and cortisol levels in response to the SSP (Bernard & Dozier, 2010; Carlson, 1998; Huber et al., 2015a, 2015b). Levels of infant disorganized behaviors have also been found to moderate the effect of child oppositional behavior on later antisocial problems (Kochanska et al., 2009). The level of child disorganized attachment behaviors in the SSP thus appears to be a valid index of the quality of parent-child attachment relationships and was used in this study.

Disorganized attachment was rated based on infant behavior patterns across all episodes using the 9-point scale developed by Main and Solomon (1990). Disorganized attachment behaviors include: sequential display of contradictory behavior patterns, simultaneous display of contradictory behavior patterns; undirected, misdirected, incomplete, and interrupted movements and expressions; stereotypies, asymmetrical movements, mistimed movements, and anomalous postures; freezing, stilling, and slowed movements and expressions; direct indices of apprehension regarding the parent; direct indices of disorganization or disorientation (Main & Solomon, 1990). In line with previous studies of community samples (e.g., Kochanska et al.,

2009), mean levels of disorganization were fairly low in the current sample, $M = 2.21$; $SD = 1.49$, and only two children were classified as disorganized (which requires a score > 5). To examine inter-rater reliability, 33% of the SSP were coded by two independent research assistants. Agreement between the two raters' disorganization scores was satisfactory, intra-class correlation (ICC) = .80.

Attachment Security

Mother-infant attachment security was assessed using the Attachment Behavior Q-Sort (AQS; Waters & Deane, 1985) when children were 15 months of age ($M = 15.65$, $SD = 0.97$). The AQS consists of 90 items measuring the quality of the child's attachment behaviors toward a specific figure (the mother in this case). Each item of the AQS describes a potential child behavior. Based on observations performed during a 1.5-hour home visit, research assistants sorted those items into nine clusters of 10 items each, ranging from "very similar" to "very unlike" the observed child's behaviors. The global score for attachment security consists of the correlation between the observer's sort of the 90 items and a criterion sort for the prototypically secure infant (Waters & Deane, 1985). Attachment security scores can thus range from -1.0 (highly insecure) to 1.0 (highly secure). Prototypical security represents a fluid balance between exploration of the environment and appropriate reliance on the caregiver for support when needed. To examine inter-rater reliability, 23% of the home visits were conducted by two research assistants, who then completed the AQS independently. Agreement between the two raters' sorts was satisfactory, $ICC = .71$. Attachment security scores were used as a covariate in the analyses, in order to minimize overlap with the first report from the same cohort (Leblanc et al., 2017). Levels of attachment security and disorganization were negatively but not significantly correlated ($r = -.27$, $p = .13$).

Structural Magnetic Resonance Imaging

Acquisition. Neuroimaging data were collected using a 32-channel head coil on a Siemens 3 Tesla scanner (MAGNETOM Trio, Siemens, Erlangen, Germany). Structural data were acquired using a three-dimensional T1-weighted 4-echo magnetization-prepared rapid gradient-echo sequence (3D-T1-4echo-MPRAGE sagittal; repetition time (TR): 2530 ms; first echo time (TE): 1.64 ms; echo spacing Δ TE: 1.86 ms; flip angle: 7° ; 176 slices; slice thickness: 1 mm; no gap; matrix: 256×256 ; field of view (FoV): 256 mm; in-plane resolution: 1×1 mm; duration: 363 sec).

Pre-processing. Pre-processing for the voxel-based morphometry (VBM) and the surface-based morphometry (SBM) analyses were performed using the SPM12 package (Statistical Parametric Mapping, version 1279, Institute of Neurology, London, UK) and the CAT12 Toolbox (version r1278) running on MATLAB version R2018a (MathWorks Inc., Natick, MA, USA). For VBM, T1-weighted images were segmented into grey matter, white matter, and cerebrospinal fluid using age-appropriate stereotaxic tissue probability maps (NIHPD 7.5-13.5 asymmetric; Fonov et al., 2011). Pediatric templates were used to minimize the potential confounds introduced by developmental differences in cortical morphometry (Yoon et al., 2009). Then, the segments were spatially normalized to the Montreal Neurological Institute (MNI) space with a voxel size of $1.5 \times 1.5 \times 1.5$ mm. Finally, the resulting grey matter maps were modulated and smoothed with 8-mm full-width-at-half-maximum (FWHM) smoothing kernels. For SBM, T1-weighted images were segmented and spatially normalized as for VBM. The cortical surface was reconstructed from volumetric data using the projection-based thickness method. The cortical thickness maps were resampled onto the cortical surface and smoothed with a standard 15-mm FWHM smoothing kernel.

Pubertal Status

A parent-report version of the rating scale for pubertal development (Carskadon & Acebo, 1993) was completed at the time of the MRI. Parents evaluated their child's pubertal development using a scale ranging from 1 = "not yet started" to 4 = "seems completed". Children's pubertal status was derived from three items for both boys (body hair growth, voice change, facial hair growth) and girls (body hair growth, breast development, menarche), as described by Carskadon and Acebo (1993), and used as a covariate in the analyses.

Peer Rejection

The Peer Affiliation and Social Acceptance scale (Dishion et al., 2014) was used to assess peer rejection approximately one year post-MRI. Peer rejection was measured with questions that asked about the percentage of peers who disliked or rejected the target child, on a scale ranging from 1 (*very few – less than 25%*) to 5 (*almost all – more than 75%*). Teacher- and child self-reports were obtained. Children reported on peer rejection at school and outside of school. These two peer rejection scores were highly correlated ($r = .85, p < .001$) and therefore averaged. Teachers only reported on peer rejection at school. Child- and teacher-reported peer rejection were not significantly correlated ($ps > .20$) and thus analyzed separately.

Statistical Analyses

Associations between Disorganized Attachment and Brain Morphology

A multiple regression analysis was performed using CAT12 to predict grey matter volumes in late childhood from disorganized attachment behaviors in infancy, after accounting for potential confounders. Similar analyses were performed to predict cortical thickness. Potential confounders were selected a-priori and included child age, sex, pubertal status, maternal education, and attachment security. Total intracranial volume was also controlled for in voxel-based morphometry analyses.

The threshold-free cluster enhancement (TFCE) method implemented in CAT12 was used to identify statistically significant clusters. TFCE is a cluster-based thresholding method that overcomes the problem of choosing an arbitrary cluster-forming threshold, while keeping the sensitivity advantage of cluster-based thresholding (Smith & Nichols, 2009). TFCE uses a permutation approach that maximizes statistical power in small sample studies (Pernet et al., 2015). Using 5,000 permutations and non-parametric testing, a voxel-wise p -value map is produced. An explicit grey matter mask based on the mean normalized grey matter images of all participants was used to ensure that the analyses were restricted to grey matter. Resulting statistical maps were thresholded at $p < .05$ corrected for multiple comparisons by family wise error.

Associations Between Brain Morphology and Peer Rejection

Hierarchical regressions were used to predict peer rejection from brain morphology values, controlling for relevant confounders (child age, sex, pubertal status, maternal education). To do so, grey matter volume or cortical thickness values in significant clusters associated with disorganized attachment behaviors (previous analyses) were extracted and entered in SPSS software version 24.0 (IBM Corp., Armonk, NY, United States).

Disorganized attachment data was missing for five children, self-reported peer rejection for one child, and teacher-reported peer rejection for seven children. In line with recommendations for best practices for handling missing data, multiple imputation was employed to estimate missing values (Enders, 2010) using the Markov Chain Monte Carlo procedure (Geyer, 1992) in SPSS software. Ten imputations were used and then averaged to maximize the precision of imputed data (Graham, 2009; Enders, 2010). To reach maximal accuracy, the imputations were performed based on the original 64 families using child sex and age as well as parental age and education as predictors in the imputation equation.

Results

Associations between Attachment Disorganization and Brain Morphology

Grey Matter Volume

Multiple regression analysis indicated that levels of disorganized attachment behaviors in infancy were not significantly related to grey matter volumes in late childhood over and above child age, sex, pubertal status, maternal education, and attachment security.

Cortical Thickness

Higher levels of disorganized attachment behaviors in infancy were associated with thicker cortices in late childhood in bilateral middle and superior frontal gyri, and extending to the orbitofrontal and insular cortices in the right hemisphere, when controlling for child age, sex, pubertal status, maternal education, and attachment security (Figure 1; Table 2). Similar analyses not including attachment security as a covariate yielded comparable patterns of results (Figure 2; Table 3), albeit with smaller clusters lateralized in the left hemisphere.

Associations between Brain Morphology and Peer Rejection

Children with thicker cortices in the significant clusters reported above were more rejected by their peers one year later, controlling for child age, sex, pubertal status, and maternal education. Self-reported peer rejection was significantly predicted by cortical thickness in both the left hemisphere cluster ($\beta = .538, p = .003, \Delta R^2 = .246$) and the right hemisphere cluster ($\beta = .374, p = .049, \Delta R^2 = .119$). Likewise, peer rejection reported by children's teachers was significantly predicted by cortical thickness in both the right ($\beta = .519, p = .004, \Delta R^2 = .218$) and left hemisphere clusters ($\beta = .394, p = .036, \Delta R^2 = .131$). See Table 4 and Figure 3 for correlation coefficients and scatterplots depicting the relations between disorganized attachment, peer rejection, and regional cortical thickness variables.

Discussion

This study aimed to examine the associations between disorganized attachment, whole-brain grey matter volume and cortical thickness, and peer rejection. The results indicated that infants who displayed more disorganized attachment behaviors toward their mother in infancy had thicker cortices in frontal brain regions in late childhood, controlling for relevant covariates (attachment security, child age, sex, pubertal status, maternal education). Moreover, children with thicker cortices in these regions experienced greater peer rejection one year later. Disorganized attachment was not related to grey matter volume. Analyses not including attachment security as a covariate yielded comparable patterns of results, albeit with smaller clusters.

More disorganized attachment behaviors predicted thicker cortices in bilateral frontal regions, including the orbitofrontal cortex, as hypothesized. The orbitofrontal cortex is involved in emotion regulation (Blakemore, 2008; Buhle et al., 2014); thus, morphometric differences in this brain region may reflect neural consequences of the lack of adequate emotion regulation strategies associated with disorganized attachment (Lyons-Ruth & Jacobvitz, 2016). This finding is consistent with studies showing a link between different caregiving indices and orbitofrontal cortex morphology. For example, animal research indicates that lesions to the orbitofrontal cortex lead to a weaker preference for the principal caregiver in primates, suggesting that this brain structure supports the formation and quality of parent-offspring bonds (Goursaud & Bachevalier, 2007). Moreover, experimental manipulation of parent-offspring interactions (i.e., permanent or intermittent separation) changes the development of prefrontal circuits in rodents (Helmeke et al., 2001, 2009; Seidel et al., 2011). In humans, adolescents exposed to less positive maternal behaviors show decelerated cortical thinning in the orbitofrontal cortices (Whittle et al., 2014). Considering that cortical thickness in frontal regions reaches its peak early in development (around 8 years of age or even prior) and then decreases gradually (Ducharme et al., 2016;

Wierenga et al., 2014 – although there is controversy about the exact shape of the cortical thickness trajectory, see Walhovd et al., 2017), the current results in 10-year-old children are consistent with those of Whittle et al. (2014). The thicker cortices associated with disorganized attachment observed here may indicate decelerated or delayed cortical thinning in children who have failed to elicit caregiver support with an organized set of attachment strategies in times of stress during infancy.

However, the association found in this study between thicker cortices and disorganized attachment contrasts with the findings of studies of maltreated or institutionalized children. Children who grow up in severely adverse caregiving contexts are reported to present thinner cortices and smaller grey matter volumes in orbitofrontal regions (De Brito et al., 2013; Gerritsen et al., 2012; Hanson et al., 2010; McLaughlin et al., 2014; Thomaes et al., 2010). One possibility for these divergent results is that the associations between stressors within the parent-child relationship and brain morphology may not be linear. Results in low-risk and high-risk samples might perhaps be better understood with a non-linear view of the association between caregiving-related stress and brain development. Whereas mild levels of caregiving stressors in otherwise healthy children could be associated with decelerated cortical thinning, as in the current study and Whittle et al.'s (2014) work, severe levels of stress associated with maltreatment or institutionalization could be associated with accelerated cortical thinning as reflected by thinner cortices (e.g., McLaughlin et al., 2014).

The methodological choice of controlling for attachment security in the current analyses was aimed at avoiding overlap with our previous report focusing on attachment security with this sample (Leblanc et al., 2017). Across the two papers, different morphological markers (volume or thickness) and brain regions were found to be associated with attachment disorganization (cortical thickness in the inferior, middle, and superior frontal gyri, as well as the orbitofrontal

and insular cortices) and attachment security (grey matter volume in the superior temporal sulcus and gyrus, temporo-parietal junction, and precentral gyrus). Theoretically, attachment disorganization can be considered orthogonal to the main (secure or insecure) attachment pattern displayed by the infant (Duschinsky, 2015; Hesse & Main, 2000) and indeed, children classified as disorganized in low-risk samples such as this one often have a secondary classification of secure attachment (Madigan et al., 2013). In addition, children with an organized (secure or insecure) primary classification often show some disorganized attachment behaviors during the SSP. In other words, attachment disorganization co-exists with security or insecurity, and the unique variance in attachment disorganization, independent of insecure attachment, appears to be meaningful, perhaps representing the degree to which the child's secure or insecure attachment pattern is at risk of collapse in stressful situations. The current results suggest that this might be so even when considering small inter-individual differences in mild levels of disorganized attachment behaviors ($M = 2.21$, $SD = 1.49$, in this study). As highlighted in a review by Belsky and de Haan (2011), most findings pertaining to the link between caregiving and brain morphology focused on high-risk samples. Aiming to augment generalization to the majority of the population, these authors called for more studies on the links between caregiving in the normal range and brain morphology. The current study, addressing mostly mild levels of disorganized attachment in a sample of otherwise typically developing children, is in line with this effort and reminiscent of prior research suggesting that there might be important qualitative differences between more and less severe forms of disorganized attachment (Padrón et al., 2014).

Importantly, we found that children with thicker frontal cortices were more rejected by their peers one year later, which indicates that attachment-related individual differences in brain morphology translate into meaningful differences in children's daily social interactions. As Belsky and de Haan (2011) noted, "without (eventual) evidence that discerned effects of

parenting on brain structure and function come to influence actual behavioural functioning, there would seem to be grounds for questioning the significance of this entire field of study” (p. 424). Only four studies have reported links among caregiving indices, brain structures or development, and behavioral functioning, such as prosocial behaviors, suicidality, limbic irritability, and global functioning (Khoury et al., 2019; Lyons-Ruth et al., 2016), including only one with children (Kok et al., 2017) and one with adolescents (Whittle et al., 2016). Thus, the current study adds to a still meager literature in suggesting that caregiving-induced changes in brain structures translate into variations in socio-emotional functioning, as indexed here by peer rejection. Future research should investigate other indicators of socio-emotional functioning known to relate to attachment such as externalizing and internalizing behavior problems.

It is noteworthy that self-reported and teacher-reported peer rejection were not correlated to each other, yet they were both significantly associated with cortical thickness. Studies show that some children over- or underestimate their peer rejection compared to the actual peer rejection reported by others (Portillo & Fernández-Baena, 2020; Zimmer-Gembeck et al., 2013), which is consistent with the non-significant association observed here. Whereas teacher reports might be described as a more objective measure of peer rejection that reflects how many of the child’s peers actually dislike or reject him/her, self-reports allow for the assessment of the subjective experience of peer rejection and constitute distinct predictors of emotional maladjustment (Kistner et al., 1999; Panak & Garber, 1992). Both the perception and the experience of being rejected have important implications for child social functioning. Therefore, it is noteworthy that both were found to be associated with the regional cortical thickness values that were themselves predicted by early attachment disorganization.

We submit that emotion regulation processes may be at the heart of the links observed here between disorganized attachment, cortical thickness in frontal regions, and peer rejection.

Infants are highly dependent on their caregiver to regulate their emotions and those who display more disorganized attachment are likely to have been exposed to repeated experiences of unsuccessful emotion regulation within the parent-child relationship (Cooke et al., 2019; Lyons-Ruth & Jacobvitz, 2016). The current findings could suggest that such failure to elicit comfort from the caregiver through organized attachment strategies may impede cortical development in brain regions involved in emotion regulation, such as the orbitofrontal cortex. In day to day life, the suboptimal development of these critical neural structures may increasingly hinder children's ability to manage their emotions while interacting with peers. In turn, poor emotion regulatory capacity is a documented risk factor for inadequate social behavior and peer rejection (see Röhl et al., 2012, for a review).

Attachment theory postulates that disorganized attachment is the result of an 'unsolvable paradox' for the infant, in that his/her caregiver is simultaneously a source of fear and safety (Hesse & Main, 2000; van IJzendoorn et al., 1999). This emotional paradox may induce dysregulation of stress-response systems, in turn impacting brain development. In animals, the orbitofrontal cortex is subject to stress-induced structural changes (see McEwen et al., 2016, for a review). In humans, there is evidence that disorganized attachment in infancy is related to anomalous cortisol response (Hane & Fox, 2016), which could also affect orbitofrontal development. Bernard and Dozier (2010) found that infants who exhibit more disorganized attachment have lower basal cortisol levels and show increased cortisol reactivity to a stressor (i.e., maternal separation in the SSP), and this is not the case in infants with organized attachment classifications. Diurnal rhythms in cortisol production are also significantly different in infants with organized and disorganized attachment classifications (Luijk et al., 2010). Unlike the healthy pattern of cortisol secretion characterized by high levels in the morning followed by a decline throughout the day, disorganized infants show a flattened slope of cortisol secretion.

Hence, the presence of disorganized attachment in infancy and the corresponding inability to use the caregiver as a source of comfort in the face of stressful situation are associated with anomalous cortisol response, which is likely to have an impact on children's brain structures including the orbitofrontal cortex.

The results presented here highlight the importance of considering methodological factors in the interpretation of neuroimaging results. Indeed, our results based on a whole-brain analytical approach contrast with those of studies that, using the amygdala and hippocampus as a priori regions-of-interest, reported larger subcortical grey matter volumes in individuals who previously evolved in disorganized attachment relationships (vs. organized attachment; Cortes Hidalgo et al., 2019; Lyons-Ruth et al., 2016). Other methodological differences that are known to influence the direction and strength of associations in neuroimaging studies and are relevant here include: sample size, child age at the attachment and MRI assessments (Lupien et al., 2009; Teicher & Samson, 2016), choice of covariates (Hyatt et al., 2020), and the choice of template when pre-processing child neuroimaging data (Yoon et al., 2009). It may also be worth noting that neither Cortes Hidalgo et al. (2019) nor Lyons-Ruth et al. (2016) considered *regional* cortical thickness; however, Cortes Hidalgo et al. reported a (non-significant) group difference on *average* cortical thickness across the brain between disorganized vs. organized attachment, $\beta = .16, p = .14$. Of note, the magnitude of this regression coefficient was quite similar to those for the significant relations that the authors observed between disorganized attachment and left ($\beta = .18$) or right ($\beta = .21$) hippocampal volumes after accounting for the same covariates. The direction of this group difference (thicker cortex in the disorganized attachment group), albeit not statistically significant, is also consistent with the direction of the current findings. This raises the possibility that statistically significant positive associations between disorganized attachment behaviors and cortical thickness may in fact have been present in some brain regions in Cortes

Hidalgo et al.'s sample, for instance in frontal brain regions (as observed here with a whole-brain approach).

