



HAL
open science

Effets des émotions sur la mémoire épisodique chez l'enfant au développement typique et dans le syndrome de Williams-Beuren : approche comportementale et neurophysiologique

Sarah Massol

► To cite this version:

Sarah Massol. Effets des émotions sur la mémoire épisodique chez l'enfant au développement typique et dans le syndrome de Williams-Beuren : approche comportementale et neurophysiologique. Psychologie. Université de Lyon, 2021. Français. NNT : 2021LYSE2021 . tel-03350479

HAL Id: tel-03350479

<https://theses.hal.science/tel-03350479>

Submitted on 21 Sep 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



N° d'ordre NNT : 2021LYSE2021

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

Opérée au sein de

L'UNIVERSITÉ LUMIÈRE LYON 2

École Doctorale : ED 476

Neurosciences et cognition

Discipline : Sciences cognitives

Soutenue publiquement le 16 avril 2021, par :

Sarah MASSOL

Effet des émotions sur la mémoire épisodique chez l'enfant au développement typique et dans le syndrome de Williams-Beuren.

Approche comportementale et neurophysiologique.

Devant le jury composé de :

Vincent DES PORTES, Professeur au service Neuropédiatrie, Centre Hospitalier Le Vinatier, Président

Agnès LACROIX, Professeure des universités, Université de Rennes 2, Rapporteur

Bérengère GUILLERY-GIRARD, Maître de conférences HDR, Ecole Pratique des Hautes Etudes Paris,
Rapporteur

Pascal HOT, Professeur des universités, Université de Savoie, Examineur

Caroline DEMILY, Professeure, Centre Hospitalier Le Vinatier, co-Directrice de thèse

Hanna CHAINAY, Professeure des Universités, Université Lumière Lyon 2, Directrice de thèse

Contrat de diffusion

Ce document est diffusé sous le contrat *Creative Commons* « [Paternité – pas d'utilisation commerciale - pas de modification](#) » : vous êtes libre de le reproduire, de le distribuer et de le communiquer au public à condition d'en mentionner le nom de l'auteur et de ne pas le modifier, le transformer, l'adapter ni l'utiliser à des fins commerciales.

Université Lumière Lyon 2
École Doctorale Neurosciences et Cognition (NSCo) ED 476
Laboratoire d'Étude des Mécanismes Cognitifs (UR EMC)

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LYON
Discipline : Sciences Cognitives

Effet des émotions sur la mémoire épisodique chez l'enfant au
développement typique et dans le syndrome de Williams-Beuren :
approche comportementale et neurophysiologique

Par : Sarah MASSOL

Réalisée sous la direction de Pr. Hanna CHAINAY et Pr. Caroline DEMILY

Thèse soutenue le : 16 avril 2021

Devant le jury composé de :

Bérengère GUILLERY

Maîtresse de conférences à l'École Pratique des Hautes Études, Rapportrice

Agnès LACROIX

Professeure à l'Université Rennes 2, Rapportrice

Vincent DES PORTES

Professeur au Centre Hospitalier Le Vinatier, Examineur

Pascal HOT

Professeur à l'Université de Savoie Mont Blanc, Examineur

Hanna CHAINAY

Professeure à l'Université Lumière Lyon 2, Directrice de thèse

Caroline DEMILY

Professeure au Centre Hospitalier Le Vinatier, Co-directrice de thèse

« Emportés par la foule qui nous traîne, nous entraîne [...] »
Entraînés par la foule qui s'élançe et qui danse une folle farandole... »

En souvenir d'un instant suspendu.

Résumé

Ces dernières années, les émotions et la cognition, et en particulier le lien entre ces deux domaines, ont fasciné les scientifiques du monde entier, donnant naissance à de nombreux travaux de recherche en psychologie, sciences cognitives et neurosciences. L'une des fonctions cognitives qui a éminemment attirée l'attention des chercheurs, en lien avec la modulation émotionnelle à laquelle elle est assujettie, est la mémoire épisodique. Aussi, les travaux de recherche réalisés chez l'Homme se sont largement accordés sur un point : les émotions participent à l'amélioration de la mémoire épisodique, un phénomène qui, dans la littérature, porte le nom de *Emotional Enhancement of Memory* (EEM). Si ce phénomène a amplement été étudié dans la population adulte, la nature de l'interaction entre mémoire et émotions reste largement inexplorée au cours du développement ontogénétique. Or, l'enfance est une période charnière durant laquelle des modifications majeures émergent au niveau du fonctionnement cérébral, sous-tendant le développement cognitif et émotionnel de l'enfant jusqu'à l'âge adulte. Ce travail de thèse s'est donc centré, dans un premier temps, sur l'étude de l'EEM chez l'enfant au développement typique (DT) afin de mettre en exergue de potentielles modulations développementales comparativement à la population adulte. Dans un deuxième temps, afin d'élargir nos connaissances sur l'EEM au cours du développement, ce travail de thèse a adopté une approche neuropsychologique avec l'étude de ce phénomène auprès d'enfants et d'adolescents porteurs d'un trouble neuro-développemental appelé syndrome de Williams-Beuren (SWB). Ainsi, plusieurs études expérimentales ont été conduites afin d'évaluer l'EEM chez l'enfant au DT et dans le SWB, à la fois avec des évaluations comportementales, comprenant des tâches d'encodage et de récupération en mémoire de stimuli émotionnels (négatifs et positifs) et neutres, ainsi qu'avec des mesures neurophysiologiques grâce à l'électro-encéphalographie (EEG). En particulier, les évaluations comportementales se sont intéressées à l'analyse de la mémoire épisodique dans sa globalité, c'est-à-dire en tenant compte de ses deux composants principaux qui sont la mémoire de l'item et la mémoire associative. Les résultats obtenus dans ce travail de recherche ont permis, pour la première fois, de mettre en évidence l'émergence d'un EEM à la fois en mémoire de l'item et en mémoire associative chez les enfants au DT âgés de 8 à 11 ans, et ceci

de façon similaire à des jeunes adultes. Des premiers indices de la modulation des réponses neuronales lors de l'encodage de stimuli émotionnels pouvant prédire les performances comportementales en mémoire, ont également été apportés chez les enfants au DT. Par ailleurs, ce travail de recherche a contribué à fournir des premières preuves de l'émergence d'un EEM chez les enfants et adolescents porteurs du SWB âgés de 8 à 18 ans, qui apparaissait de façon similaire à un groupe de jeunes enfants au DT. Dans l'ensemble, ce travail de thèse a permis de démontrer que l'EEM est un phénomène robuste, qui se mettrait en place précocement au cours du développement et qui ne semblerait pas être affecté par l'immaturation de certains processus mnésiques observée chez les enfants au DT, ni par l'altération de ces processus dans le cas du SWB.

Mots clés : mémoire épisodique, émotions, développement typique, syndrome de Williams-Beuren, EEM, EEG.

Abstract

In the last few years, emotions and cognition, and in particular the link between the two, have fascinated scientists around the world, giving rise to a large body of research in psychology, cognitive science and neuroscience. One of the cognitive functions that has drawn the attention of researchers, in line with its emotional modulation, is episodic memory. Thus, research work carried out in humans has largely agreed on one point: emotions improve episodic memory, a phenomenon which is called Emotional Enhancement of Memory (EEM). While the EEM has been extensively investigated in the adult population, the nature of the interaction between memory and emotions remains largely unexplored during development. However, childhood is a critical period during which major changes emerge in brain function, underpinning the cognitive and emotional development of children until adulthood. This thesis work therefore focused, primarily, on the study of the EEM in typically developing (TD) children in order to highlight potential developmental modulations compared to the adult population. Secondly, in order to broaden our knowledge of the EEM during development, this thesis work adopted a neuropsychological approach with the study of this phenomenon in children and adolescents with a neurodevelopmental disorder called Williams-Beuren syndrome (WBS). Thus, several experimental studies were conducted in order to evaluate the EEM in TD children and individuals with WBS, both with behavioral assessments, including encoding and retrieval tasks of emotional (negative and positive) and neutral stimuli, as well as with neurophysiological measures using electroencephalography (EEG). In particular, the behavioral evaluations examined episodic memory as a whole, taking into account its two main components, i.e. item memory and associative memory. The results obtained in this research work highlighted, for the first time, the emergence of an EEM in both item and associative memory in TD children aged 8 to 11 years, which is similar to that of young adults. First clues of the modulation of neural responses during the encoding of emotional stimuli that can predict behavioral memory performance were also shown in TD children. In addition, this research work provided the first evidence of the emergence of an EEM in children and adolescents with WBS aged 8 to 18 years, which appeared similarly to a group of

young TD children. Overall, this thesis work helped to demonstrate that EEM is a robust phenomenon, established early in development and which does not seem to be affected by the immaturity of certain memory processes in TD children, nor by the alteration of these processes in the case of WBS.