Overall, it is clear that the search for the neural sequelae of disorganized attachment, in both cortical and subcortical areas, is just beginning. The results of the current small-scale study, the first to our knowledge to address regional whole-brain cortical thickness and volume in relation to disorganized attachment, suggest that this search is worth continuing with larger samples. The use of a dimensional approach to attachment along with consideration of regional brain differences may be promising in that regard. The current results raise the possibility, to be investigated in larger-scale studies, that even mild levels of attachment disorganization in an otherwise low-risk sample — which have previously been observed to predict psychophysiological dysregulation (Bernard & Dozier, 2010) — may impair brain development in specific regions and associated socio-emotional functioning.

Nonetheless, the results of this study must be interpreted in the context of some limitations. First, the longitudinal but non-experimental design precludes causal inference and determination of directionality. For instance, individual differences in brain structures in infancy may affect infant display of affect and thereby elicit different caregiver reactions which, with time, influence the development of the attachment bond (see Rifkin-Graboi et al., 2019). Second, the small sample size and the use of several covariates reduced statistical power, potentially leading to underestimation of the links between disorganized attachment and brain morphology (e.g., subcortical grey matter volumes; Cortes Hidalgo et al., 2019; Lyons-Ruth et al., 2016). As well, the whole-brain approach and statistical corrections, while appropriately cautious in the context of the small sample size and the paucity of prior research available to derive a-priori hypotheses, further reduced statistical power. On the other hand, the dimensional measure of disorganized attachment helped to reduce measurement error associated with forced classification

and to retain within-classification differences between children (Deneault et al., 2020, Fraley & Spieker, 2003a), potentially enhancing statistical power. Small samples also reduce the reliability of observed individual differences (Button et al., 2013) in part because they are more susceptible to the effects of extreme scores. Indeed, the scatterplots (Figure 3) raise the possibility that some of the observed associations may be driven to a degree (or inflated) by a few children. Thus, larger samples, especially if they entail more variation along the entire continuum of attachment disorganization, are needed to push the field forward. Finally, the use of a low-risk sample precludes generalization to high-risk samples in which, as mentioned above, the associations between the caregiving environment and brain development may take different forms, and in which disorganized attachment is more prevalent. All in all, more studies are needed to test the robustness of the preliminary results reported here.

This 10-year longitudinal study suggests that higher levels of disorganized attachment in infancy are related to thicker cortices in bilateral middle and superior frontal gyri as well as in the orbitofrontal and insular cortices in the right hemisphere in late childhood. Relatively thicker cortices in these regions are further associated with more peer rejection one year later according to both children and their teachers. To our knowledge, this is the first study to investigate the links among infant-caregiver attachment, brain morphology, and socio-emotional functioning in childhood. Despite the small sample size, the use of a gold-standard observational measure of attachment disorganization along with whole-brain analyses using a pediatric template enabled the identification of novel associations between disorganized attachment and frontal cortical thickness, and these associations were robust to multiple comparisons correction and several important covariates. Importantly, this study is the first to suggest that brain changes associated with attachment relationships are indeed translated into behavioral correlates in children, peer rejection in this case. Future studies with larger samples should continue to investigate the real-

life implications of caregiving-related differences in brain morphology. Overall, while findings with both low-risk and high-risk samples are beginning to converge to suggest that early caregiving experiences affect neural development in human children, more work is needed to determine the exact nature, direction, and strength of these associations, and how they vary according to sample type, child age, and other methodological features.

Declarations

Open practices statements

- None of the data or materials for the experiments reported here is available and none of the experiments was preregistered.

Funding

- The research leading to these results received funding from the Social Sciences and Humanities Research Council of Canada [410-2010-1366; 435-2016-1396], the Canadian Institutes of Health Research [MOP-119390], the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada [RGPIN-2019-05084], and le Fonds de Recherche du Québec - Société et Culture [2012-RP-144923]

Conflict of interests

- The authors have no relevant financial or non-financial interests to disclose.

Ethics approval

- The study was approved by the aging-neuroimaging research ethics committee of the CIUSSS du Centre-Sud-de-l'île-de-Montréal.

Consent to participate

- All families provided written informed consent for participation.

Authors' contribution

- Élizabel Leblanc: Conceptualization, Methodology, Formal Analysis, Investigation, Writing – Original Draft.
- Fanny Dégeilh: Conceptualization, Methodology, Formal Analysis, Writing – Original Draft (part of the Method section), Writing – Reviewing and Editing, Supervision.

- Miriam H. Beauchamp: Conceptualization, Methodology, Resources, Writing – Reviewing and Editing, Supervision.
- Annie Bernier: Conceptualization, Methodology, Resources, Writing – Reviewing and Editing, Supervision, Project administration, Funding acquisition.

References

- Ainsworth, M. D. S., Blehar, M., Waters, E., & Wall, S. (1978). *Patterns of attachment: A psychological study of the strange situation*. Lawrence Erlbaum Associates.
- Ahnert, L., Pinquart, M., & Lamb, M. E. (2006). Security of children's relationships with nonparental care providers: A meta-analysis. *Child Development, 77*(3), 664–679. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2006.00896.x>
- Belsky, J., & de Haan, M. (2011). Annual research review: Parenting and children's brain development: The end of the beginning. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, 52*(4), 409–428. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-7610.2010.02281.x>
- Bernard, K., & Dozier, M. (2010). Examining infants' cortisol responses to laboratory tasks among children varying in attachment disorganization: Stress reactivity or return to baseline? *Developmental Psychology, 46*(6), 1771–1778. <http://dx.doi.org/10.1037/a0020660>
- Bernier, A., Beauchamp, M. H., & Cimon-Paquet, C. (2020). From Early Relationships to Preacademic Knowledge: A Sociocognitive Developmental Cascade to School Readiness. *Child Development, 91*(1), e134–e145. <https://doi.org/10.1111/cdev.13160>
- Bernier, A., & Meins, E. (2008). A threshold approach to understanding the origins of attachment disorganization. *Developmental Psychology, 44*(4), 969–982. <http://dx.doi.org/10.1037/0012-1649.44.4.969>
- Blakemore, S. J. (2008). The social brain in adolescence. *Nature Reviews Neuroscience, 9*(4), 267–277. <http://dx.doi.org/10.1038/nrn2353>
- Buhle, J. T., Silvers, J. A., Wager, T. D., Lopez, R., Onyemekwu, C., Kober, H., Weber, J., & Ochsner, K. N. (2014). Cognitive reappraisal of emotion: A meta-analysis of human

neuroimaging studies. *Cerebral Cortex*, 24(11), 2981–2990.

<http://dx.doi.org/10.1093/cercor/bht154>

Button, K., Ioannidis, J., Mokrysz, C., Nosek, B. A., Flint, J., Robinson, E. S. J., & Munafò, M. R. (2013). Power failure: Why small sample size undermines the reliability of neuroscience. *Nature Reviews Neuroscience*, 14, 365–376.

<https://doi.org/10.1038/nrn3475>

Carlson, E. A. (1998). A prospective longitudinal study of attachment disorganization/disorientation. *Child Development*, 69(4), 1107–1128.

<https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.1998.tb06163.x>

Carskadon, M. A., & Acebo, C. (1993). A self-administered rating scale for pubertal development. *Journal of Adolescent Health*, 14(3), 190–195.

[https://doi.org/10.1016/1054-139X\(93\)90004-9](https://doi.org/10.1016/1054-139X(93)90004-9)

Cassidy, J. (2016). The nature of child's tie. In J. Cassidy & P. R. Shaver (Eds.), *Handbook of attachment: Theory, research, and clinical applications* (3rd ed., pp. 3–24). Guilford Press.

Cooke, J. E., Kochendorfer, L. B., Stuart-Parrigon, K. L., Koehn, A. J., & Kerns, K. A. (2019). Parent–child attachment and children's experience and regulation of emotion: A meta-analytic review. *Emotion*, 19(6), 1103–1126. <https://doi.org/10.1037/emo0000504>

Cortes Hidalgo, A. P., Muetzel, R., Luijk, M. P. C. M., Bakermans-Kranenburg, M. J., El Marroun, H., Vernooij, M. W., van IJzendoorn, M. H., White, T., & Tiemeier, H. (2019). Observed infant-parent attachment and brain morphology in middle childhood – A population-based study. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 40, 100724.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.dcn.2019.100724>

- Cummings, E. M. (2003). Toward assessing attachment on an emotional security continuum: Comment on Fraley and Spieker (2003). *Developmental Psychology, 39*(3), 405–408. <http://dx.doi.org/10.1037/0012-1649.39.3.405>
- De Brito, S. A., Viding, E., Sebastian, C. L., Kelly, P. A., Mechelli, A., Maris, H., & McCrory, E. J. (2013). Reduced orbitofrontal and temporal grey matter in a community sample of maltreated children. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, 54*(1), 105–112. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2012.02597.x>
- Deneault, A.-A., Bureau, J.-F., Yurkowski, K., & Moss, E. (2020) Validation of the Preschool Attachment Rating Scales with child-mother and child-father dyads. *Attachment & Human Development, 22*(5), 491–513. <https://doi.org/10.1080/14616734.2019.1589546>
- Dishion, T. J., Kim, H., Stormshak, E. A., & O'Neill, M. (2014). A brief measure of peer affiliation and social acceptance (PASA): Validity in an ethnically diverse sample of early adolescents. *Journal of Clinical Child & Adolescent Psychology, 43*(4), 601–612. <http://dx.doi.org/10.1080/15374416.2013.876641>
- Ducharme, S., Albaugh, M. D., Nguyen, T. V., Hudziak, J. J., Mateos-Pérez, J. M., Labbe, A., Evans, A. C., Karama, S., & Brain Development Cooperative Group. (2016). Trajectories of cortical thickness maturation in normal brain development—The importance of quality control procedures. *NeuroImage, 125*, 267–279. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.10.010>
- Duschinsky, R. (2015). The emergence of the disorganized/disoriented (D) attachment classification, 1979–1982. *History of Psychology, 18*(1), 32. <http://dx.doi.org/10.1037/a0038524>
- Enders, C. K. (2010). *Applied missing data analysis*. Guilford Press.

- Fearon, R. P., Bakermans-Kranenburg, M. J., van IJzendoorn, M. H., Lapsley, A. M., & Roisman, G. I. (2010). The significance of insecure attachment and disorganization in the development of children's externalizing behavior: A meta-analytic study. *Child Development, 81*(2), 435–456. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8624.2009.01405.x>
- Field, A. (2013). *Discovering statistics using IBM SPSS statistics*. SAGE Publications.
- Fonov, V., Evans, A. C., Botteron, K., Alml, C. R., McKinstry, R. C., Collins, D. L., & Brain Development Cooperative Group (2011). Unbiased average age-appropriate atlases for pediatric studies. *NeuroImage, 54*(1), 313–327.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.07.033>
- Fraley, R. C., Hudson, N. W., Heffernan, M. E., & Segal, N. (2015). Are adult attachment styles categorical or dimensional? A taxometric analysis of general and relationship-specific attachment orientations. *Journal of Personality and Social Psychology, 109*(2), 354–368.
<http://dx.doi.org/10.1037/pspp0000027>
- Fraley, R. C., & Spieker, S. J. (2003a). Are infant attachment patterns continuously or categorically distributed? A taxometric analysis of strange situation behavior. *Developmental Psychology, 39*(3), 387–404. <http://dx.doi.org/10.1037/0012-1649.39.3.387>
- Fraley, R. C., & Spieker, S. J. (2003b). What are the differences between dimensional and categorical models of individual differences in attachment? Reply to Cassidy (2003), Cummings (2003), Sroufe (2003), and Waters and Beauchaine (2003). *Developmental Psychology, 39*(3), 423–429. <http://dx.doi.org/10.1037/0012-1649.39.3.423>
- Gerritsen, L., Tendolkar, I., Franke, B., Vasquez, A. A., Kooijman, S., Buitelaar, J., & Rijpkema, P. (2012). BDNF Val66Met genotype modulates the effect of childhood adversity on

- subgenual anterior cingulate cortex volume in healthy subjects. *Molecular Psychiatry*, *17*(6), 597–603. <https://doi.org/10.1038/mp.2011.51>
- Geyer, C. J. (1992). Practical Markov chain Monte Carlo. *Statistical Science*, *7*(4), 473–483. <https://doi.org/10.1214/ss/1177011137>
- Gilmore, J. H., Knickmeyer, R. C., & Gao, W. (2018). Imaging structural and functional brain development in early childhood. *Nature Reviews Neuroscience*, *19*(3), 123–137. <https://doi.org/10.1038/nrn.2018.1>
- Goursaud, A. P., & Bachevalier, J. (2007). Social attachment in juvenile monkeys with neonatal lesion of the hippocampus, amygdala and orbital frontal cortex. *Behavioural Brain Research*, *176*(1), 75–93. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bbr.2006.09.020>
- Graham, J. W. (2009). Missing data analysis: Making it work in the real world. *Annual Review of Psychology*, *60*, 549–576. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.58.110405.085530>
- Groh, A. M., Fearon, R. P., Bakermans-Kranenburg, M. J., van IJzendoorn, M. H., Steele, R. D., & Roisman, G. I. (2014). The significance of attachment security for children's social competence with peers: A meta-analytic study. *Attachment & Human Development*, *16*(2), 103–136. <http://dx.doi.org/10.1080/14616734.2014.883636>
- Groh, A. M., Narayan, A. J., Bakermans-Kranenburg, M. J., Roisman, G. I., Vaughn, B. E., Fearon, R. P., & van IJzendoorn, M. H. (2017). Attachment and temperament in the early life course: A meta-analytic review. *Child Development*, *88*(3), 770–795. <https://doi.org/10.1111/cdev.12677>
- Groh, A. M., Roisman, G. I., van IJzendoorn, M. H., Bakermans-Kranenburg, M. J., & Fearon, R. P. (2012). The significance of insecure and disorganized attachment for children's internalizing symptoms: A meta-analytic study. *Child Development*, *83*(2), 591–610. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8624.2011.01711.x>

- Gunnar, M. R., Fisher, P. A., & Early Experience Stress and Prevention Science Network (2006). Bringing basic research on early experience and stress neurobiology to bear on preventive interventions for neglected and maltreated children. *Development and Psychopathology*, *18*(3), 651–677. <https://dx.doi.org/10.1017/S0954579406060330>
- Hane, A. A., & Fox, N. A. (2016). Studying the biology of human attachment. In J. Cassidy & P. R. Shaver (Eds.), *Handbook of attachment: Theory, research, and clinical applications* (3rd ed., pp. 223–241). Guilford Press.
- Hanson, J. L., Chung, M. K., Avants, B. B., Shirtcliff, E. A., Gee, J. C., Davidson, R. J., & Pollak, S. D. (2010). Early stress is associated with alterations in the orbitofrontal cortex: A tensor-based morphometry investigation of brain structure and behavioral risk. *Journal of Neuroscience*, *30*(22), 7466–7472. <https://dx.doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0859-10.2010>
- Haslam, N. (2019). Unicorns, snarks, and personality types: A review of the first 102 taxometric studies of personality. *Australian Journal of Psychology*, *71*(1), 39–49. <http://dx.doi.org/10.1111/ajpy.12228>
- Helmeke, C., Ovtscharoff Jr, W., Poeggel, G., & Braun, K. (2001). Juvenile emotional experience alters synaptic inputs on pyramidal neurons in the anterior cingulate cortex. *Cerebral Cortex*, *11*(8), 717–727. <http://dx.doi.org/10.1093/cercor/11.8.717>
- Helmeke, C., Seidel, K., Poeggel, G., Bredy, T. W., Abraham, A., & Braun, K. (2009). Paternal deprivation during infancy results in dendrite-and time-specific changes of dendritic development and spine formation in the orbitofrontal cortex of the biparental rodent *Octodon degus*. *Neuroscience*, *163*(3), 790–798. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroscience.2009.07.008>

- Hesse, E., & Main, M. (2000). Disorganized infant, child, and adult attachment: Collapse in behavioral and attentional strategies. *Journal of the American Psychoanalytic Association, 48*(4), 1097-1127. <https://doi.org/10.1177/00030651000480041101>
- Howes, C., & Spieker, S. (2016). Attachment relationships in the context of multiple caregivers. In J. Cassidy & P. R. Shaver (Eds.), *Handbook of attachment: Theory, research, and clinical applications* (3rd ed., pp. 314–329). Guilford Press.
- Huber, A., McMahon, C. A., & Sweller, N. (2015a). Efficacy of the 20-week circle of security intervention: Changes in caregiver reflective functioning, representations, and child attachment in an Australian clinical sample. *Infant Mental Health Journal, 36*(6), 556–574. <http://dx.doi.org/10.1002/imhj.21540>
- Huber, A., McMahon, C. A., & Sweller, N. (2015b). Improved child behavioural and emotional functioning after circle of security 20-week intervention. *Attachment & Human Development, 17*(6), 547–569. <http://dx.doi.org/10.1080/14616734.2015.1086395>
- Hyatt, C. S., Owens, M. M., Crowe, M. L., Carter, N. T., Lynam, D. R., & Miller, J. D. (2020). The quandary of covarying: A brief review and empirical examination of covariate use in structural neuroimaging studies on psychological variables. *NeuroImage, 205*, 116225. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116225>
- Khoury, J. E. , Pechtel, P. , Andersen, C. M. , Teicher, M. H. , & Lyons-Ruth, K. (2019). Relations among maternal withdrawal in infancy, borderline features, suicidality/self-injury, and adult hippocampal volume: A 30-year longitudinal study. *Behavioural Brain Research, 374*, 1121397. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2019.112139>
- Kistner, J., Balthazor, M., Risi, S., & Burton, C. (1999). Predicting dysphoria in adolescence from actual and perceived peer acceptance in childhood. *Journal of Clinical Child Psychology, 28*(1), 94–104. https://doi.org/10.1207/s15374424jccp2801_8

- Kochanska, G., Barry, R. A., Stellern, S. A., & OB'leness, J. J. (2009). Early attachment organization moderates the parent–child mutually coercive pathway to children's antisocial conduct. *Child Development, 80*(4), 1288–1300.
- Kochanska, G., & Kim, S. (2013). Early attachment organization with both parents and future behavior problems: From infancy to middle childhood. *Child Development, 84*(1), 283–296. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2012.01852.x>
- Kohn, N., Eickhoff, S. B., Scheller, M., Laird, A. R., Fox, P. T., & Habel, U. (2014). Neural network of cognitive emotion regulation – an ALE meta-analysis and MACM analysis. *NeuroImage, 87*, 345–355. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.11.001>
- Kok, R., Prinzie, P., Bakermans-Kranenburg, M. J., Verhulst, F. C., White, T., Tiemeier, H., & van IJzendoorn, M. H. (2017). Socialization of prosocial behavior: Gender differences in the mediating role of child brain volume. *Child Neuropsychology, 24*(6), 723–733. <http://dx.doi.org/10.1080/09297049.2017.1338340>
- Kok, R., Thijssen, S., Bakermans-Kranenburg, M. J., Jaddoe, V. W., Verhulst, F. C., White, T., van IJzendoorn, M. H., & Tiemeier, H. (2015). Normal variation in early parental sensitivity predicts child structural brain development. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry, 54*(10), 824–831. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaac.2015.07.009>
- Leblanc, É., Dégeilh, F., Daneault, V., Beauchamp, M. H., & Bernier, A. (2017). Attachment security in infancy: A preliminary study of prospective links to brain morphometry in late childhood. *Frontiers in Psychology, 8*, 2141. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.02141>
- Lee, A., Poh, J. S., Wen, D. J., Tan, H. M., Chong, Y. S., Tan, K. H., Gluckman, P. D., Fortier, M. V., Rifkin-Graboi, A., & Qiu, A. (2019). Maternal care in infancy and the course of

limbic development. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 40, 100714.