Keywords: episodic memory, emotions, typical development, Williams-Beuren syndrome, EEM, EEG.

Remerciements

09.03.21. Il est temps de clore ce chapitre de ma vie. Le chapitre de ma vie d'étudiante, qui s'achève sur ces quelques mots. Mais quelle meilleure fin que le moment où l'on se rend compte avec plénitude du chemin parcouru, du travail accompli et de tous les merveilleux moments vécus depuis toutes ces années. Cette succession d'évènements, d'aventures, d'imprévus, d'opportunités, d'attachements, de doutes, de choix, de hasards, de rebondissements, qui m'ont menée jusqu'ici, et qui font de ces remerciements un moment de profonde reconnaissance. Une profonde reconnaissance pour toutes les personnes qui ont croisé mon chemin et qui ont, d'une façon ou d'une autre, participé à mon épanouissement. À toutes ces personnes qui m'ont encouragée, soutenue, entourée et inspirée, qu'elles soient ou non encore présentes dans mon quotidien. Je n'aurais certainement pas avancé aussi loin sans vous.

À Hanna, ma directrice de thèse, qui m'a encadrée et soutenue depuis mes premiers pas au laboratoire EMC pour mon stage de Master 1 jusqu'à l'accomplissement de ma thèse. Un petit bout de chemin parcouru ensemble qui aura participé à mon évolution, tant professionnelle que personnelle. Merci pour la confiance que vous m'avez accordée, pour votre grande générosité et pour avoir affronté avec moi toutes les péripéties associées à ce travail de thèse, toujours avec bonne humeur et enthousiasme. Si j'ai autant apprécié ces années de thèse, c'est aussi et surtout grâce à vous et à nos nombreux échanges, aussi bien informels. Je n'aurai pu espérer un meilleur encadrement que le vôtre.

Aux membres du jury Bérengère Guillery, Agnès Lacroix, Vincent Des Portes et Pascal Hot, que je remercie d'avoir accepté d'évaluer ce travail de thèse et qui marqueront, de ce fait, son point final. À Pascal Hot et Vincent Des Portes pour m'avoir également suivie durant ces trois années de thèse au cours des rendez-vous annuels du comité de suivi individuel, merci pour votre bienveillance et vos nombreux conseils.

À tous les membres du laboratoire EMC avec qui j'ai apprécié échanger et partager des moments au détour de pauses déjeuners, de réunions ou de fêtes du laboratoire. Merci de m'avoir chaleureusement accueillie et de m'avoir permis de me sentir entièrement à mon aise dans cet environnement de travail. Merci à Bernard Lété, directeur du laboratoire, de prendre en considération les besoins des doctorants et de nous permettre de travailler dans les meilleures conditions.

À tous les doctorants du laboratoire qui ont été de vrais complices durant ces années de thèse et qui ont contribué à entretenir une ambiance de travail chaleureuse, conviviale et décontractée. J'ai apprécié chacune des journées passées au laboratoire en votre compagnie. Merci pour tous ces moments de partage, d'entraide et de rigolade. Une attention particulière à Rudy et Lénaïc, merci

d'avoir été bien plus que de simples collègues de travail. Merci d'avoir partagé avec moi tous ces moments de vie et d'avoir fait de ces trois années de thèse, des années inoubliables. Merci de m'avoir fait rire à n'en plus pouvoir, merci de m'avoir épaulée lorsque j'en ressentais le besoin. Merci de votre amitié, de votre spontanéité et de votre sincérité. Merci de m'avoir permis de ressentir toutes ces magnifiques émotions. Merci simplement d'avoir été là. Un clin d'œil à Sara, pour avoir partagé ces moments de fin de thèse avec moi. Merci d'avoir été mon acolyte dans mon besoin de coworking poussé à l'extrême, et d'avoir adouci, par ta présence, ces longues journées de télétravail.

À tous les membres du CRR pour m'avoir accueillie durant cette longue période de passations d'expériences en EEG et pour avoir participé à ce que ces expériences se déroulent dans les meilleures conditions. Merci particulièrement à Pr. Nicolas Franck de m'avoir donné l'accès à son service. Merci à Laura pour sa grande générosité, j'ai arrêté de compter toutes les complications associées à ces expériences en EEG auxquelles on a dû faire face. Merci pour ta patience et ta capacité à résoudre les problèmes avec aplomb et maîtrise. Merci à Cora pour ces longues heures passées à décortiquer les données EEG. Merci pour tout ce travail accompli et pour ton aide précieuse. Merci pour ces instants de folie, entre rire et fatigue, et toutes ces bonnes énergies que tu procures. Merci d'avoir transformé la monotonie de certaines journées en de grands moments d'effervescence.

À Caroline Demily, pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser ce travail de thèse avec les enfants et adolescents porteurs du syndrome de Williams-Beuren qui m'ont énormément touchée et inspirée et avec qui j'ai eu beaucoup de plaisir à échanger. Merci à Costanza pour ton aide dans la coordination de ce travail.

Aux 224 personnes qui ont participé aux expériences de ce travail de thèse et qui ont, ainsi, permis à ce qu'il puisse voir le jour. Merci aux 98 adultes et aux 126 enfants et adolescents ainsi qu'à leur famille, d'avoir accepté avec enthousiasme de prendre part à mes études. Merci pour votre application, votre patience, votre curiosité et votre bonne humeur. Merci d'avoir rendu ce travail de thèse aussi captivant.

Aux écoles publiques Jean Gerson et Simone Signoret pour avoir généreusement consenti à ce que je réalise certaines expériences avec leurs élèves. Merci aux enseignants pour leur coopération, sans laquelle je n'aurais pu obtenir tous ces résultats.

Aux associations « Autour des Williams » et « Williams France » qui ont été d'une grande aide dans le recrutement des enfants et adolescents porteurs du syndrome. Merci d'avoir diffusé largement mes annonces.

À Sophie Vantaggio, pour avoir participé à la réalisation d'une expérience de ce travail de thèse au cours de son stage de Master 1. Merci pour ton implication, ton sérieux et ta gentillesse.

À Joël Brogniart pour avoir passé de longs moments à m'aider pour la mise en place de mon expérience en EEG, et à Anne Caclin pour m'avoir donné de précieux conseils dans l'analyse de ces données. Merci pour votre aide et votre générosité.

Au personnel de l'Hôpital du Vinatier qui a permis que mon projet de thèse soit institué, financé et coordonné au mieux durant ces trois ans.

Pour finir, à mes proches qui m'ont animée et inspirée dans ma vie quotidienne et qui ont fait que je puisse être dans les meilleures conditions psychologiques pour entreprendre cette thèse :

À Alexia pour ton soutien infaillible, ton immense générosité et ta profonde loyauté. Tu as été mon repère dans les moments difficiles et ma véritable source d'énergie tout le reste du temps. Merci pour tout.

À mes amies de la chorale, Lucille, Anne et Lucie pour tous ces superbes moments partagés ensemble qui ont véritablement égayé mon quotidien. Merci de m'avoir permis de m'évader avec vous et de m'avoir procuré toutes vos bonnes énergies.

À mes colocs, Colin et Silya pour avoir partagé mon quotidien et m'avoir fait sentir pleinement entourée. Merci pour votre présence et votre bienveillance. Merci de m'avoir changé les idées et d'avoir partagé avec moi ces journées de travail interminables. Vous aurez indéniablement contribué à rendre ma fin de thèse bien plus douce.

À mes amis aveyronnais. Aux petits pédestres, pour faire partie des personnes les plus drôles, pittoresques et décalées que je connaisse. À mes amies de l'internat, pour leur authenticité et leur bienveillance. Merci à tous et toutes d'être toujours là depuis plus de dix ans. Vous êtes mes piliers.

À Isaac, pour tout ce qu'il est. Merci d'être mon meilleur complice et mon plus grand réconfort. Merci d'être aussi attentionné, drôle, sensible et spirituel. Merci de partager avec moi toutes ces attachantes bizarreries. Merci d'avoir coloré mes journées et illuminé mon quotidien. Merci, de tout mon cœur, d'avoir été là.

À ma famille, pour tout. Vous êtes mes racines, mon énergie et ma principale source de motivation. Merci à mes parents de m'avoir offert l'entière liberté de faire ce que je voulais, de m'avoir toujours soutenue dans mes choix et de m'avoir donné les moyens de réussir. Merci à ma maman de m'avoir transmis sa persévérance et sa sensibilité. Merci à mon papa de m'avoir transmis son optimisme et son inspiration. Vous avez fait de moi un parfait équilibre entre les pieds sur terre et la tête dans les nuages. Merci à ma grande sœur Ambre et à mon grand frère Yann pour leur présence et leur soutien depuis toujours. Merci d'avoir, dès le plus jeune âge, veillé sur moi et contribué à forger mon caractère. Merci à tous les quatre pour votre amour inconditionnel.