<https://doi.org/10.1016/j.dcn.2019.100714>

Liu, R. T. (2016). Taxometric evidence of a dimensional latent structure for depression in an epidemiological sample of children and adolescents. *Psychological Medicine*, 46(6), 1265–1275. <http://dx.doi.org/10.1017/S0033291715002792>

Luby, J. L., Barch, D. M., Belden, A., Gaffrey, M. S., Tillman, R., Babb, C., Nishino, T., Suzuki, H., & Botteron, K. N. (2012). Maternal support in early childhood predicts larger hippocampal volumes at school age. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(8), 2854–2859. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1118003109>

Luby, J. L., Belden, A., Harms, M. P., Tillman, R., & Barch, D. M. (2016). Preschool is a sensitive period for the influence of maternal support on the trajectory of hippocampal development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(20), 5742–5747. <https://doi.org/10.1073/pnas.1601443113>

Lupien, S. J., McEwen, B. S., Gunnar, M. R., & Heim, C. (2009). Effects of stress throughout the lifespan on the brain, behaviour and cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 10(6), 434–445. <https://doi.org/10.1038/nrn2639>

Luijk, M. P. C. M., Saridjan, N., Tharner, A., van IJzendoorn, M. H., Bakermans-Kranenburg, M. J., Jaddoe, V. W. V., Hofman, A., Verhulst, F. C., & Tiemeier, H. (2010). Attachment, depression, and cortisol: Deviant patterns in insecure-resistant and disorganized infants. *Developmental Psychobiology*, 52(5), 441–452. <https://doi.org/10.1002/dev.20446>

Lyons-Ruth, K., & Jacobvitz, D. (2016). Attachment disorganization from infancy to adulthood: Neurobiological correlates, parenting contexts, and pathways to disorder. In J. Cassidy & P. R. Shaver (Eds.), *Handbook of attachment: Theory, research, and clinical applications* (3rd ed., pp. 667–695). Guilford Press.

- Lyons-Ruth, K., Pechtel, P., Yoon, S. A., Anderson, C. M., & Teicher, M. H. (2016). Disorganized attachment in infancy predicts greater amygdala volume in adulthood. *Behavioural Brain Research, 308*, 83–93. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bbr.2016.03.050>
- Madigan, S., Atkinson, L., Laurin, K., & Benoit, D. (2013). Attachment and internalizing behavior in early childhood: A meta-analysis. *Developmental Psychology, 49*(4), 672. <https://psycnet.apa.org/doi/10.1037/a0028793>
- Main, M., & Hesse, E. (1990). Parents' unresolved traumatic experiences are related to infant disorganized attachment status. In M. T. Greenberg, D. Cicchetti, & E. M. Cummings (Eds.), *Attachment in the preschool years: Theory, research, and intervention* (pp. 161–181). University of Chicago Press.
- Main, M., & Solomon, J. (1990). Procedures for identifying infants as disorganized/disoriented during the Ainsworth Strange Situation. In M. T. Greenberg, D. Cicchetti, & E. M. Cummings (Eds.), *Attachment in the preschool years: Theory, research, and intervention* (pp. 121–160). University of Chicago Press.
- McEwen, B. S., Nasca, C., & Gray, J. D. (2016). Stress effects on neuronal structure: Hippocampus, amygdala, and prefrontal cortex. *Neuropsychopharmacology, 41*(1), 3–23. <http://dx.doi.org/10.1038/npp.2015.171>
- McLaughlin, K. A., Sheridan, M. A., Winter, W., Fox, N. A., Zeanah, C. H., & Nelson, C. A. (2014). Widespread reductions in cortical thickness following severe early-life deprivation: A neurodevelopmental pathway to attention-deficit/hyperactivity disorder. *Biological Psychiatry, 76*(8), 629–638. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2013.08.016>
- Moutsiana, C., Johnstone, T., Murray, L., Fearon, R. P., Cooper, P. J., Pliatsikas, C., Goodyer, I., & Halligan, S. L. (2015). Insecure attachment during infancy predicts greater amygdala

- volumes in early adulthood. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 56(5), 540–548.
<http://dx.doi.org/10.1111/jcpp.12317>
- Padrón, E., Carlson, E. A., & Sroufe, L. A. (2014) Frightened versus not frightened disorganized infant attachment: Newborn characteristics and maternal caregiving. *American Journal of Orthopsychiatry*, 84(2), 201–208. <https://doi.org/10.1037/h0099390>
- Pallini, S., Chirumbolo, A., Morelli, M., Baiocco, R., Laghi, F., & Eisenberg, N. (2018). The relation of attachment security status to effortful self-regulation: A meta-analysis. *Psychological Bulletin*, 144(5), 501–531. <http://dx.doi.org/10.1037/bul0000134>
- Pallini, S., Morelli, M., Chirumbolo, A., Baiocco, R., Laghi, F., & Eisenberg, N. (2019). Attachment and attention problems: A meta-analysis. *Clinical Psychology Review*, 74, 101772. <https://doi.org/10.1016/j.cpr.2019.101772>
- Panak, W. F., & Garber, J. (1992). Role of aggression, rejection, and attributions in the prediction of depression in children. *Development and Psychopathology*, 4(1), 145–165.
<https://doi.org/10.1017/S0954579400005617>
- Pernet, C. R., Latinus, M., Nichols, T. E., & Rousselet, G. A. (2015). Cluster-based computational methods for mass univariate analyses of event-related brain potentials/fields: A simulation study. *Journal of Neuroscience Methods*, 250, 85–93.
<https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2014.08.003>
- Portillo, M., & Fernández-Baena, J. (2020). Social self-perception in adolescents: Accuracy and bias in their perceptions of acceptance/rejection. *Educational Psychology*, 26(1), 1-6.
<https://doi.org/10.5093/psed2019a12>
- Rifkin-Graboi, A., Kong, L., Sim, L. W., Sanmugam, S., Broekman, B. F., Chen, H., Wong, E., Kwek, K., Saw, S.-M., Chong, Y.-S., Gluckman, P. D., Fortier, M. V., Pederson, D., Meaney, M. J., & Qiu, A. (2015). Maternal sensitivity, infant limbic structure volume and

functional connectivity: A preliminary study. *Translational Psychiatry*, 5, e668.

<http://dx.doi.org/10.1038/tp.2015.133>

Rifkin-Graboi, A., Tan, H. M., Shaun, G. K. Y., Sim, L. W., Sanmugam, S., Chong, Y. S., Tan, K. H., Shek, L., Gluckman, P. D., Chen, H., Fortier, M., Meaney, M. J., & Qiu, A. (2019). An initial investigation of neonatal neuroanatomy, caregiving, and levels of disorganized behavior. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(34), 16787–16792.

<https://doi.org/10.1073/pnas.1900362116>

Röll, J., Koglin, U., & Petermann, F. (2012). Emotion regulation and childhood aggression: Longitudinal associations. *Child Psychiatry & Human Development*, 43(6), 909–923.

<https://psycnet.apa.org/doi/10.1007/s10578-012-0303-4>

Sethna, V., Pote, I., Wang, S., Gudbrandsen, M., Blasi, A., McCusker, C., Daly, E., Perry, E., Adams, K. P. H., Kuklisova-Murgasova, M., Busuulwa, P., Lloyd-Fox, S., Murray, L., Johnson, M. H., Williams, S. C. R., Murphy, D. G. M., Craig, M. C., & McAlonan, G. M. (2017). Mother-infant interactions and regional brain volumes in infancy: An MRI study.

Brain Structure and Function, 222(5), 2379–2388. <http://dx.doi.org/10.1007/s00429-016-1347-1>

Seidel, K., Poeggel, G., Holetschka, R., Helmeke, C., & Braun, K. (2011). Paternal deprivation affects the development of corticotrophin-releasing factor-expressing neurones in prefrontal cortex, amygdala and hippocampus of the biparental Octodon degus. *Journal of Neuroendocrinology*, 23(11), 1166–1176. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2826.2011.02208.x>

<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2826.2011.02208.x>

Smeekens, S., Riksen-Walraven, J. M., & Van Bakel, H. J. A. (2009). The predictive value of different infant attachment measures for socioemotional development at age 5 years.

Infant Mental Health Journal, 30(4), 366–383. <http://dx.doi.org/10.1002/imhj.20219>

- Smith, S. M., & Nichols, T. E. (2009). Threshold-free cluster enhancement: Addressing problems of smoothing, threshold dependence and localisation in cluster inference. *NeuroImage*, *44*(1), 83–98. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.03.061>
- Solomon, J., & George, C. (1999). *Attachment disorganization*. Guilford Press.
- Teicher, M. H., & Samson, J. A. (2016). Annual research review: Enduring neurobiological effects of childhood abuse and neglect. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *57*(3), 241–266. <https://doi.org/10.1111/jcpp.12507>
- Thomaes, K., Dorrepaal, E., Draijer, N., de Ruiter, M. B., van Balkom, A. J., Smit, J. H., & Veltman, D. J. (2010). Reduced anterior cingulate and orbitofrontal volumes in child abuse-related complex PTSD. *Journal of Clinical Psychiatry*, *71*(12), 1636–1644. <https://doi.org/10.4088/jcp.08m04754blu>
- Thompson, R. A. (2016). Early attachment and later development: Reframing the questions. In J. Cassidy & P. R. Shaver (Eds.), *Handbook of attachment: Theory, research, and clinical applications* (3rd ed., pp. 330–348). Guilford Press.
- Tottenham, N. (2014). The importance of early experiences for neuro-affective development. *Current Topics in Behavioral Neuroscience*, *16*, 109–129. https://dx.doi.org/10.1007/7854_2013_254
- van IJzendoorn, M. H., Schuengel, C., & Bakermans-Kranenburg, M. J. (1999). Disorganized attachment in early childhood: Meta-analysis of precursors, concomitants, and sequelae. *Development and Psychopathology*, *11*(2), 225–249. <https://doi.org/10.1017/s0954579499002035>
- Walhovd, K. B., Fjell, A. M., Giedd, J., Dale, A. M., & Brown, T. T. (2017). Through thick and thin: A need to reconcile contradictory results on trajectories in human cortical development. *Cerebral Cortex*, *27*(2), bhv301. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhv301>

- Waters, E., & Deane, K. E. (1985). Defining and assessing individual differences in attachment behavior: Q-methodology and the organization of behavior in infancy and early childhood. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 50(1), 41–65. <https://doi.org/10.2307/3333826>
- Waters, T. E. A., Facompre, C. R., Dujardin, A., Van De Walle, M., Verhees, M., Bodner, N., Boldt, L. J., & Bosmans, G. (2019). Taxometric analysis of secure base script knowledge in middle childhood reveals categorical latent structure. *Child Development*, 90(3), 694–707. <http://dx.doi.org/10.1111/cdev.13229>
- Whittle, S., Simmons, J. G., Dennison, M., Vijayakumar, N., Schwartz, O., Yap, M. B., Sheeber, L., & Allen, N. B. (2014). Positive parenting predicts the development of adolescent brain structure: A longitudinal study. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 8, 7–17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dcn.2013.10.006>
- Whittle, S., Vijayakumar, N., Dennison, M., Schwartz, O., Simmons, J. G., Sheeber, L., & Allen, N. B. (2016). Observed measures of negative parenting predict brain development during adolescence. *PLoS One*, 11(1), e0147774. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0147774>
- Wierenga, L. M., Langen, M., Oranje, B., & Durston, S. (2014). Unique developmental trajectories of cortical thickness and surface area. *NeuroImage*, 87, 120–126. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.11.010>
- Yoon, U., Fonov, V. S., Perusse, D., Evans, A. C., & Brain Development Cooperative Group (2009). The effect of template choice on morphometric analysis of pediatric brain data. *NeuroImage*, 45(3), 769–777. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.12.046>
- Zimmer-Gembeck, M. J., Nesdale, D., McGregor, L., Mastro, S., Goodwin, B., & Downey, G. (2013). Comparing reports of peer rejection: Associations with rejection sensitivity,

victimization, aggression, and friendship. *Journal of Adolescence*, 36(6), 1237–1246.

<https://doi.org/10.1016/j.adolescence.2013.10.002>

Figure 1

Association between Levels of Disorganized Attachment Behaviors in Infancy and Cortical Thickness in Late Childhood while Controlling for Attachment Security

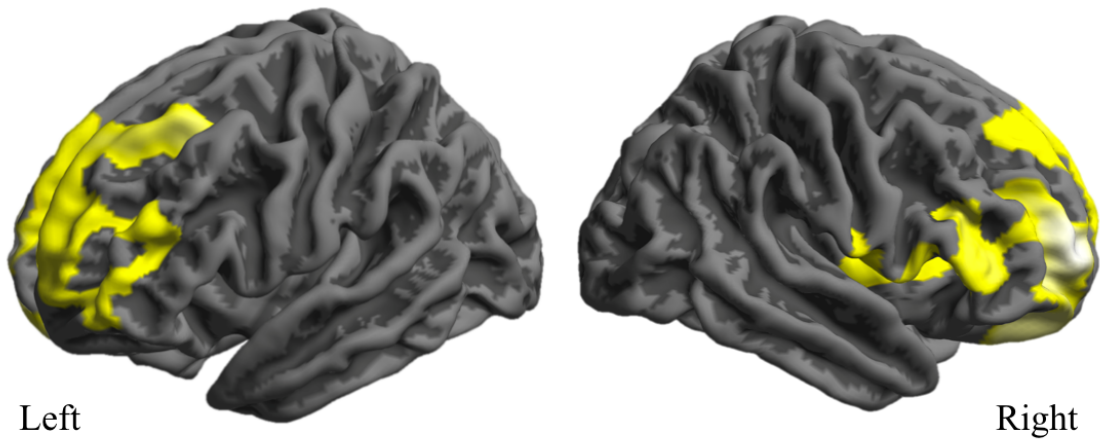


Figure 2

Association between Levels of Disorganized Attachment Behaviors in Infancy and Cortical Thickness in Late Childhood, without Controlling for Attachment Security

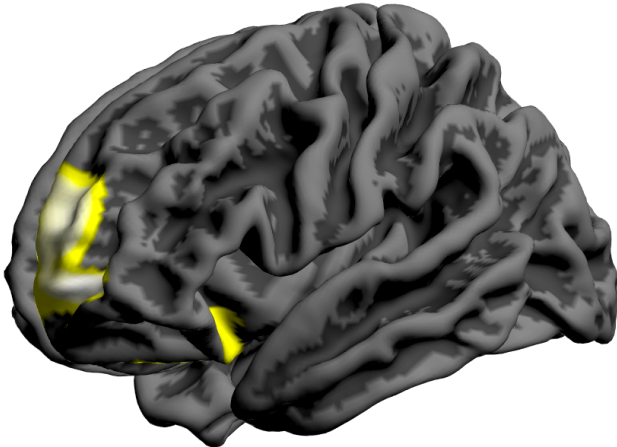
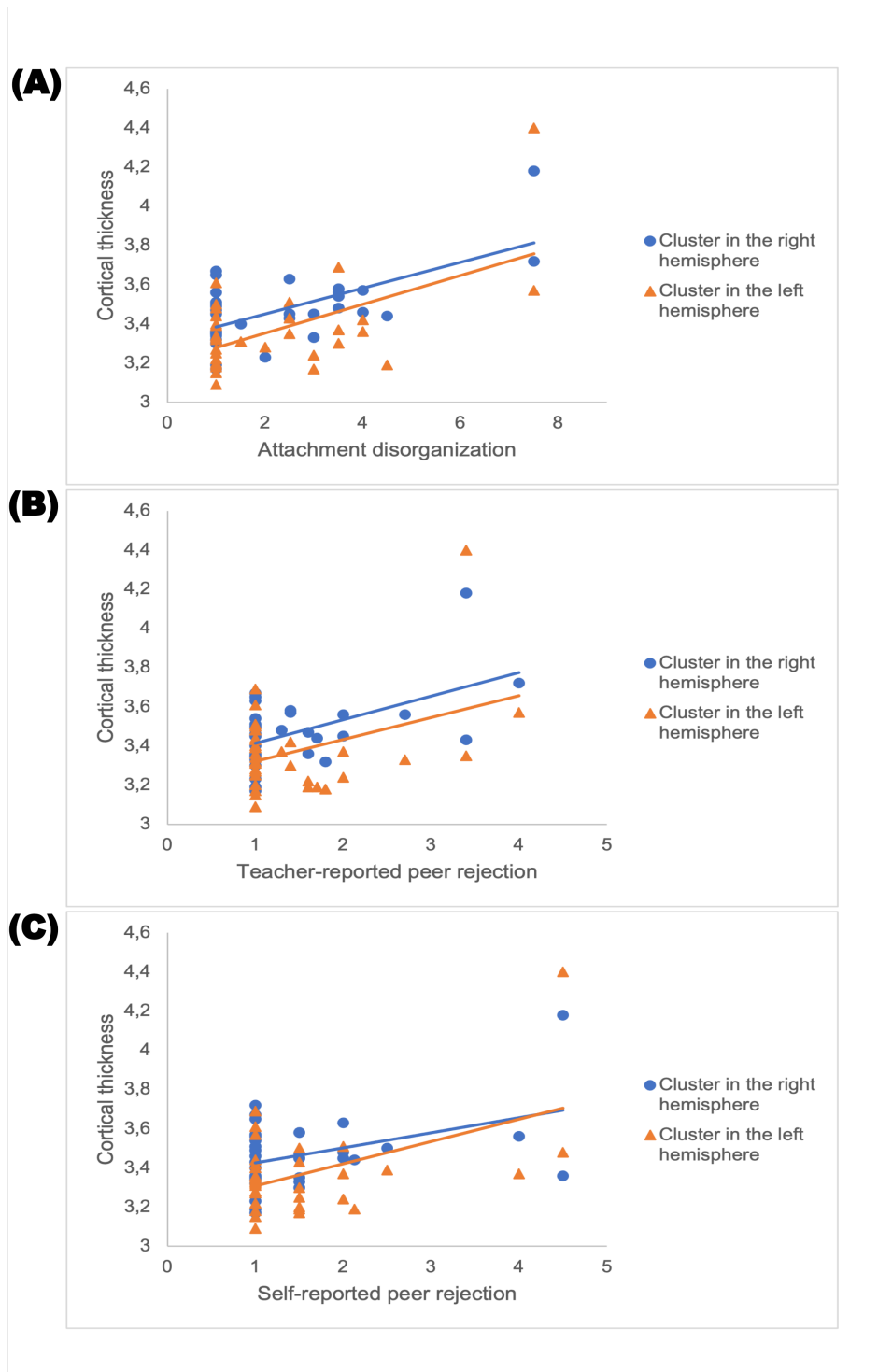


Figure 3
Scatterplots for Associations between the Main Variables



(A) Correlations between levels of disorganized attachment behaviors in infancy and cortical thickness in the right (blue circles) and left hemisphere (orange triangles) in late childhood. **(B)**

Correlations between self-reported peer rejection and cortical thickness in the right (blue circles) and left hemisphere (orange triangles). **(C)** Correlations between teacher-reported peer rejection and cortical thickness in the right (blue circles) and left hemisphere (orange triangles).

Table 1

Socio-demographic Information, Attachment Scores, and Peer Rejection Scores for Children who Underwent the Magnetic Resonance Imaging (MRI) Exam (n = 35) and those who Declined (n = 25) or were not Eligible (n = 4) to participate in the MRI Exam.

	Accepted MRI <i>n</i> = 35	Declined or ineligible <i>n</i> = 29	Group comparisons
Parental age at recruitment			
Mothers	31.63 ± 5.05	32.02 ± 3.50	$t(62) = -0.36; p = .73$
Fathers	33.40 ± 5.29	34.07 ± 4.86	$t(62) = -0.52; p = .60$
Parental years of education			
Mothers	15.40 ± 2.23	15.26 ± 2.32	$t(62) = 0.24; p = .81$
Fathers	15.60 ± 1.94	14.97 ± 2.10	$t(62) = 1.30; p = .21$
Ethnicity			
Mothers	80.00	86.21	$\chi^2(1) = 0.43; p = .51$
Fathers	74.30	75.90	$\chi^2(1) = 0.02; p = .89$
Family income	74.29	79.31	$\chi^2(1) = 0.22; p = .64$
Language at home	80.00	82.76	$\chi^2(1) = 0.08; p = .78$
Attachment			
Security	.48 ± .26	.50 ± .20	$t(62) = -0.42; p = .67$

Disorganization	2.21 ± 1.49	2.68 ± 1.97	$t(62) = -1.07; p = .29$
Peer rejection			
Child report	1.58 ± .96	1.73 ± .86	$t(62) = -0.66; p = .52$
Teacher report	1.36 ± .65	1.29 ± .52	$t(62) = 0.49; p = .63$
Pubertal status	1.94 ± .93	-	-

Note. For ethnicity, family income, and language, values represent percentages of families with a Caucasian mother/father, an income above \$60,000, and French as the main language. For parental age, parental education, as well as attachment, peer rejection, and pubertal status scores, values represent mean ± standard deviation. Two children who underwent MRI were excluded from the statistical analyses ($n = 33$): excluding them from the group comparisons did not change the results. Pubertal status was assessed at the MRI visit; therefore, this information was not available for children who declined or were not eligible to participate in the MRI exam.

Table 2

Areas of Regional Cortical Thickness Significantly Associated with Levels of Disorganized Attachment Behaviors in Infancy while Controlling for Attachment Security

Regions	<i>k</i>	MNI coordinates (x, y, z)	<i>TFCE</i>	<i>p</i>
Right hemisphere				
Cluster covering inferior, middle, and superior frontal gyri, as well as the orbitofrontal and insular cortices	2283	20, 62, 7	19,138.27	.005
		31, 53, -4	17,202.01	.007
		45, 35, 7	16,269.38	.004
Left hemisphere				
Cluster covering middle and superior frontal gyri	1144	-25, 18, 50	16,705.27	.012
		-31, 52, 0	15,511.59	.015
		-21, 62, 9	15,429.83	.017

Note. *k* = number of voxels; *TFCE* = threshold free cluster enhancement statistic.

Table 3

Areas of Regional Cortical Thickness Significantly Associated with Levels of Disorganized Attachment Behaviors in Infancy, without Controlling for Attachment Security

Regions	<i>k</i>	MNI coordinates (x, y, z)	<i>TFCE</i>	<i>p</i>
Left hemisphere				
Cluster covering the dorsolateral, medial and orbital parts of the superior frontal gyrus	477	-21, 56, -4	13,585.44	.033
		-19, 60, 13	13,429.61	.034
		-5, 58, -10	12,259.62	.042
Insula	92	-27, 18, -14	12,026.42	.043
Orbital part of the superior frontal gyrus	111	-14, 23, -22	11,769.91	.046
		-14, 35, -24	11,524.36	.047

Note. *k* = number of voxels; *TFCE* = threshold free cluster enhancement statistic.

Table 4*Correlations among the Main Variables*

	1.	2.	3.	4.	5.
1.Attachment disorganization	1	.568**	.637**	.334 [†]	.634**
2.CT in the left hemisphere		1	.769**	.484**	.387*
3.CT in the right hemisphere			1	.413*	.522**
4.Self-reported peer rejection				1	.204
5.Teacher-reported peer rejection					1

Note. CT = cortical thickness; refers to the regional CT significantly associated with disorganized attachment. ** $p < .01$. * $p < .05$. [†] $p < .10$

Chapitre 4 – Discussion

L'objectif général de la présente thèse était d'explorer les liens entre la qualité de l'attachement mère-enfant dans la petite enfance, la morphologie du cerveau à la fin de l'enfance et le fonctionnement socio-émotionnel subséquent des enfants. Le premier article a examiné les associations entre la sécurité d'attachement et la morphologie du cerveau. Le deuxième article a permis de vérifier si les différences individuelles de morphologie cérébrale, qui sont prédites par la désorganisation d'attachement, sont également associées au rejet par les pairs un an plus tard.

Dans cette conclusion, les résultats de la thèse seront discutés. Par la suite, certains mécanismes selon lesquels la qualité des relations d'attachement, la morphologie du cerveau et le fonctionnement socio-émotionnel pourraient être interreliés seront exposés. Les limites de la thèse et les directions futures seront ensuite abordées. Enfin, les retombées scientifiques et cliniques seront présentées.

4.1. Résumé des résultats

Le premier article de la thèse indique que les enfants ayant évolué dans une relation d'attachement plus sécuritaire durant la petite enfance présentent des volumes de matière grise plus importants à la fin de l'enfance au niveau de l'hémisphère droit dans les régions du gyrus et du sulcus temporal supérieur, de la jonction temporo-pariétale et du gyrus précentral. Le deuxième article révèle que les enfants qui présentent plus de comportements d'attachement désorganisés durant la petite enfance montrent à la fin de l'enfance une épaisseur corticale plus importante au niveau des gyri frontaux moyens et supérieurs bilatéralement, en plus de la région orbitofrontale et de l'insula dans l'hémisphère droit. De plus, une plus grande épaisseur corticale dans ces mêmes régions est associée à plus de rejet par les pairs un an plus tard.

Les deux études soulignent les associations durables entre l'attachement et la morphologie du cerveau. Les résultats sont globalement cohérents avec les études précédentes qui ont rapporté un lien longitudinal significatif entre la qualité des liens d'attachement tôt dans la vie et la morphologie cérébrale à l'enfance (Cortes Hidalgo et al., 2019) et à l'âge adulte (Lyons-Ruth et al., 2016; Moutsiana et al., 2015). Les deux études de cette thèse contribuent à cette littérature naissante de plusieurs façons. Tout d'abord, la présente thèse met de l'avant une méthodologie rigoureuse, par le choix d'une approche exploratoire (cerveau-entier) combinée à une correction statistique sévère pour les comparaisons multiples. Le premier article de cette thèse est le premier à utiliser une telle approche analytique dans l'étude du lien entre l'attachement et la morphologie cérébrale, les études précédentes ayant plutôt utilisé une approche analytique par régions d'intérêt (c.-à-d., les analyses statistiques sont effectuées seulement à l'intérieur de régions pré-déterminées, les autres régions étant exclues des analyses). Ensuite, la présente thèse contribue à la littérature par l'étude de la portée fonctionnelle des différences de morphologie cérébrale liées aux relations d'attachement précoces. Le deuxième article de la thèse est effectivement le premier à investiguer cette question spécifiquement en lien avec l'attachement parent-enfant. Finalement, la présente thèse examine la qualité des liens d'attachement de manière dimensionnelle et selon deux indicateurs distincts (sécurité et désorganisation). Alors que l'attachement est souvent conceptualisé en tant que catégorie par les chercheurs, la présente thèse met de l'avant que les mesures dimensionnelles confèrent des avantages conceptuels et méthodologiques.

Les résultats des deux études de la thèse présentent néanmoins des divergences entre elles. Les divergences touchent les différents marqueurs de la morphologie cérébrale (volume vs. épaisseur corticale) significativement associés aux relations d'attachement, la direction de ces associations, ainsi que les régions cérébrales exactes impliquées dans cette association. En effet, un niveau plus élevé de sécurité d'attachement est associé significativement à un volume de

matière grise plus élevée (et non à l'épaisseur corticale), alors qu'un niveau plus élevé de désorganisation d'attachement se voit lié à une épaisseur corticale plus élevée (et non au volume cérébral).

Il aurait été attendu que les liens entre la morphologie cérébrale et ces deux mesures de qualité du lien d'attachement — la sécurité capturant des aspects positifs de la relation alors que la désorganisation en capture des aspects négatifs — soient de direction opposée. Cette apparente contradiction entre les résultats des deux études peut être expliquée par le fait que le volume cérébral estimé à partir des images par résonance magnétique est en fait le produit de l'épaisseur et de la surface corticale. Ces deux derniers marqueurs montrent des trajectoires de développement distinctes (Lemaitre et al., 2012; Tamnes et al., 2017; Wierenga et al., 2014), sont indépendants d'un point de vue des processus génétiques (Jha et al., 2018; Panizzon et al., 2009) et phénotypiques (Lin et al., 2017; Winkler et al., 2010), en plus d'être liés de manière différentielle à des facteurs environnementaux (Jha et al., 2019), des profils cliniques (Ohta et al., 2016) et des processus cellulaires (Chen & Walsh, 2002). Ainsi, une hypothèse pour réconcilier l'apparente contradiction entre la direction des résultats des deux études est qu'un niveau plus élevé de sécurité d'attachement soit associé à une surface corticale plus élevée (marqueur qui n'a pas été mesuré dans cette thèse) et qui se reflète par un volume de matière grise plus élevé (premier article). Ceci ne contredirait pas les résultats d'une association positive entre la désorganisation d'attachement et l'épaisseur corticale (deuxième article), étant donné l'indépendance des mesures de surface et d'épaisseur corticale (Chen & Walsh, 2002; Jha et al., 2018, 2019; Lemaitre et al., 2012; Lin et al., 2017; Ohta et al., 2016; Panizzon et al., 2009; Tamnes et al., 2017; Wierenga et al., 2014; Winkler et al., 2010).

En ce qui concerne les régions cérébrales exactes associées à l'attachement parent-enfant, elles sont différentes selon la mesure de qualité du lien d'attachement utilisée. Néanmoins, un

point commun semble les relier, étant donné que la plupart font partie des réseaux cérébraux formant le cerveau social (voir la Figure 2 de l'introduction de la thèse). Le premier article rapporte des associations significatives entre la sécurité d'attachement et le volume de matière grise dans les régions du réseau de la mentalisation (jonction temporo-pariétale) et de la perception sociale (sulcus temporal supérieur). Le deuxième article rapporte des associations significatives entre la désorganisation d'attachement et l'épaisseur corticale dans les régions du réseau de l'affiliation (cortex orbitofrontal médial) et de la perception sociale (cortex orbitofrontal latéral). Finalement, il est intéressant de constater que la désorganisation d'attachement est associée à la morphologie d'une région qui fait partie du réseau de l'aversion sociale (insula). Ce réseau aurait pour rôle de protéger l'individu de situations sociales potentiellement dangereuses (Porcelli et al., 2019). L'activation du réseau de l'aversion sociale est particulièrement pertinente en lien avec les comportements d'attachement désorganisés. En effet, les enfants qui grandissent dans une relation d'attachement désorganisée montrent souvent des réactions de peur vis-à-vis leur figure d'attachement (Main & Solomon, 1990), ce qui peut possiblement donner lieu à une suractivation du réseau de l'aversion sociale et en affecter le développement morphologique. Bien que les régions exactes identifiées dans cette thèse comme étant liées à la sécurité et la désorganisation d'attachement ne soient pas les mêmes, elles touchent pour la majorité de près ou de loin aux réseaux du cerveau social.

Finalement, les divergences entre les résultats des deux études de la thèse ne sont pas sans rappeler le constat de Whittle et al. (2014) qui soulignaient que les pratiques parentales positives et négatives ne semblent pas représenter les extrêmes d'un même continuum, mais devraient plutôt être conceptualisées comme deux aspects de l'environnement de soins ayant un impact distinct sur la morphologie du cerveau des enfants, notamment en ce qui a trait des régions cérébrales exactes impliquées.

4.2. Mécanismes explicatifs

Les résultats de la thèse soulignent les liens durables entre la qualité des liens d'attachement précoces, la morphologie cérébrale et le fonctionnement socio-émotionnel. Plusieurs mécanismes pourraient expliquer de quelle façon ces variables sont interreliées. En effet, les expériences qui caractérisent les relations d'attachement, et qui diffèrent selon leur qualité, peuvent avoir un impact sur le développement du cerveau à travers différents processus.

Premièrement, la nature même de la sécurité d'attachement fait en sorte que l'enfant a confiance qu'il peut se référer à sa figure d'attachement en situation de détresse lors de l'exploration. Il est proposé que ce sentiment de sécurité favorise chez lui l'exploration active de son environnement social et physique (Ainsworth, 1985), offrant une panoplie de stimulations pour son cerveau en développement. À l'opposé, il est proposé que l'enfant impliqué dans une relation d'attachement désorganisée n'a pas la certitude que sa figure d'attachement lui fournira du support en cas de besoin lors de l'exploration (Main & Solomon, 1990); il aurait donc moins tendance à s'engager dans l'exploration. Il a en effet été observé que les enfants évoluant dans une relation sécurisée s'engagent plus dans l'exploration que les enfants impliqués dans une relation insécure ou désorganisée (Schieche & Spangler, 2005). Il est donc possible que les liens entre les relations d'attachement et la morphologie cérébrale de régions impliquées dans les fonctions motrices (gyrus précentral; premier article) soient expliqués par cet impact global sur le développement via la promotion des comportements d'exploration.

Deuxièmement, une autre hypothèse centrale de la recherche en attachement est que la sécurité d'attachement se développe lorsque l'enfant évolue dans un environnement favorisant une régulation émotionnelle adéquate lors des situations de détresse. Lorsque l'enfant est exposé de manière répétée à une régulation efficace de ses émotions négatives par sa figure d'attachement, cela lui procure une base solide pour le bon développement de ses capacités

d'auto-régulation. À l'opposé, l'enfant qui présente des comportements d'attachement désorganisés a probablement évolué auprès de figures d'attachement qui ne parvenaient pas à réguler ses émotions négatives et qui pouvaient même en générer davantage (p. ex., comportements parentaux atypiques qui créent une réaction de peur chez l'enfant; Lyons-Ruth & Jacobvitz, 2016). Les expériences de régulation émotionnelle vécues au sein des relations d'attachement sont donc susceptibles de façonner le développement cérébral des enfants dans les régions impliquées dans la régulation émotionnelle (Blakemore, 2008; Frank et al., 2014), comme les gyri temporaux moyen et supérieur (premier article), ainsi que le cortex orbitofrontal et l'insula (deuxième article).

Troisièmement, la théorie de l'attachement propose que la qualité des liens d'attachement précoces contribuerait au développement de représentations cognitives de soi et des autres au sein des relations sociales, classiquement nommées les « modèles opérants internes » (*internal working models*; Bretherton & Munholland, 2016). Par définition, l'enfant qui présente des comportements d'attachement sécures parvient plus efficacement à maintenir un équilibre entre l'exploration de son environnement et la proximité avec sa figure d'attachement lors de moments de détresse. Au fil d'expériences répétées lors desquelles l'enfant parvient à obtenir du réconfort et du soutien de sa figure d'attachement, il en vient graduellement à développer des modèles opérants internes positifs de soi (« je mérite et suis capable de susciter des soins et du réconfort ») et des autres (« ma figure d'attachement est attentive et sensible à mes besoins »; Bretherton & Munholland, 2016). À l'inverse, l'enfant qui présente des comportements d'attachement désorganisés est susceptible de développer des modèles opérants internes négatifs de soi et des autres (« je ne suis pas digne de recevoir des soins et du réconfort »; « ma figure d'attachement ne répond pas à mes tentatives de recherche de réconfort »). La théorie de l'attachement propose aussi qu'au fil des années, les modèles opérants internes spécifiques aux relations d'attachement

se généralisent aux autres relations interpersonnelles pour donner lieu à des représentations plus globales de soi et des autres. La teneur des modèles opérants internes peut donc avoir un impact important sur les opportunités de socialisation de l'enfant en l'encourageant ou non à s'engager avec confiance dans de nouvelles interactions sociales, ce qui pourrait du même coup influencer le développement des régions du cerveau social et le niveau de rejet par les pairs, comme le suggère le deuxième article de cette thèse. En somme, les relations d'attachement parent-enfant sont constituées d'expériences qui varient d'un individu à l'autre (encouragement de l'exploration, régulation des émotions). Ces expériences donnent lieu à la construction de modèles opérants internes de soi et des autres qui guident la manière de percevoir et de se comporter dans les relations interpersonnelles futures. Nous proposons donc que chacune de ces facettes des relations parent-enfant puisse faire office de mécanismes d'action par lesquels la qualité des relations d'attachement est liée à la morphologie du cerveau.

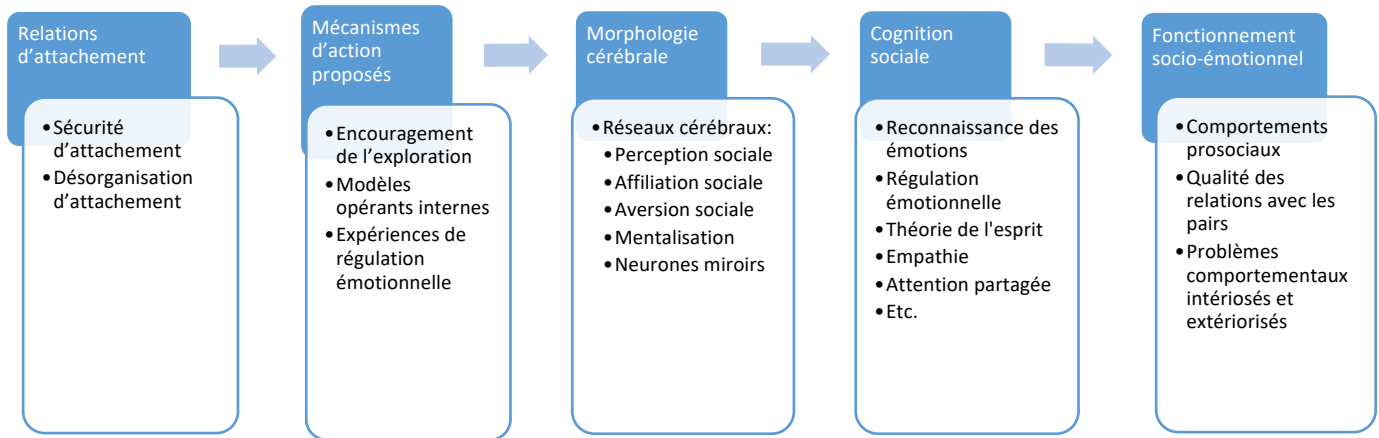
Dans la vie de tous les jours, un bon fonctionnement socio-émotionnel (comme la formation de relations sociales de qualité avec les pairs) s'appuie sur différentes fonctions cérébrales qui sont sous-tendues par le cerveau social. À cet égard, les fonctions du cerveau social sont souvent regroupées sous le terme de « cognition sociale ». La cognition sociale regroupe un ensemble d'habiletés complexes qui permettent la perception, le traitement et l'interprétation, ainsi que la réaction nuancée et dynamique à des stimuli sociaux (Beaudoin & Beauchamp, 2020). Les différences en termes de morphologie cérébrale dans le cerveau social peuvent se traduire par des variations dans les capacités de cognition sociale — qui n'ont toutefois pas été mesurées dans cette thèse — et conduire à des variations interindividuelles dans le fonctionnement socio-émotionnel des enfants (voir la Figure 1 pour un aperçu des liens proposés entre les expériences d'attachement, la morphologie cérébrale, la cognition sociale et le fonctionnement socio-émotionnel). Le volume ou l'épaisseur corticale des régions du cerveau

social sont liés aux habiletés en cognition sociale; plus spécifiquement la reconnaissance des émotions (Fujiwara et al., 2007; Maat et al., 2016; Rokita et al., 2020; Shdo et al., 2018), la régulation des émotions (Cutuli et al., 2014), la théorie de l'esprit (Hooker et al., 2011; Maat et al., 2016; Powell et al., 2014; Rice et al., 2014; Wiessman et al., 2020), l'empathie (Banissy et al., 2014; Hooker et al., 2011; Wallace et al., 2014) et l'attention partagée (Mosconi et al., 2009).

Ainsi, les différences morphologiques liées à la qualité des relations d'attachement pourraient se traduire par des différences sur le plan de la cognition sociale et du fonctionnement socio-émotionnel au quotidien. Par exemple, la région du sulcus temporal supérieur (premier article) est impliquée dans les processus de reconnaissance des émotions (Bickart et al., 2014). Les individus qui ne perçoivent pas adéquatement les émotions sont à risque de présenter un piètre fonctionnement social : un enfant qui perçoit de la colère chez son camarade est plus susceptible d'agir de manière inamicale ou hostile envers lui (Couture et al., 2006). De la même façon, un enfant qui ne perçoit pas que son camarade est apeuré n'aura pas tendance à agir de manière prosociale envers lui (Kaltwasser et al., 2007). Ultimement, ces comportements peuvent rendre l'enfant impopulaire et mener au rejet par les pairs. Un deuxième exemple de ces associations peut être illustré en lien avec le cortex orbitofrontal (deuxième article), qui est reconnu pour être impliqué dans la régulation émotionnelle (Buhle et al., 2014). Les enfants qui peinent à réguler leurs émotions (p. ex., crise de colère ou pleurs fréquents) ont également tendance à être rejetés par leurs pairs (voir Röhl et al., 2012, pour une revue de la littérature). Nous proposons donc que les différences morphologiques retrouvées en lien avec les relations d'attachement peuvent se traduire par de faibles capacités de cognition sociale, qui à leur tour placent les enfants à risque de présenter un fonctionnement socio-émotionnel sous-optimal de manière générale, et plus spécifiquement de vivre davantage de rejet par les pairs.

Figure 1

Une représentation de la cascade développementale liant les relations d'attachement au fonctionnement socio-émotionnel



Notons par ailleurs que les associations entre la qualité des liens d'attachement, la cognition sociale et la morphologie cérébrale sont probablement bidirectionnelles, ce qui n'est pas représenté dans la Figure 1 et qui n'a pas pu être vérifié dans la thèse. En effet, l'utilisation des capacités socio-cognitives est à la base de la formation des liens d'attachement parent-enfant et peut contribuer à façonner le cerveau des enfants par des processus de plasticité cérébrale dépendants de l'expérience (May, 2011). Pour se rapprocher de ses figures d'attachement, l'enfant doit s'adapter et mettre en place les comportements d'attachement qui ont le plus de chance de succès, selon le contexte et la figure d'attachement spécifique avec laquelle il interagit (Cassidy, 2016; Sroufe, 2016). À cette fin, l'enfant utilise ses capacités socio-cognitives afin de se rapprocher de ses figures d'attachement selon le contexte. Il est possible que les enfants qui parviennent plus efficacement à susciter des soins sensibles et qui présentent plus de comportements d'attachement sécurisés, recrutent plus fréquemment les régions cérébrales sous-jacentes à ces fonctions, ce qui contribue en retour à leur développement morphologique. En somme, l'interprétation des résultats de cette thèse s'appuie d'une part sur les postulats de la

théorie de l'attachement et d'autre part sur les modèles issus du domaine des neurosciences sociales. Bien que d'autres études soient nécessaires pour mieux comprendre les liens entre l'attachement, la morphologie du cerveau et le fonctionnement socio-émotionnel, cette thèse présente des données préliminaires pouvant alimenter des études subséquentes de plus grande envergure.

4.3. **Limites et études futures**

Les études de la thèse présentent des limites qui sont importantes à considérer dans l'interprétation de leurs résultats. Les limites soulevées ici peuvent guider les chercheurs à concevoir des études futures pouvant les adresser. Tout d'abord, bien que nous présentions des mécanismes explicatifs à l'égard du fait que les relations d'attachement puissent influencer la morphologie cérébrale, le devis non-expérimental de la thèse nous empêche de tirer des conclusions causales. Ainsi, une possibilité qui ne peut être écartée est que les différences sur le plan de la morphologie cérébrale aient été présentes dès la naissance ou très tôt dans la vie et aient prédisposé les enfants à développer un attachement plus ou moins sécure dans la petite enfance, comme cela a été rapporté dans quelques études (Nolvi et al., 2020; Rifkin-Graboi et al., 2019; Tharner et al., 2011). Il est en fait raisonnable de penser que les associations entre l'environnement de soins et le développement du cerveau sont probablement de nature bidirectionnelle. Dans une revue de la littérature récente, Ilyka et al. (2021) propose l'hypothèse que les différences de morphologie cérébrale à la naissance puissent sous-tendre une susceptibilité différentielle aux aspects tant positifs que négatifs de l'environnement de soins. Pour examiner les liens bidirectionnels entre l'environnement de soins et le développement du cerveau, des devis de recherche longitudinaux comportant plusieurs temps de mesure de la qualité de l'environnement de soins et de la morphologie cérébrale sont essentiels.

Également, le devis non-expérimental utilisé dans cette thèse fait en sorte que les associations observées pourraient être dues à une tierce variable, qui influence à la fois l'attachement parent-enfant, le développement du cerveau et les relations avec les pairs, créant ainsi des associations de façon fortuite entre ces variables. Notamment, il est possible que la génétique partagée entre la mère et l'enfant soit responsable des liens retrouvés entre l'attachement parent-enfant et la morphologie du cerveau de l'enfant, quoique les études génétiques montrent que la majorité de la variance de la qualité des relations d'attachement est attribuable à l'influence de l'environnement (Bokhorst et al., 2003; O'Connor & Croft, 2001; Roisman & Fraley, 2008). D'autres variables tierces sont également possibles, comme la qualité des comportements parentaux (p. ex., sensibilité, soutien à l'autonomie) et la cognition sociale de l'enfant, qui peuvent être associées à la fois à la qualité des relations d'attachement mère-enfant, la morphologie du cerveau et au fonctionnement socio-émotionnel de l'enfant.

Une autre limite de la thèse concerne la puissance statistique, étant donné l'échantillon de petite taille et l'utilisation de plusieurs covariables. Une réplication des résultats dans des échantillons indépendants et de plus grandes envergures est requise pour confirmer les liens retrouvés. De plus, les participants de l'échantillon sont issus d'une population canadienne majoritairement francophone, caucasienne, ayant un bon niveau socio-économique, considérée à faible risque, ce qui fait en sorte que les résultats de la thèse peuvent ne pas être généralisables à une population à haut risque d'attachement désorganisé (p. ex., maltraitance; Teicher & Samson, 2016). Soulignons par ailleurs que les théories en psychologie sont principalement développées et testées dans des cultures dites *WEIRD* (*Western, Educated, Industrialized, Rich, Democratic*; Henrich et al., 2010), ce qui fait en sorte que les concepts et hypothèses centrales de la théorie de l'attachement, de même que les résultats de la thèse, peuvent ne pas être généralisables aux

relations parent-enfant dans des contextes culturels différents (Keller, 2018; Rothbaum et al., 2000).

Les résultats de cette thèse ont mené à plusieurs réflexions pour des études futures. La vaste majorité des études portant sur la qualité de l'environnement de soins et la morphologie cérébrale ont utilisé une approche analytique par régions d'intérêt, ce qui peut faire en sorte que des liens pourtant existants ne sont pas mis en lumière. Comme la thèse démontre des liens entre la qualité des relations d'attachement et la morphologie de régions cérébrales corticales par l'utilisation d'une approche analytique appliquée au cerveau en entier, les études futures sont encouragées à utiliser ce type d'approche exploratoire avec en complément différents marqueurs de la morphologie cérébrale (volume, épaisseur, surface, etc.). Ceci permettra possiblement de découvrir des associations encore insoupçonnées et d'en investiguer la portée fonctionnelle.

Étant donné que les études portant sur les liens entre l'attachement et la morphologie du cerveau à l'enfance (Cortes-Hidalgo et al., 2019) et à l'âge adulte (Lyons-Ruth et al., 2016; Moutsiana et al., 2015) révèlent des incohérences, il apparaît important d'examiner cette association à travers plusieurs temps de mesure. Les études ayant mesuré la morphologie cérébrale de manière longitudinale démontrent effectivement que le développement morphologique d'une région cérébrale peut être associé à la qualité des comportements parentaux, alors que le volume ou l'épaisseur corticale à un temps de mesure unique ne l'est pas (Luby et al., 2016; Whittle et al., 2014, 2016). Néanmoins, aucune étude à ce jour n'a étudié le lien entre l'attachement et le *développement* des régions cérébrales (c.-à.-d., l'évolution de la structure à travers le développement ou sa trajectoire), alors qu'il apparaît important d'explorer cette question dans les études futures.

De plus, les mécanismes proposés dans cette thèse pour expliquer les liens entre les relations d'attachement, la morphologie du cerveau et le fonctionnement socio-émotionnel

pourraient inspirer les études futures à mettre à l'épreuve des modèles de cascades développementales (voir Figure 1). Par exemple, les relations d'attachement parent-enfant contribuent au développement cérébral dans des régions impliquées dans la régulation émotionnelle. Par la suite, les différences individuelles en termes de morphologie cérébrale dans ces régions peuvent se traduire par de moins bonnes capacités à réguler les émotions et se répercuter ensuite sur le fonctionnement socio-émotionnel, comme la qualité des relations avec les pairs. Les études futures gagneraient à mieux caractériser le fonctionnement socio-émotionnel des enfants, qui a été opérationnalisé dans la présente thèse uniquement par le rejet par les pairs. Des outils comme le *Strengths and Difficulties Questionnaire* (Goodman, 2001), qui présente de bonnes propriétés psychométriques et mesure différentes facettes du fonctionnement socio-émotionnel, comme les problèmes de comportements externalisés, les problèmes émotionnels, les problèmes relationnels et les comportements prosociaux, pourraient être utiles à cet égard. De plus, les futures études sont encouragées à inclure dans leur modèle des mesures de cognition sociale, entre autres de théorie de l'esprit (Beaudoin et al., 2020), ce qui permettrait de vérifier des liens anatomo-fonctionnels entre les régions cérébrales composant le cerveau social (Figure 1 de l'introduction de la thèse) et les habiletés socio-cognitives. Bien que l'on saisisse de mieux en mieux l'effet global des relations d'attachement précoces sur le développement humain, il n'en demeure pas moins que les mécanismes impliqués sont multiples, complexes et encore à définir.

Finalement, étant donné que la plupart des enfants évoluent avec des figures d'attachement multiples (Howes & Spieker, 2016), il apparaît essentiel que les études futures se penchent sur la contribution des autres relations d'attachement à la morphologie du cerveau, notamment la relation père-enfant. Les chercheurs s'intéressent de plus en plus à la relation d'attachement père-enfant et à son utilité pour prédire le développement de leur enfant, en complément de la relation mère-enfant. Dans une méta-analyse portant sur le lien entre la relation

d'attachement père-enfant et les problèmes de comportement, Deneault et al. (2021) rapportent trois hypothèses par rapport à la contribution respective des relations mère- et père-enfant aux problèmes de comportement et au développement de l'enfant en général: 1) la relation d'attachement mère-enfant est plus importante; 2) la relation d'attachement père-enfant est plus importante pour certains aspects spécifiques du développement; 3) les deux relations ont une contribution similaire. Les résultats de la méta-analyse de Deneault et al. (2021) indiquent que les relations d'attachement mère- et père-enfant ont une contribution similaire en ce qui a trait aux problèmes de comportements chez l'enfant. Il est donc probable, et tout à fait logique, que les relations d'attachement père-enfant contribuent de manière importante au développement du cerveau des enfants. Il serait intéressant de tester ces hypothèses en lien avec la morphologie cérébrale spécifiquement. Rares sont les études ayant vérifié l'apport distinct du père et de la mère à la morphologie du cerveau et celles qui l'ont fait ont porté sur les comportements parentaux de sensibilité. Kok et al. (2015) ont observé des associations de magnitude similaire entre la morphologie cérébrale des enfants et la sensibilité des deux parents, bien que l'association était non statistiquement significative en ce qui concerne la sensibilité paternelle. D'un autre côté, les résultats d'un autre groupe de recherche indiquent que la sensibilité maternelle et la sensibilité paternelle sont associées à des régions cérébrales différentes chez le nouveau-né. Les associations sont également de directions opposées : une association positive est retrouvée entre la sensibilité maternelle et le volume de matière grise sous-corticale (Sethna et al., 2017), alors qu'une association négative est retrouvée entre la sensibilité paternelle et le volume du cervelet chez les enfants de 3 à 6 mois (Sethna et al., 2019). Il reste ainsi beaucoup à explorer pour mieux comprendre comment le réseau social de l'enfant et les relations d'attachement qu'il y forme contribuent à façonner son cerveau en développement.

4.4. **Retombées scientifiques et cliniques**

L'objectif de cette thèse était de faire émerger de nouvelles données empiriques sur les associations entre la qualité des liens d'attachement parent-enfant et la morphologie cérébrale chez l'enfant, et de contribuer à l'avancement des connaissances de cinq principales façons. Dans un premier temps, de façon théorique, les résultats de la thèse sont cohérents avec l'hypothèse selon laquelle l'association entre la qualité des liens d'attachement tôt dans la vie et la qualité des relations sociales subséquentes pourrait être expliquée par une variable intermédiaire, soit la morphologie cérébrale. Les données méta-analytiques indiquent en effet un lien robuste et durable entre les expériences d'attachement précoces et les relations sociales subséquentes. Les chercheurs du domaine ont suggéré que les études futures devraient se pencher sur l'exploration des processus qui pourraient sous-tendre cette association (Groh et al., 2014). Bien que plusieurs chercheurs aient proposé que la morphologie cérébrale soit une variable intermédiaire de choix pour expliquer cette association (Belsky & de Haan, 2011; Gunnar et al., 2006; Thompson, 2016; Tottenham, 2014), le deuxième article de cette thèse est le premier à fournir des pistes de réponses à cet égard.

Deuxièmement, la thèse tente de créer un point de rencontre entre les domaines des neurosciences et de la psychologie développementale, par l'interprétation des résultats d'analyse de neuroimagerie sous l'angle de la théorie de l'attachement. Nous proposons que les expériences vécues au sein des relations d'attachement parent-enfant tôt dans la vie, telles que la régulation émotionnelle et l'encouragement de l'exploration, puissent façonner le développement du cerveau des enfants. Également, nous trouvons des points de rencontre entre les modèles opérants internes proposés par la théorie de l'attachement et les fonctions cérébrales de certaines régions retrouvées associées à l'attachement, tel que discuté dans le premier article de la thèse.

Troisièmement, d'un point de vue fondamental, cette thèse contribue à l'identification des substrats neuronaux de l'attachement parent-enfant. Dans cette lignée, cette thèse comporte deux études qui sont les premières à investiguer à travers le cerveau en entier les liens entre l'attachement parent-enfant et la morphologie cérébrale (volume de matière grise et épaisseur corticale). La thèse apporte donc de rares données empiriques chez l'enfant au domaine de la neuroscience de l'attachement, qui demeure pour l'instant en grande partie limité à des études utilisant des techniques d'électroencéphalographie et d'IRM fonctionnelle pour documenter les liens entre le style d'attachement amoureux chez l'adulte et l'activité cérébrale durant des tâches expérimentales (Vrtička, 2017).

Quatrièmement, au-delà de l'identification des substrats neuronaux de l'attachement, il nous apparaissait important de vérifier si des variations morphologiques liées à l'attachement précoce avaient un impact dans la vie et le fonctionnement quotidien des enfants, dans ce cas-ci en explorant l'impact des différences morphologiques sur le rejet par les pairs. Comme Belsky et de Haan (2011) l'ont souligné, l'étude du lien entre la qualité de la relation parent-enfant et la morphologie du cerveau est peu pertinente pour la société si l'impact de telles associations sur le fonctionnement de l'enfant dans la vie de tous les jours n'est pas examiné. Les résultats de la thèse indiquent que les enfants qui présentent plus de comportements d'attachement désorganisés dans la petite enfance ont une épaisseur corticale plus élevée dans certaines régions cérébrales (les gyri frontaux moyens et supérieurs bilatéralement, ainsi que le gyrus frontal inférieur, le cortex orbitofrontal et l'insula dans l'hémisphère droit); ces changements morphologiques étant eux-mêmes associés à plus de rejet par les pairs. Une revue systématique de la littérature identifie des programmes cliniques efficaces et basés sur les données probantes pour améliorer les comportements parentaux et promouvoir la sécurité d'attachement (Wright et al., 2017). Ainsi, en mettant en lumière l'effet durable de la sécurité/désorganisation d'attachement sur le

développement des enfants, notamment sur le plan cérébral et social, les résultats de la thèse soulignent l'importance et encouragent les interventions précoces chez les familles à risque de former des liens d'attachement de moindre qualité.

Cinquièmement, sur le plan clinique, l'utilisation de mesures dimensionnelles pour caractériser la qualité des liens d'attachement dans la présente thèse peut encourager les cliniciens à concevoir l'attachement comme un construit dimensionnel dans leur pratique, plutôt que de considérer que les enfants appartiennent à une seule catégorie d'attachement spécifique. Une vision clinique dimensionnelle permet une intervention personnalisée et basée sur les forces de chaque enfant. Par exemple, la vision clinique dimensionnelle, appliquée à l'intervention en attachement parent-enfant, souligne qu'il est important pour le clinicien travaillant auprès d'un enfant présentant des comportements d'attachement insécures ou désorganisés de rester attentif aux comportements d'attachement sécurisant que ce dernier présente et de les renforcer.

En somme, les résultats de cette thèse paraissent prometteurs quant à leur contribution non seulement pour appuyer certaines hypothèses de la théorie de l'attachement et de créer des ponts entre ce domaine et les neurosciences, mais également pour l'identification des substrats neuronaux de l'attachement, et ultimement, pour souligner l'importance des interventions précoces auprès des familles et encourager une vision clinique dimensionnelle de l'attachement.

Chapitre 5 – Bibliographie

- Adolphs, R. (2009). The social brain: Neural basis of social knowledge. *Annual Review of Psychology*, 60, 693–716. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.psych.60.110707.163514>
- Ainsworth, M. D. S. (1967). *Infancy in Uganda: Infant Care and the Growth of Love*. Johns Hopkins Press.
- Ainsworth, M. D. S. (1972). Attachment and dependency: A comparison. Dans J. L. Gewirtz (Dir.), *Attachment and dependency* (p. 97–137). Winston.
- Ainsworth, M. D. S. (1985). Patterns of infant–mother attachment: Antecedents and effects on development. *Bulletin of the New York Academy of Medicine*, 61(9), 771–791.
- Ainsworth, M. D. S., Blehar, M., Waters, E. et Wall, S. (1978). *Patterns of attachment: A psychological study of the Strange Situation*. Erlbaum.
- Banissy, M. J., Kanai, R., Walsh, V. et Rees, G. (2012). Inter-individual differences in empathy are reflected in human brain structure. *NeuroImage*, 62(3), 2034–2039.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.05.081>
- Beaudoin, C. et Beauchamp, M. H. (2020). Social cognition. Dans A. Gallagher, C. Bulteau, D. Cohen et J.L. Michaud (dir.), *Handbook of Clinical Neurology* (p. 255-264). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64150-2.00022-8>
- Beaudoin, C., Leblanc, É., Gagner, C. et Beauchamp, M. H. (2020). Systematic review and inventory of theory of mind measures for young children. *Frontiers in Psychology*, 10, 2905. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02905>
- Belsky, J. et de Haan, M. (2011). Annual research review: Parenting and children’s brain development: The end of the beginning. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 52(4), 409–428. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-7610.2010.02281.x>

- Bernard, K. et Dozier, M. (2010). Examining infants' cortisol responses to laboratory tasks among children varying in attachment disorganization: Stress reactivity or return to baseline? *Developmental Psychology*, 46(6), 1771–1778.
<http://dx.doi.org/10.1037/a0020660>
- Bernier, A., Dégeilh, F., Leblanc, É., Daneault, V., Bailey, H. N. et Beauchamp, M. H. (2019). Mother-infant interaction and child brain morphology: A multidimensional approach to maternal sensitivity. *Infancy*, 24(2), 120–138. <https://doi.org/10.1111/infa.12270>
- Bernier, A., Matte-Gagné, C., Bélanger, M. E. et Whipple, N. (2014). Taking stock of two decades of attachment transmission gap: Broadening the assessment of maternal behavior. *Child Development*, 85(5), 1852–1865. <http://dx.doi.org/10.1111/cdev.12236>
- Bickart, K. C., Dickerson, B. C. et Barrett, L. F. (2014). The amygdala as a hub in brain networks that support social life. *Neuropsychologia*, 63, 235–248.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.08.013>
- Bigler E. D. (2015). Structural Image Analysis of the Brain in Neuropsychology Using Magnetic Resonance Imaging (MRI) Techniques. *Neuropsychology Review*, 25(3), 224–249.
<https://doi.org/10.1007/s11065-015-9290-0>
- Bokhorst, C. L., Bakermans-Kranenburg, M. J., Fearon, R. P., Van IJzendoorn, M. H., Fonagy, P. et Schuengel, C. (2003). The importance of shared environment in mother–infant attachment security: A behavioral genetic study. *Child Development*, 74(6), 1769–1782.
- Bowlby, J. (1973). *Attachment and loss: Vol. 2. Separation: Anxiety and anger*. Basic Books.
- Bowlby, J. (1980a). *Attachment and loss: Vol. 3. Loss: Sadness and depression*. Basic Books.
- Bowlby, J. (1982). *Attachment and loss: Vol. 1. Attachment*. Basic Books. (Ouvrage original publié en 1969)

- Blakemore, S. J. (2008). The social brain in adolescence. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(4), 267–277. <http://dx.doi.org/10.1038/nrn2353>
- Botvinik-Nezer, R., Holzmeister, F., Camerer, C. F., Dreber, A., Huber, J., Johannesson, M., Kirchler, M., Iwanir, R., Mumford, J. A., Adcock, R. A., Avesani, P., Baczkowski, B. M., Bajracharya, A., Bakst, L., Ball, S., Barilari, M., Bault, N., Beaton, D., Beitner, J., ... Schonberg, T. (2020). Variability in the analysis of a single neuroimaging dataset by many teams. *Nature*, 582, 84–88. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2314-9>
- Bretherton, I. et Munholland, K. A. (2016). The internal working model construct in light of contemporary neuroimaging research. Dans J. Cassidy et P. R. Shaver (dir.), *Handbook of Attachment: Theory, Research, and Clinical Applications* (3^{ième} éd., p. 102–127). Guilford Press.
- Brothers, L., Ring, B. et Kling, A. (1990). Response of neurons in the macaque amygdala to complex social stimuli. *Behavioural Brain Research*, 41, 199–213. [http://dx.doi.org/10.1016/0166-4328\(90\)90108-Q](http://dx.doi.org/10.1016/0166-4328(90)90108-Q)
- Buhle, J. T., Silvers, J. A., Wager, T. D., Lopez, R., Onyemekwu, C., Kober, H., Weber, J. et Ochsner, K. N. (2014). Cognitive reappraisal of emotion: A meta-analysis of human neuroimaging studies. *Cerebral Cortex*, 24(11), 2981–2990. <http://dx.doi.org/10.1093/cercor/bht154>
- Cadman, T., Diamond, P. R. et Fearon, P. (2017). Reassessing the validity of the attachment Q-sort: An updated meta-analysis. *Infant and Child Development*, e2034. <http://dx.doi.org/10.1002/icd.2034>
- Carlson, E. A. (1998). A prospective longitudinal study of attachment disorganization/disorientation. *Child Development*, 69(4), 1107–1128. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.1998.tb06163.x>

- Cassidy, J. (2016). The nature of child's tie. Dans J. Cassidy et P. R. Shaver (dir.), *Handbook of attachment: Theory, research, and clinical applications* (3^{ième} éd., p. 3–24). Guilford Press.
- Chand, G. B., Wu, J., Hajjar, I. et Qiu, D. (2017). Interactions of the salience network and its subsystems with the default-mode and the central-executive networks in normal aging and mild cognitive impairment. *Brain Connectivity*, 7(7), 401–412.
<https://doi.org/10.1089/brain.2017.0509>
- Chenn, A. et Walsh, C. A. (2002). Regulation of cerebral cortical size by control of cell cycle exit in neural precursors. *Science*, 297(5580), 365–369.
<https://doi.org/10.1126/science.1074192>
- Cooke, J. E., Kochendorfer, L. B., Stuart-Parrigon, K. L., Koehn, A. J. et Kerns, K. A. (2019). Parent–child attachment and children's experience and regulation of emotion: A meta-analytic review. *Emotion*, 19(6), 1103–1126. <https://doi.org/10.1037/emo0000504>
- Cooke, J. E., Stuart-Parrigon, K. L., Movahed-Abtahi, M., Koehn, A. J. et Kerns, K. A. (2016). Children's emotion understanding and mother–child attachment: A meta-analysis. *Emotion*, 16(8), 1102–1106. <https://doi.org/10.1037/emo0000221>
- Cortes Hidalgo, A. P., Muetzel, R., Luijk, M. P. C. M., Bakermans-Kranenburg, M. J., El Marroun, H., Vernooij, M. W., van IJzendoorn, M. H., White, T. et Tiemeier, H. (2019). Observed infant-parent attachment and brain morphology in middle childhood – A population-based study. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 40, 100724.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.dcn.2019.100724>
- Cortes Hidalgo, A. P., Thijssen, S., Delaney, S. W., Vernooij, M. W., Jansen, P. W., Bakermans-Kranenburg, M. J., van IJzendoorn, M. H., White, T. et Tiemeier, H. (2021). Harsh

- parenting and child brain morphology: A population-based study. *Child Maltreatment*,
Sous presse. <https://doi.org/10.1177/1077559520986856>
- Couture, S. M., Penn, D. L. et Roberts, D. L. (2006). The functional significance of social
cognition in schizophrenia: a review. *Schizophrenia Bulletin*, 32(suppl. 1), S44–S63.
<https://doi.org/10.1093/schbul/sbl029>
- Cutuli, D. (2014). Cognitive reappraisal and expressive suppression strategies role in the emotion
regulation: An overview on their modulatory effects and neural correlates. *Frontiers in
Systems Neuroscience*, 8, 175. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2014.00175>
- Deklyen, M. et Greenberg, M. T. (2016). Attachment and psychopathology in childhood. Dans J.
Cassidy et P. R. Shaver (dir.), *Handbook of Attachment: Theory, Research, and Clinical
Applications* (3^{ième} éd., p. 639–666). Guilford Press.
- Deneault, A. A., Bakermans-Kranenburg, M. J., Groh, A. M., Fearon, P. R. et Madigan, S.
(2021). Child-father attachment in early childhood and behavior problems: A meta-
analysis. *New Directions for Child and Adolescent Development*. Sous presse.
<https://doi.org/10.1002/cad.20434>
- De Wolff, M. S. et Van IJzendoorn, M. H. (1997). Sensitivity and attachment: A meta-analysis
on parental antecedents of infant attachment. *Child Development*, 68(4), 571–591.
- Fearon, R. P., Bakermans-Kranenburg, M. J., Van IJzendoorn, M. H., Lapsley, A. M. et Roisman,
G. I. (2010). The significance of insecure attachment and disorganization in the
development of children's externalizing behavior: A meta-analytic study. *Child
Development*, 81(2), 435–456. <http://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2009.01405.x>
- Fearon, R. P. et Belsky, J. (2016). Precursors of attachment security. Dans J. Cassidy et P. R.
Shaver (dir.), *Handbook of Attachment: Theory, Research, and Clinical Applications*
(3^{ième} éd., p. 291–313). Guilford Press.

- Frank, D. W., Dewitt, M., Hudgens-Haney, M., Schaeffer, D. J., Ball, B. H., Schwarz, N. F., Hussein, A. A., Smart, L. M., Sabatinelli, D. (2014). Emotion regulation: Quantitative meta-analysis of functional activation and deactivation. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 45, 202–211. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.06.010>
- Frith, C. D. (2007). The social brain? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 362(1480), 671–678. <https://doi.org/10.1098/rstb.2006.2003>
- Frith, C. D. et Frith, U. (2006). The neural basis of mentalizing. *Neuron*, 50, 531–534. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuron.2006.05.001>
- Fujiwara, H., Hirao, K., Namiki, C., Yamada, M., Shimizu, M., Fukuyama, H., Hayashi, T. et Murai, T. (2007). Anterior cingulate pathology and social cognition in schizophrenia: A study of gray matter, white matter and sulcal morphometry. *NeuroImage*, 36(4), 1236–1245. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.03.068>
- Giedd, J. N., Blumenthal, J., Jeffries, N. O., Castellanos, F. X., Liu, H., Zijdenbos, A., Paus, T., Evans, A. C. et Rapoport, J. L. (1999). Brain development during childhood and adolescence: A longitudinal MRI study. *Nature Neuroscience*, 2(10), 861–863. <https://doi.org/10.1038/13158>
- Goodman, R. (2001). Psychometric properties of the strengths and difficulties questionnaire. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 40(11), 1337–1345. <https://doi.org/10.1038/13158>
- Greenough, W. T., Black, J. E. et Wallace, C. S. (1987). Experience and brain development. *Child Development*, 58(3), 539–559.
- Groh, A. M., Fearon, R. P., Bakermans-Kranenburg, M. J., van IJzendoorn, M. H., Steele, R. D. et Roisman, G. I. (2014). The significance of attachment security for children's social

- competence with peers: A meta-analytic study. *Attachment & Human Development*, 16(2), 103–136. <http://dx.doi.org/10.1080/14616734.2014.883636>
- Groh, A. M., Narayan, A. J., Bakermans-Kranenburg, M. J., Roisman, G. I., Vaughn, B. E., Fearon, R. P. et van IJzendoorn, M. H. (2017). Attachment and temperament in the early life course: A meta-analytic review. *Child Development*, 88(3), 770–795. <https://doi.org/10.1111/cdev.12677>
- Groh, A. M., Roisman, G. I., Van IJzendoorn, M. H., Bakermans-Kranenburg, M. J. et Fearon, R. P. (2012). The significance of insecure and disorganized attachment for children's internalizing symptoms: A meta-analytic study. *Child Development*, 83(2), 591–610. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2011.01711.x>
- Gunnar, M. R., Fisher, P. A. et Early Experience Stress and Prevention Science Network (2006). Bringing basic research on early experience and stress neurobiology to bear on preventive interventions for neglected and maltreated children. *Development and Psychopathology*, 18(3), 651–677. <https://dx.doi.org/10.1017/S0954579406060330>
- Harlow, H. F. (1958). The nature of love. *American Psychologist*, 13, 673–685.
- Henrich, J., Heine, S. J. et Norenzayan, A. (2010). The weirdest people in the world? *Behavioral & Brain Sciences*, 33(2-3), 61–83. <https://doi.org/10.1017/S0140525X0999152X>
- Hesse, E. et Main, M. (2000). Disorganized infant, child, and adult attachment: Collapse in behavioral and attentional strategies. *Journal of the American Psychoanalytic Association*, 48(4), 1097–1127. <https://doi.org/10.1177/00030651000480041101>
- Hooker, C. I., Bruce, L., Lincoln, S. H., Fisher, M. et Vinogradov, S. (2011). Theory of mind skills are related to gray matter volume in the ventromedial prefrontal cortex in schizophrenia. *Biological Psychiatry*, 70(12), 1169–1178. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2011.07.027>

- Howes, C. et Spieker, S. (2016). Attachment relationships in the context of multiple caregivers. Dans J. Cassidy et P. R. Shaver (dir.), *Handbook of attachment: Theory, research, and clinical applications* (3rd éd., p. 314–329). Guilford Press.
- Huber, A., McMahon, C. A. et Sweller, N. (2015a). Efficacy of the 20-week circle of security intervention: Changes in caregiver reflective functioning, representations, and child attachment in an Australian clinical sample. *Infant Mental Health Journal*, 36(6), 556–574. <http://dx.doi.org/10.1002/imhj.21540>
- Huber, A., McMahon, C. A. et Sweller, N. (2015b). Improved child behavioural and emotional functioning after circle of security 20-week intervention. *Attachment & Human Development*, 17(6), 547–569. <http://dx.doi.org/10.1080/14616734.2015.1086395>
- Ilyka, D., Johnson, M. H. et Lloyd-Fox, S. (2021). Infant social interactions and brain development: A systematic review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 130, 448–469. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.09.001>
- Jha, S. C., Xia, K., Ahn, M., Girault, J. B., Li, G., Wang, L., Shen, D., Zou, F., Zhu, H., Styner, M., Gilmore, J. H. et Knickmeyer, R. C. (2019). Environmental influences on infant cortical thickness and surface area. *Cerebral Cortex*, 29(3), 1139–1149. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhy020>
- Jha, S. C., Xia, K., Schmitt, J. E., Ahn, M., Girault, J. B., Murphy, V. A., Li, G., Wang, L., Shen, D., Zhu, H., Stuner, M., Knickmeyer, R.C. et Gilmore, J. H. (2018). Genetic influences on neonatal cortical thickness and surface area. *Human brain mapping*, 39(12), 4998–5013. <https://doi.org/10.1002/hbm.24340>
- Kaltwasser, L., Hildebrandt, A., Wilhelm, O. et Sommer, W. (2017). On the relationship of emotional abilities and prosocial behavior. *Evolution and Human Behavior*, 38(3), 298–308. <https://doi.org/10.1016/j.evolhumbehav.2016.10.011>

- Keller, H. (2018). Universality claim of attachment theory: Children's socioemotional development across cultures. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(45), 11414-11419. <https://doi.org/10.1073/pnas.1720325115>
- Khoury, J. E., Pechtel, P. , Andersen, C. M. , Teicher, M. H. et Lyons-Ruth, K. (2019). Relations among maternal withdrawal in infancy, borderline features, suicidality/self-injury, and adult hippocampal volume: A 30-year longitudinal study. *Behavioural Brain Research*, 374, 1121397. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2019.112139>
- Kochanska, G., Barry, R. A., Stellern, S. A. et O'Bleness, J. J. (2009). Early attachment organization moderates the parent-child mutually coercive pathway to children's antisocial conduct. *Child Development*, 80(4), 1288-1300.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8624.2009.01332.x>
- Kok, R., Prinzie, P., Bakermans-Kranenburg, M. J., Verhulst, F. C., White, T., Tiemeier, H. et van IJzendoorn, M. H. (2017). Socialization of prosocial behavior: Gender differences in the mediating role of child brain volume. *Child Neuropsychology*, 24(6), 723-733.
<http://dx.doi.org/10.1080/09297049.2017.1338340>
- Kok, R., Thijssen, S., Bakermans-Kranenburg, M. J., Jaddoe, V. W., Verhulst, F. C., White, T., van IJzendoorn, M. H. et Tiemeier, H. (2015). Normal variation in early parental sensitivity predicts child structural brain development. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 54(10), 824-831.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jaac.2015.07.009>
- Kolb, B. et Gibb, R. (2014). Searching for the principles of brain plasticity and behavior. *Cortex*, 58, 251-260. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2013.11.012>

- Kanai, R., Bahrami, B., Roylance, R. et Rees, G. (2012). Online social network size is reflected in human brain structure. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1732), 1327–1334. <https://doi.org/10.1098/rspb.2011.1959>
- Kwak, S., Joo, W. T., Youm, Y. et Chey, J. (2018). Social brain volume is associated with in-degree social network size among older adults. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285(1871), 20172708. <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.2708>
- LaBar, K. S. et Cabeza, R. (2006). Cognitive neuroscience of emotional memory. *Nature Reviews Neuroscience*, 7(1), 54–64. <https://doi.org/10.1038/nrn1825>
- Lamblin, M., Murawski, C., Whittle, S., & Fornito, A. (2017). Social connectedness, mental health and the adolescent brain. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 80, 57–68. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.05.010>
- Lee, A., Poh, J. S., Wen, D. J., Tan, H. M., Chong, Y. S., Tan, K. H., Gluckman, P. D., Fortier, M. V., Rifkin-Graboi, A. et Qiu, A. (2019). Maternal care in infancy and the course of limbic development. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 40, 100714. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2019.100714>
- Lemaitre, H., Goldman, A. L., Sambataro, F., Verchinski, B. A., Meyer-Lindenberg, A., Weinberger, D. R. et Mattay, V. S. (2012). Normal age-related brain morphometric changes: nonuniformity across cortical thickness, surface area and gray matter volume? *Neurobiology of Aging*, 33(3), 617.e1–617.e19. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2010.07.013>
- Lévesque, M. L., Fahim, C., Ismaylova, E., Verner, M. P., Casey, K. F., Vitaro, F., Dionne, G., Boivin, M., Tremblay, R. E. et Booij, L. (2015). The impact of the in utero and early postnatal environments on grey and white matter volume: A study with adolescent

monozygotic twins. *Developmental Neuroscience*, 37, 489–496.

<https://doi.org/10.1159/000430982>

LeWinn, K. Z., Sheridan, M. A., Keyes, K. M., Hamilton, A. et McLaughlin, K. A.

(2017). Sample composition alters associations between age and brain structure. *Nature Communications*, 8, 874. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00908-7>

Lin, A., Ching, C. R., Vajdi, A., Sun, D., Jonas, R. K., Jalbrzikowski, M., Kushan-Wells, L., Hansen, L. P., Krikorian, E., Gutman, B., Dokoru, D., Hellement, G., Thompson, P. M. et Bearden, C. E. (2017). Mapping 22q11. 2 gene dosage effects on brain morphometry. *Journal of Neuroscience*, 37(26), 6183–6199.

<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3759-16.2017>

Liu, X., Liu, S., Huang, R., Chen, X., Xie, Y., Ma, R., Luo, Y., Bu, J. et Zhang, X. (2018).

Neuroimaging studies reveal the subtle difference among social network size measurements and shed light on new directions. *Frontiers in Neuroscience*, 12, 461.

<https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00461>

Luby, J. L., Barch, D. M., Belden, A., Gaffrey, M. S., Tillman, R., Babb, C., Nishino, T., Suzuki,

H. et Botteron, K. N. (2012). Maternal support in early childhood predicts larger hippocampal volumes at school age. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(8), 2854–2859. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1118003109>

Luby, J. L., Belden, A., Harms, M. P., Tillman, R. et Barch, D. M. (2016). Preschool is a

sensitive period for the influence of maternal support on the trajectory of hippocampal development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(20), 5742–5747.

<https://doi.org/10.1073/pnas.1601443113>

- Lucassen, N., Tharner, A., Van IJzendoorn, M. H., Bakermans-Kranenburg, M. J., Volling, B. L., Verhulst, F. C., Lambregtse-Van den Berg, M. P. et Tiemeier, H. (2011). The association between paternal sensitivity and infant–father attachment security: A meta-analysis of three decades of research. *Journal of Family Psychology*, 25(6), 986–992. <https://doi.org/10.1037/a0025855>
- Lyons-Ruth, K. et Joacobvitz, D. (2016). Attachment disorganization from infancy to adulthood: Neurobiological correlates, parenting contexts, and pathways to disorder. Dans J. Cassidy et P. R. Shaver (dir.), *Handbook of Attachment: Theory, Research, and Clinical Applications* (3^{ième} éd., p. 667–695). Guilford Press.
- Lyons-Ruth, K., Pechtel, P., Yoon, S. A., Anderson, C. M. et Teicher, M. H. (2016). Disorganized attachment in infancy predicts greater amygdala volume in adulthood. *Behavioural Brain Research*, 308, 83–93. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2016.03.050>
- Maat, A., van Haren, N. E., Bartholomeusz, C. F., Kahn, R. S. et Cahn, W. (2016). Emotion recognition and theory of mind are related to gray matter volume of the prefrontal cortex in schizophrenia. *European Neuropsychopharmacology*, 26(2), 255–264. <https://doi.org/10.1016/j.euroneuro.2015.12.013>
- Mackes, N. K., Golm, D., Sarkar, S., Kumsta, R., Rutter, M., Fairchild, G., Mehta, M. A., Sonuga-Barke, E. J. S. et ERA Young Adult Follow-up team. (2020). Early childhood deprivation is associated with alterations in adult brain structure despite subsequent environmental enrichment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(1), 641–649. <https://doi.org/10.1073/pnas.1911264116>
- Madigan, S., Atkinson, L., Laurin, K. et Benoit, D. (2013). Attachment and internalizing behavior in early childhood: A meta-analysis. *Developmental Psychology*, 49(4), 672–689. <https://doi.org/10.1037/a0028793>

- Main, M. et Solomon, J. (1986). Discovery of a new, insecure-disorganized/disoriented attachment pattern. Dans M. Yogman et T. B. Brazelton (dir.), *Affective development in infancy* (p. 95–124). Ablex.
- May, A. (2011). Experience-dependent structural plasticity in the adult human brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(10), 475–482. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.08.002>
- Meaney, M. J. (2001). Maternal care, gene expression, and the transmission of individual differences in stress reactivity across generations. *Annual Review of Neuroscience*, 24, 1161–1192. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.24.1.1161>
- Mills, K. L., Lalonde, F., Clasen, L. S., Giedd, J. N. et Blakemore, S. J. (2014). Developmental changes in the structure of the social brain in late childhood and adolescence. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 9(1), 123–131. <https://doi.org/10.1093/scan/nss113>
- Mosconi, M. W., Cody-Hazlett, H., Poe, M. D., Gerig, G., Gimpel-Smith, R. et Piven, J. (2009). Longitudinal study of amygdala volume and joint attention in 2-to 4-year-old children with autism. *Archives of General Psychiatry*, 66(5), 509–516. <https://doi.org/10.1001/archgenpsychiatry.2009.19>
- Moutsiana, C., Johnstone, T., Murray, L., Fearon, R. P., Cooper, P. J., Pliatsikas, C., Goodyer, I. et Halligan, S. L. (2015). Insecure attachment during infancy predicts greater amygdala volumes in early adulthood. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 56(10), 540–548. <http://dx.doi.org/10.1111/jcp.12317>
- Nelson, C. (2014). Early institutionalization and brain development. Dans C. Nelson (Dir.), *Romania's Abandoned Children: Deprivation, Brain Development, and the Struggle for Recovery*. Harvard University Press. <https://doi.org/10.4159/harvard.9780674726079>
- Nolvi, S., Rasmussen, J. M., Graham, A. M., Gilmore, J. H., Styner, M., Fair, D. A., Entringer, S., Wadhwa, P. D. et Buss, C. (2020). Neonatal brain volume as a marker of differential

susceptibility to parenting quality and its association with neurodevelopment across early childhood. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 45, 100826.

<https://doi.org/10.1016/j.dcn.2020.100826>

O'Connor, T. G. et Croft, C. M. (2001). A twin study of attachment in preschool children. *Child Development*, 72(5), 1501–1511. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00362>

Ohta, H., Nordahl, C. W., Iosif, A. M., Lee, A., Rogers, S. et Amaral, D. G. (2016). Increased surface area, but not cortical thickness, in a subset of young boys with autism spectrum disorder. *Autism Research*, 9(2), 232–248. <https://doi.org/10.1002/aur.1520>

Pallini, S., Baiocco, R., Schneider, B. H., Madigan, S. et Atkinson, L. (2014). Early child-parent attachment and peer relations: A meta-analysis of recent research. *Journal of Family Psychology*, 28(1), 118–123. <http://doi.org/10.1037/a0035736>

Pallini, S., Chirumbolo, A., Morelli, M., Baiocco, R., Laghi, F. et Eisenberg, N. (2018). The relation of attachment security status to effortful self-regulation: A meta-analysis. *Psychological Bulletin*, 144(5), 501–531. <http://dx.doi.org/10.1037/bul0000134>

Panizzon, M. S., Fennema-Notestine, C., Eyler, L. T., Jernigan, T. L., Prom-Wormley, E., Neale, M., Jacobson, K., Lyons, M. J., Grant, M. D., Franz, C. E., Xian, H., Tsuang, T., Fischl, B., Seidman, L., Dale, A. et Kremen, W. S. (2009). Distinct genetic influences on cortical surface area and cortical thickness. *Cerebral Cortex*, 19(11), 2728–2735.
<https://doi.org/10.1093/cercor/bhp026>

Pederson, D. R. et Moran, G. (1995). A categorical description of infant-mother relationships in the home and its relation to Q-sort measures of infant-mother interaction. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 60(2-3), 111–132.

Pena, C. J., Neugut, Y. D., Calarco, C. A. et Champagne, F. A. (2014). Effects of maternal care on the development of midbrain dopamine pathways and reward-directed behavior in

female offspring. *European Journal of Neuroscience*, 39(6), 946–956.

<http://dx.doi.org/10.1111/ejn.12479>

Porcelli, S., Van Der Wee, N., van der Werff, S., Aghajani, M., Glennon, J. C., van Heukelum, S., Mogavero, F., Lobo, A., Olivera, F. J., Lobo, E., Posadas, M., Dukart, J., Kozak, R., Arce, E., Ikram, A., Vorstman, J., Bilderbeck, A., Saris, I., Kas, M. J. et Serretti, A.

(2019). Social brain, social dysfunction and social withdrawal. *Neuroscience &*

Biobehavioral Reviews, 97, 10–33. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2018.09.012>

Powell, J. L., Kemp, G. J., Dunbar, R. I., Roberts, N., Sluming, V. et García-Fiñana, M. (2014).

Different association between intentionality competence and prefrontal volume in left- and right-handers. *Cortex*, 54, 63–76. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cortex.2014.02.010>

Rice, K., Viscomi, B., Riggins, T. et Redcay, E. (2014). Amygdala volume linked to individual

differences in mental state inference in early childhood and adulthood. *Developmental*

Cognitive Neuroscience, 8, 153–163. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2013.09.003>

Rifkin-Graboi, A., Kong, L., Sim, L. W., Sanmugam, S., Broekman, B. F., Chen, H., Wong, E.,

Kwek, K., Saw, S.-M., Chong, Y.-S., Gluckman, P. D., Fortier, M. V., Pederson, D.,

Meaney, M. J. et Qiu, A. (2015). Maternal sensitivity, infant limbic structure volume and functional connectivity: A preliminary study. *Translational Psychiatry*, 5, e668.

<http://dx.doi.org/10.1038/tp.2015.133>

Rifkin-Graboi, A., Tan, H.M., Shaun, G.K., Sim, L.W., Sanmugam, S., Chong, Y.S., Tan, K. H.,

Shek, L., Gluckman, P.D., Chen, H., Fortier, M., Meaney, M. et Qiu, A. (2019). An initial investigation of neonatal neuroanatomy, caregiving, and levels of disorganized behavior.

Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America,

116(34), 16787–16792. <https://doi.org/10.1073/pnas.1900362116>.

- Rilling, J. K. et Young, L. J. (2014). The biology of mammalian parenting and its effect on offspring social development. *Science*, 345, 771–776.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1252723>
- Roisman, G. I. et Fraley, R. C. (2008). A behavior–genetic study of parenting quality, infant attachment security, and their covariation in a nationally representative sample. *Developmental Psychology*, 44(3), 831–839. <http://dx.doi.org/10.1037/0012-1649.44.3.831>
- Röll, J., Koglin, U. et Petermann, F. (2012). Emotion regulation and childhood aggression: Longitudinal associations. *Child Psychiatry & Human Development*, 43(6), 909–923.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10578-012-0303-4>
- Rokita, K. I., Holleran, L., Dauvermann, M. R., Mothersill, D., Holland, J., Costello, L., Kane, R., McKernan, D., Morris, D. W., Kelly, J. P., Corvin, A., Hallahan, B., McDonald, C. et Donohoe, G. (2020). Childhood trauma, brain structure and emotion recognition in patients with schizophrenia and healthy participants. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 15(12), 1325–1339. <https://doi.org/10.1093/scan/nsaa160>
- Rothbaum, F., Weisz, J., Pott, M., Miyake, K. et Morelli, G. (2000). Attachment and culture: Security in the United States and Japan. *American Psychologist*, 55(10), 1093–1104. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.55.10.1093>
- Schieche, M. et Spangler, G. (2005). Individual differences in biobehavioral organization during problem-solving in toddlers: The influence of maternal behavior, infant-mother attachment, and behavioral inhibition on the attachment-exploration balance. *Developmental Psychobiology*, 46(4), 293–306. <http://dx.doi.org/10.1002/dev.20065>
- Sethna, V., Pote, I., Wang, S., Gudbrandsen, M., Blasi, A., McCusker, C., Daly, E., Perry, E., Adams, K. P. H., Kuklisova-Murgasova, M., Busuulwa, P., Lloyd-Fox, S., Murray, L.,

- Johnson, M. H., Williams, S. C. R., Murphy, D. G. M., Craig, M. C. et McAlonan, G. M. (2017). Mother-infant interactions and regional brain volumes in infancy: An MRI study. *Brain Structure and Function*, 222(5), 2379–2388. <http://dx.doi.org/10.1007/s00429-016-1347-1>
- Sethna, V., Siew, J., Pote, I., Wang, S., Gudbrandsen, M., Lee, C., Perry, E., Adams, K. P. H., Watson, C., Kangas, J., Stoencheva, V., Daly, E., Kuklisova-Murgasova, M., Williams, S. C. R., Craig, M. C., Murphy, D. G. M. et McAlonan, G. M. (2019). Father-infant interactions and infant regional brain volumes: A cross-sectional MRI study. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 40, 100721
<https://doi.org/10.1016/j.dcn.2019.100721>
- Shaw, P., Gilliam, M., Liverpool, M., Weddle, C., Malek, M., Sharp, W., Greenstein, D., Evans, A., Rapoport, J. et Giedd, J. (2011). Cortical development in typically developing children with symptoms of hyperactivity and impulsivity: support for a dimensional view of attention deficit hyperactivity disorder. *American Journal of Psychiatry*, 168(2), 143–151. <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.2010.10030385>
- Shdo, S. M., Ranasinghe, K. G., Gola, K. A., Mielke, C. J., Sukhanov, P. V., Miller, B. L. et Rankin, K. P. (2018). Deconstructing empathy: Neuroanatomical dissociations between affect sharing and prosocial motivation using a patient lesion model. *Neuropsychologia*, 116(Pt A), 126–135. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.02.010>
- Simonelli, A., De Palo, F., Parolin, M. et Moretti, M. (2014). Interactive behaviors and attachment patterns in the strange situation procedure: A validation of the Ainsworth model. *Psychology and Behavioral Sciences*, 3, 75–84.
<https://doi.org/10.11648/j.pbs.20140302.17>

- Sroufe, L. A. (2016). The place of attachment in development. Dans J. Cassidy et P. R. Shaver (dir.), *Handbook of Attachment: Theory, Research, and Clinical Applications* (3^{ième} éd., p. 997–1011). Guilford Press.
- Tamnes, C. K., Herting, M. M., Goddings, A. L., Meuwese, R., Blakemore, S. J., Dahl, R. E., Güroglu, B., Raznahan, A., Sowell, E. R., Crone, E. A. et Mills, K. L. (2017). Development of the cerebral cortex across adolescence: a multisample study of inter-related longitudinal changes in cortical volume, surface area, and thickness. *Journal of Neuroscience*, 37(12), 3402-3412. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3302-16.2017>
- Teicher, M. H. et Samson, J. A. (2016). Annual research review: enduring neurobiological effects of childhood abuse and neglect. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 57(3), 241–266. <https://doi.org/10.1111/jcp.12507>
- Tharner, A., Herba, C. M., Luijk, M. P., van Ijzendoorn, M. H., Bakermans-Kranenburg, M. J., Govaert, P. P., Roza, S. J., Jaddoe, V. W., Hofman, A., Verhulst, F. C. et Tiemeier, H. (2011). Subcortical structures and the neurobiology of infant attachment disorganization: a longitudinal ultrasound imaging study. *Social Neuroscience*, 6(4), 336–347. <https://doi.org/10.1080/17470919.2010.538219>.
- Teicher, M. H. et Samson, J. A. (2016). Annual research review: Enduring neurobiological effects of childhood abuse and neglect. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 57, 241–266. <https://doi.org/10.1111/jcpp.12507>
- Thompson, R. A. (1988). Introduction. Dans Thompson, R. A. (dir.), *Socioemotional Development* (p. ix–xv). University of Nebraska Press.

- Thompson, R. A. (2016). Early attachment and later development: Reframing the questions. Dans J. Cassidy et P. R. Shaver (dir.), *Handbook of Attachment: Theory, Research, and Clinical Applications* (3^{ième} éd., p. 330–348). Guilford Press.
- Tottenham, N. (2012). Human amygdala development in the absence of species-expected caregiving. *Developmental Psychobiology*, 54(6), 598–611.
<https://doi.org/10.1002/dev.20531>
- Tottenham, N. (2014). The importance of early experiences for neuro-affective development. *Current Topics in Behavioral Neuroscience*, 16, 109–129.
https://dx.doi.org/10.1007/7854_2013_254
- Tymofiyeva, O. et Gaschler, R. (2021). Training-induced neural plasticity in youth: A systematic review of structural and functional MRI studies. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14, 497245. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.497245>
- van IJzendoorn, M. H., Schuengel, C. et Bakermans-Kranenburg, M. J. (1999). Disorganized attachment in early childhood: Meta-analysis of precursors, concomitants, and sequelae. *Development and Psychopathology*, 11(2), 225–249.
- van IJzendoorn, M. H., Vereijken, C. M. J. L., Bakermans-Kranenburg, M. J. et Riksen-Walraven, J. M. (2004). Assessing attachment security with the Attachment Q-sort: Meta-analytic evidence for the validity of the observer AQS. *Child Development*, 75(4), 1188–1213. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8624.2004.00733.x>
- Verhage, M. L., Schuengel, C., Madigan, S., Fearon, R. M. P., Oosterman, M., Cassibba, R., Bakermans-Kranenburg, M. J. et van IJzendoorn, M. H. (2016). Narrowing the transmission gap: A synthesis of three decades of research on intergenerational transmission of attachment. *Psychological Bulletin*, 142(4), 337–366.
<http://dx.doi.org/10.1037/bul0000038>

- Vijayakumar, N., Mills, K. L., Alexander-Bloch, A., Tamnes, C. K. et Whittle, S. (2018). Structural brain development: A review of methodological approaches and best practices. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 33, 129–148. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.11.008>
- Vrtička P. (2017) The Social Neuroscience of Attachment. Dans A. Ibáñez, L. Sedeño et A. García (dir.) *Neuroscience and Social Science*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68421-5_5
- Wallace, G. L., White, S. F., Robustelli, B., Sinclair, S., Hwang, S., Martin, A. et Blair, J. R. (2014). Cortical and subcortical abnormalities in youths with conduct disorder and elevated callous-unemotional traits. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 53(4), 456–465. <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2013.12.008>
- Walhovd, K. B., Fjell, A. M., Giedd, J., Dale, A. M. et Brown, T. T. (2016). Through thick and thin: a need to reconcile contradictory results on trajectories in human cortical development. *Cerebral Cortex*, 27(2), bhv301. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhv301>
- Waters, E. et Deane, K. E. (1985). Defining and assessing individual differences in attachment behavior: Q-methodology and the organization of behavior in infancy and early childhood. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 50(1), 41–65. <https://doi.org/10.2307/3333826>
- Whipple, N., Bernier, A. et Mageau, G. A. (2011). Broadening the study of infant security of attachment: Maternal autonomy-support in the context of infant exploration. *Social Development*, 20(1), 17–32. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9507.2010.00574.x>
- Whittle, S., Simmons, J. G., Dennison, M., Vijayakumar, N., Schwartz, O., Yap, M. B., Sheeber, L. et Allen, N. B. (2014). Positive parenting predicts the development of adolescent brain

- structure: A longitudinal study. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 8, 7–17.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.dcn.2013.10.006>
- Whittle, S., Vijayakumar, N., Dennison, M., Schwartz, O., Simmons, J. G., Sheeber, L. et Allen, N. B. (2016). Observed measures of negative parenting predict brain development during adolescence. *PLoS One*, 11(1), e0147774. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0147774>
- Wierenga, L. M., Langen, M., Oranje, B. et Durston, S. (2014). Unique developmental trajectories of cortical thickness and surface area. *NeuroImage*, 87, 120–126.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.11.010>
- Wiesmann, C. G., Friederici, A. D., Singer, T. et Steinbeis, N. (2020). Two systems for thinking about others' thoughts in the developing brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(12), 6928-6935. <https://doi.org/10.1073/pnas.1916725117>
- Winkler, A. M., Kochunov, P., Blangero, J., Almasy, L., Zilles, K., Fox, P. T., Duggirala, R. et Glahn, D. C. (2010). Cortical thickness or grey matter volume? The importance of selecting the phenotype for imaging genetics studies. *NeuroImage*, 53(3), 1135–1146.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.12.028>
- Wright, B., Hackney, L., Hughes, E., Barry, M., Glaser, D., Prior, V., Allgar, V., Marshall, D., Barrow, J., Kirby, N., Garside, M., Kaushal, P., Perry, A. et McMillan, D. (2017). Decreasing rates of disorganised attachment in infants and young children, who are at risk of developing, or who already have disorganised attachment. A systematic review and meta-analysis of early parenting interventions. *PloS one*, 12(7), e0180858.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180858>
- Yu, P., An, S., Tai, F., Wang, J., Wu, R. et Wang, B. (2013). Early social deprivation impairs pair bonding and alters serum corticosterone and the NAcc dopamine system in mandarin

voles. *Psychoneuroendocrinology*, 38(12), 3128–3138.

<https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2013.09.012>

Yuan, J. P., Connolly, C. G., Henje, E., Sugrue, L. P., Yang, T. T., Xu, D. et Tymofiyeva, O.

(2020). Gray matter changes in adolescents participating in a meditation

training. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14, 319.

<https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00319>

Annexe A

Attachment Q-sort (AQS): Coding system

Waters, E. (1995). The Attachment Q-Set version 3.0 (Appendix A). *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 60 (2-3), 234-246. doi: 10.1111/j.1540-5834.1995.tb00214.x

Attachment Q-sort (AQS): Coding system

1. Partage facilement avec la figure d'attachement ou la laisse tenir des objets si elle lui demande.
Atypique: refus
2. Lorsqu'il revient près de la figure d'attachement après avoir joué, il est parfois maussade (grognon) sans raison apparente.
Atypique: il est joyeux et affectueux lorsqu'il revient près de la figure d'attachement, entre ou après ses périodes de jeu.
3. Lorsqu'il est bouleversé ou blessé, il acceptera d'être réconforté par des adultes autres que la figure d'attachement.
Atypique: La figure d'attachement est la seule personne par qui il accepte de se faire réconforter.
4. Est soigneux et doux avec les jouets et les animaux domestiques.
5. Est plus intéressé par les gens que par les objets.
Atypique: plus intéressé par les objets que les gens.
6. S'il est près de la figure d'attachement et qu'il voit quelque chose avec lequel il veut jouer, il devient accaparant ou essaie de l'amener vers l'objet.
Atypique: va de lui-même vers l'objet qu'il désire avec entrain ou sans essayer de l'amener vers cet objet.
7. Rit et sourit facilement à plusieurs personnes différentes.
Atypique: La figure d'attachement peut l'amener à rire ou à sourire plus facilement que toute autre personne.
8. Lorsqu'il pleure, il pleure fort.
Atypique: pleure, sanglote, mais ne pleure pas fort ou si cela lui arrive, ça ne dure jamais très longtemps.
9. Est de bonne humeur et enjoué la plupart du temps.
Atypique: a tendance à être sérieux, triste ou ennuyé la majorité du temps.
10. Pleure ou résiste souvent quand la figure d'attachement l'amène au lit pour sa sieste ou au moment du coucher.
11. Souvent serre ou se blottit contre la figure d'attachement sans qu'elle lui ai demandé ou invité à le faire.
Atypique: ne la serre pas ou ne l'étreint pas souvent sauf si elle l'étreint la première ou qu'elle lui demande de lui faire une caresse.
12. Va rapidement aller vers les personnes ou va utiliser les objets qui initialement le gênaient ou l'apauraient.

Neutre: s'il n'est jamais gêné ou effrayé.

13. Lorsqu'il est bouleversé par le départ de la figure d'attachement, il va continuer à pleurer ou va se fâcher après qu'elle soit partie.

Atypique: arrête de pleurer juste après son départ.

Neutre: s'il n'est pas bouleversé par son départ.

14. S'il découvre quelque chose de nouveau pour jouer, il va l'apporter à la figure d'attachement ou lui montrer à travers la pièce.

Atypique: joue calmement avec le nouvel objet ou va dans un endroit où il pourra jouer avec, sans être interrompu.

15. Accepte de parler à de nouvelles personnes, de leur montrer des jouets ou de leur montrer ce qu'il est capable de faire si je lui demande.

16. Préfère les jouets qui peuvent représenter des êtres vivants (poupées, animaux en peluche, etc.).

Atypique: préfère les ballons, les blocs, les casseroles, etc.

17. Perd rapidement son intérêt pour les adultes nouveaux s'ils font quelque chose qui l'ennuie.

18. Agit facilement selon les suggestions de la figure d'attachement, même lorsqu'elles sont clairement des suggestions et non des ordres.

Atypique: ignore ou refuse mes suggestions sauf si elle lui ordonne.

19. Quand la figure d'attachement lui demande de lui apporter ou de lui donner quelque chose, il obéit. (Ne pas tenir compte des refus qui font partie d'un jeu à moins que cela ne devienne clairement de la désobéissance)

Atypique: la figure d'attachement doit prendre soi-même l'objet ou élever la voix pour l'obtenir.

20. Réagit peu à la plupart des coups, des chutes et des sursauts.

Atypique: pleure suite aux coups ou sursauts mineurs.

21. Surveille les déplacements de la figure d'attachement quand il joue dans la maison:

- l'appelle de temps en temps
- remarque ses déplacements d'une pièce à une autre
- remarque si elle change d'activités.

Neutre: s'il n'est pas autorisé ou s'il n'y a pas d'endroit où il peut jouer loin de moi.

22. Agit comme un parent affectueux envers ses poupées, les animaux domestiques ou les jeunes enfants.

Atypique: joue avec eux d'une autre manière.

Neutre: s'il ne joue pas ou qu'il ne possède pas de poupées, d'animaux domestiques ou qu'il n'a pas de jeunes enfants dans son entourage.

23. Quand la figure d'attachement est assise avec les autres membres de la famille ou qu'elle est affectueuse avec eux, il essaie d'obtenir son affection pour lui seul.

Atypique: la laisse être affectueuse avec les autres. Peut participer, mais pas d'une manière jalouse.

24. Lorsque la figure d'attachement lui parle fermement ou qu'elle élève la voix, il devient bouleversé, désolé ou honteux de lui avoir déplu. (Ne pas coter typique s'il est simplement bouleversé par le ton de la voix ou qu'il a peur d'être puni).

25. Il est difficile pour la figure d'attachement de savoir où il est lorsqu'il joue hors de sa vue.

Atypique: parle et l'appelle lorsqu'il est hors de sa vue:

- *facile à trouver*
- *facile de savoir avec quoi il joue.*

Neutre: s'il ne joue jamais hors de sa vue.

26. Pleure lorsque la figure d'attachement le laisse à la maison avec une gardienne, l'autre parent ou l'un des grands-parents.

Atypique: ne pleure pas s'il est avec une de ces personnes.

27. Rit lorsque la figure d'attachement le taquine.

Atypique: contrarié quand elle le taquine.

Neutre: si elle le taquine jamais durant les jeux ou les conversations.

28. Aime relaxer assis sur les genoux de la figure d'attachement.

Atypique: préfère relaxer sur le plancher ou sur une chaise, lit, sofa, etc.

Neutre: s'il ne s'assoit jamais pour relaxer.

29. Par moment, il est tellement concentré à quelque chose qu'il ne semble pas entendre lorsque quelqu'un lui parle.

Atypique: même s'il est très impliqué dans un jeu, il prête attention lorsque quelqu'un lui parle.

30. Se fâche facilement contre les jouets.

31. Veut être le centre de l'attention de la figure d'attachement. Si elle est occupée ou qu'elle parle à quelqu'un, il l'interrompt.

Atypique: ne remarque pas ou n'est pas préoccupé d'être son centre d'attention.

32. Quand la figure d'attachement lui dit "non" ou que le punit, il cesse de se comporter mal (au moins à ce moment-là). Elle n'a pas à lui dire deux fois.

33. Quelque fois il signale (ou donne l'impression) à la figure d'attachement qu'il veut être posé par terre. Lorsqu'elle le pose, il devient aussitôt maussade et veut être repris de nouveau.

Atypique: toujours prêt à aller jouer au moment où il signale à la figure d'attachement de le poser par terre.

34. Quand il est bouleversé lorsque la figure d'attachement le quitte, il s'assoit à l'endroit où il est et pleure. Ne la suit pas.

Atypique: la suit activement quand il est bouleversé.

Neutre: s'il n'est jamais bouleversé quand elle le quitte.

35. Est indépendant avec la figure d'attachement. Préfère jouer seul: la quitte facilement quand il veut jouer.

Atypique: préfère jouer avec ou près de la figure d'attachement.

Neutre: s'il n'est pas autorisé ou qu'il n'y a pas de pièces où il peut jouer loin d'elle.

36. Montre clairement qu'il l'utilise comme point de départ de ses explorations:

- s'éloigne pour jouer
- revient ou joue près d'elle
- s'éloigne pour jouer encore, etc.

Atypique: toujours loin jusqu'à ce que la figure d'attachement le retrouve ou demeure toujours près d'elle.

37. Est très actif. Bouge toujours. Préfère les jeux actifs aux jeux calmes.

38. Est exigeant et impatient envers la figure d'attachement. S'obstine et persiste sauf si elle fait immédiatement ce qu'il veut.

39. Est souvent sérieux et méthodique lorsqu'il joue loin d'elle ou quand il est seul avec ses jouets.

Atypique: exprime souvent du plaisir ou rit quand il joue loin de la figure d'attachement, seul avec ses jouets

40. Examine les nouveaux objets ou jouets dans les moindres détails. Essaie de les utiliser de différentes manières ou de les démonter.

Atypique: jette un coup d'oeil rapide aux nouveaux objets ou jouets (cependant il peut s'y intéresser plus tard).

41. Lorsque la figure d'attachement lui demande de le suivre, il le fait. (Ne pas tenir compte des refus ou délais qui font partie d'un jeu, sauf s'ils deviennent clairement de la désobéissance)

42. Reconnaît la détresse de la figure d'attachement (lorsqu'elle est bouleversée):

- devient calme ou bouleversé
- essaie de la reconforter

- demande ce qui ne va pas, etc.

43. Demeure ou revient près de la figure d'attachement, plus souvent que le requiert le simple fait de rester en contact avec elle.

Atypique: ne se tient pas au courant de façon précise de sa localisation ou de ses activités.

44. Demande et prend plaisir quand la figure d'attachement le prend, l'embrasse et le caresse.

Atypique: n'est pas spécialement enthousiaste pour ces démonstrations d'affection. Les tolère, mais ne les recherche pas ou se tortille pour être posé par terre.

45. Aime danser ou chanter au son de la musique.

Atypique: est indifférent à la musique ou n'aime pas, mais ne déteste pas la musique.

46. Marche et court sans se cogner, tomber ou trébucher.

Atypique: coups, chutes ou faux pas se produisent tout au long de la journée (même si aucune blessure n'en résulte).

47. Acceptera et prendra plaisir aux bruits forts ou sautillera près de la source du bruit en jouant si la figure d'attachement lui sourit et qu'elle lui montre que c'est supposé être plaisant.

Atypique: devient bouleversé même si elle lui signale que le bruit ou l'activité est sécuritaire ou plaisant.

48. Permet facilement aux nouveaux adultes de tenir les objets qu'il a et les partage avec eux s'ils lui demandent.

49. Court vers la figure d'attachement avec un sourire gêné quand de nouvelles personnes visitent à la maison.

Atypique: même s'il sera éventuellement chaleureux envers les visiteurs, sa réaction initiale est de courir vers la figure d'attachement en pleurnichant ou en pleurant.

Neutre: s'il ne court pas vers la figure d'attachement quand des visiteurs arrivent.

50. Sa réaction initiale quand des gens nous visitent à la maison est de les ignorer ou de les éviter, même s'il deviendra éventuellement chaleureux avec eux.

51. Aime grimper sur les visiteurs quand il joue avec eux.

Atypique: ne recherche pas un contact intime avec les visiteurs quand il joue avec eux.

Neutre: s'il ne joue pas avec les visiteurs.

52. A de la difficulté à manipuler de petits objets ou à assembler de petites choses.

Atypique: très habile avec de petits objets, crayons, etc.

53. Met ses bras autour de la figure d'attachement ou met la main sur l'épaule de celle-ci quand elle le prend.

Atypique: accepte d'être pris dans ses bras, mais ne l'aide pas particulièrement ou ne se tient pas après elle.

54. Agit comme s'il s'attendait à ce que la figure d'attachement empiète sur ses activités quand elle essaie simplement de l'aider avec quelque chose.

Atypique : accepte facilement son aide sauf si elle intervient dans une situation où son aide n'est pas nécessaire.

55. Imite un certain nombre de comportements ou de manières de faire les choses en observant son comportement.

Atypique : n'imité pas visiblement mon comportement.

56. Devient mal à l'aise ou perd de l'intérêt quand il semble qu'une activité pourrait être difficile.

Atypique : pense qu'il peut faire des tâches difficiles.

57. Est aventureux (sans peur).

Atypique : est prudent ou craintif.

58. En général, ignore les adultes qui visitent à la maison. Trouve ses activités plus intéressantes.

Atypique : trouve les visiteurs très intéressants même s'il est un peu gêné au début.

59. Quand il termine une activité ou un jeu, il trouve généralement autre chose à faire, sans revenir vers la figure d'attachement entre ses activités.

Atypique : quand il termine une activité ou un jeu, il revient vers elle pour jouer, pour chercher de l'affection ou pour chercher de l'aide afin de trouver une autre chose à faire.

60. Si la figure d'attachement le rassure en lui disant « c'est correct » ou « cela ne te fera pas mal », il approchera ou jouera avec des choses qui initialement l'avaient rendu craintif ou l'avaient effrayé.

Neutre : s'il n'est jamais craintif ou effrayé

61. Joue brutalement avec la figure d'attachement. Frappe, égratigne ou mord durant les jeux physiques (ne signifie pas qu'il la blesse).

Atypique : joue à des jeux physiques sans lui faire mal.

Neutre : si ses jeux ne sont jamais très physiques.

62. S'il est de bonne humeur, il le demeure toute la journée.

Atypique : sa bonne humeur est très changeante.

63. Même avant d'essayer des choses par lui-même, il essaie d'avoir quelqu'un pour l'aider. 64.

Aime grimper sur la figure d'attachement quand ils jouent.

Atypique : ne veut pas spécialement plusieurs contacts intimes avec elle quand ils jouent.

65. Est facilement bouleversé quand elle le fait passer d'une activité à une autre, même si la nouvelle activité est quelque chose qu'il aime souvent faire.

66. Développe facilement de l'affection pour les adultes qui visitent à la maison et qui sont amicaux envers lui.

67. Lorsque la famille a des visiteurs, il désire que ceux-ci lui portent beaucoup d'attention.
68. Généralement, il est une personne plus active que la figure d'attachement.
Atypique : généralement, il est une personne moins active qu'elle.
69. Demande rarement de l'aide à la figure d'attachement.
Atypique : lui demande souvent de l'aide.
Neutre : s'il est trop jeune pour lui demander de l'aide.
70. Salue rapidement la figure d'attachement avec un grand sourire lorsqu'il entre dans la pièce où elle est (lui montre un jouet, lui fait signe ou lui dit : « Bonjour maman »),
Atypique : ne la salue pas, sauf si elle le salue en premier.
71. Après avoir été effrayé ou bouleversé, il cesse de pleurer et se remet rapidement, si la figure d'attachement le prend dans ses bras.
Atypique : n'est pas facilement réconforté ou consolé.
72. Si des visiteurs rient et approuvent ce qu'il fait, il recommence maintes et maintes fois.
Atypique : les réactions des visiteurs ne l'influencent pas de cette manière.
73. A un jouet qu'il caresse ou une couverture qui le rassure (doudou), qu'il apporte partout, qu'il amène au lit ou qu'il tient quand il est bouleversé (cela n'inclut pas sa bouteille de lait ou sa suce s'il a moins de 2 ans).
74. Quand la figure d'attachement ne fait pas ce qu'il veut immédiatement, il se comporte comme si elle n'allait pas le faire (pleurniche, se fâche, fait d'autres activités, etc.).
Atypique : attend un délai raisonnable comme s'il s'attendait à ce qu'elle fasse bientôt ce qu'il lui avait demandé.
75. À la maison, il devient bouleversé ou pleure quand la figure d'attachement sort de la pièce où ils étaient (peut ou non la suivre).
Atypique : remarque son départ ; peut la suivre, mais ne devient pas bouleversé.
76. S'il a le choix, il jouera avec des jouets plutôt qu'avec les adultes.
Atypique : jouera avec les adultes plutôt qu'avec des jouets.

77. Lorsque la figure d'attachement lui demande de faire quelque chose, il comprend rapidement ce qu'elle veut (peut ou non obéir).

Atypique : quelques fois incertain, perplexe ou lent à comprendre ce qu'elle veut.

Neutre : s'il est trop jeune pour comprendre.

78. Aime être étreint et tenu par des personnes autres que ses parents et/ou ses grands-parents.

79. Se fâche facilement contre la figure d'attachement.

Atypique : ne se fâche pas contre elle sauf si elle est vraiment intrusive ou qu'il est très fatigué.

80. Considère ses expressions faciales comme étant une bonne source d'information quand quelque chose semble risqué ou menaçant.

Atypique : évalue par lui-même la situation sans surveiller d'abord ses expressions faciales.

81. Pleurer est une façon pour lui d'obtenir que la figure d'attachement fasse ce qu'il veut.

Atypique : pleure surtout à cause d'un véritable inconfort (fatigue, tristesse ou peur).

82. Passe la plupart de ses temps de jeu avec seulement quelques jouets préférés ou pratique ses activités favorites durant ces moments.

83. Lorsqu'il s'ennuie, il vient vers la figure d'attachement, cherchant quelque chose à faire.

Atypique : flâne ou ne fait rien pendant un certain temps jusqu'à ce que quelque chose arrive.

84. Fait au moins un certain effort pour être propre et soigné à la maison.

Atypique : souvent se tache et renverse des choses sur lui ou sur les planchers.

85. Est fortement attiré par les nouvelles activités et les nouveaux jouets.

Atypique : ne délaissera pas ses jouets et activités familiers pour de nouvelles choses.

86. Essaie d'amener la figure d'attachement à l'imiter ou remarque rapidement et prend plaisir quand elle l'imité de sa propre initiative.

87. Si la figure d'attachement rit ou approuve quelque chose qu'il a fait, il recommence maintes et maintes fois.

Atypique : n'est pas particulièrement influencé de cette manière par ses réactions.

88. Lorsque quelque chose le bouleverse, il reste où il est et pleure.

Atypique : vient vers la figure d'attachement quand il pleure. N'attend pas qu'elle vienne vers lui.

89. Ses expressions faciales sont claires et marquées quand il joue avec quelque chose.

90. Si la figure d'attachement s'éloigne très loin de lui, il la suit et continue son jeu dans ce nouvel endroit (où elle est; n'a pas à être sollicité ou amené dans l'autre pièce).

Atypique : n'arrête pas de jouer ou ne devient pas bouleversé.

Neutre : s'il n'est pas autorisé ou s'il n'y a pas de pièces où il soit vraiment loin d'elle.

Annexe B

Indices of disorganization and disorientation

Main, M., & Solomon, J. (1990). Procedures for identifying infants as disorganized/disoriented during the Ainsworth Strange Situation. *Attachment in the preschool years: Theory, research, and intervention, 1*, 121-160.

Indices of disorganization and disorientation (for infants 12-18 months observed with parent present) – Traduction libre

1. Présentation séquentielle de patrons de comportements contradictoires.
2. Présentation simultanée de patrons de comportements contradictoires.
3. Mouvements et expressions non dirigés, mal dirigés, incomplets, ou interrompus.
4. Stéréotypies, mouvements asymétriques ou mal calculés (*mistimed*) et postures anormales.
5. Figer, comportements d'immobilité ou lenteur de comportements et d'expressions.
6. Indices directs d'appréhension ou de peur vis-à-vis du parent.
7. Indices directs de désorganisation, de désorientation ou de confusion.

Annexe C

Peer affiliation and social acceptance (PASA): Self-report

Dishion, T. J., Kim, H., Stormshak, E. A., & O'Neill, M. (2014). A brief measure of peer affiliation and social acceptance (PASA): Validity in an ethnically diverse sample of early adolescents. *Journal of Clinical Child & Adolescent Psychology*, 43(4), 601–612.

<http://dx.doi.org/10.1080/15374416.2013.876641>

RELATIONS AVEC LES AUTRES ENFANTS

Réfléchis bien aux questions suivantes et indique par un crochet (v) ton impression de tes relations avec les autres enfants **au cours des trois derniers mois**.

Depuis le mois de _____ (revenir 3 mois en arrière).

QUESTIONS	Aucun ou très peu	Quelques- uns	Environ la moitié	La plupart	Presque tous
1. Combien des autres enfants <u>à l'école</u> ont été amicaux avec toi?					
2. Combien des autres enfants <u>à l'extérieur de l'école</u> ont été amicaux avec toi?					
3. Combien des autres enfants <u>à l'école</u> ont été hostiles ou désagréables avec toi?					
4. Combien des autres enfants <u>à l'extérieur de l'école</u> ont été hostiles ou désagréables avec toi?					
5. Combien des autres enfants, en général, t'ont ignoré ou bien ont eu une attitude neutre envers toi?					

Annexe D

Peer affiliation and social acceptance (PASA): Teacher-report

Dishion, T. J., Kim, H., Stormshak, E. A., & O'Neill, M. (2014). A brief measure of peer affiliation and social acceptance (PASA): Validity in an ethnically diverse sample of early adolescents. *Journal of Clinical Child & Adolescent Psychology*, 43(4), 601–612.

<http://dx.doi.org/10.1080/15374416.2013.876641>

RELATIONS AVEC LES PAIRS

Veillez lire attentivement les questions suivantes et partagez votre impression la plus juste des relations de cet enfant avec ses pairs, autrement dit les autres enfants à l'école. En complétant cette section, pensez aux interactions entre l'enfant et ses pairs **dans le dernier mois**.

Très peu (moins de 25%) 1	Quelques-uns (autour de 25%) 2	Environ la moitié (50%) 3	La plupart (autour de 75%) 4	Presque tous (plus de 75%) 5
--	---	---	---	--

1. Quel est le pourcentage des pairs de cet enfant qui l'acceptent et l'apprécient?	1	2	3	4	5
2. Quel est le pourcentage des pairs de cet enfant qui ne l'aiment pas ou le rejettent?	1	2	3	4	5
3. Quel est le pourcentage des pairs de cet enfant qui l'ignorent ou qui sont plutôt neutres à son égard?	1	2	3	4	5