Au coronavirus, qu'il puisse disparaître à jamais.

Table des matières

Résumé	i
Abstract	iii
Remerciements	v
Liste des tableaux	xiii
Liste des figures	xv
Acronymes et abréviations	xix
Avant-propos	xxi
Partie 1. L'effet des émotions sur la mémoire épisodique dans le développement typique. - 1 -	
Chapitre 1. Cadre théorique. - 3 -	
I. La mémoire épisodique - 3 -	
1. Définition et modèles théoriques de la mémoire épisodique - 3 -	
2. Mémoire de l'item et mémoire associative - 6 -	
3. Bases neuro-anatomiques de la mémoire épisodique - 8 -	
4. Le développement de la mémoire - 10 -	
II. Le traitement des émotions - 15 -	
1. Théories des émotions - 15 -	
2. Bases neuro-anatomiques des émotions - 18 -	
3. Corrélats neuronaux des émotions (EEG) - 19 -	
4. Le développement des émotions - 22 -	
III. EEM chez l'adulte - 26 -	
1. Définition et modèles de l'EEM - 26 -	
2. Bases neuro-anatomiques de l'EEM - 31 -	
3. Corrélats neuronaux de l'EEM (EEG) - 34 -	
4. La modulation de l'EEM avec l'âge - 38 -	
IV. EEM chez l'enfant - 41 -	
1. Études comportementales chez l'enfant - 41 -	
2. Bases neuro-anatomiques de l'EEM chez l'enfant - 44 -	
3. Corrélats neuronaux de l'EEM chez l'enfant (EEG) - 46 -	
V. Objectifs de la première partie - 50 -	

Chapitre 2. Études expérimentales.	- 53 -
I. Étude 1 (Expériences 1 et 2) - EEM en mémoire de l'item et en mémoire associative chez l'enfant et l'adulte : étude comportementale	- 53 -
1. Préambule	- 53 -
2. Abstract	- 55 -
3. Introduction	- 56 -
4. Exp1: Method	- 62 -
5. Exp1: Results	- 69 -
6. Exp1: Discussion	- 73 -
7. Exp2: Method	- 78 -
8. Exp2: Results	- 83 -
9. Exp2: Discussion	- 88 -
10. General discussion	- 91 -
11. Conclusion	- 100 -
II. Étude 2 (Expérience 3) - Corrélats neuronaux de l'EEM chez l'enfant et l'adulte : étude en électro-encéphalographie (EEG)	- 101 -
1. Préambule	- 101 -
2. Abstract	- 103 -
3. Introduction	- 104 -
4. Method	- 108 -
5. Results	- 117 -
6. Discussion	- 127 -
7. Conclusion	- 135 -
Chapitre 3. Discussion de la première partie.	- 137 -
Partie 2. L'effet des émotions sur la mémoire épisodique dans le syndrome de Williams-Beuren.	- 147 -
Chapitre 1. Cadre théorique.	- 149 -
I. Généralités et phénotype clinique du syndrome	- 149 -
II. Anomalies neuro-anatomiques générales	- 151 -
III. Performances mnésiques dans le syndrome	- 153 -
1. Performances mnésiques : études comportementales	- 153 -
2. Performances mnésiques durant le développement	- 156 -
3. Anomalies neuro-anatomiques et déficits de mémoire	- 157 -
IV. Traitement des émotions dans le syndrome	- 158 -
1. Traitement des émotions : études comportementales et en neuro-imagerie	- 158 -
2. Traitement des émotions durant le développement	- 160 -
3. Anomalies neuro-anatomiques et traitement atypique des émotions	- 161 -
V. EEM dans le développement atypique	- 163 -
VI. Objectifs de la deuxième partie	- 165 -
Chapitre 2. Étude expérimentale.	- 167 -
I. Étude 3 (Expériences 1, 2 et 3) - EEM chez l'enfant et l'adolescent porteurs du syndrome de Williams-Beuren : étude comportementale et en électro-encéphalographie (EEG)	- 167 -
1. Préambule	- 167 -
2. Abstract	- 170 -

3.	Introduction	- 171 -
4.	Exp1: Method	- 179 -
5.	Exp1: Results	- 186 -
6.	Exp1: Discussion	- 189 -
7.	Exp2: Method	- 191 -
8.	Exp2: Results	- 195 -
9.	Exp2: Discussion	- 196 -
10.	Exp3: Method	- 199 -
11.	Exp3: Results	- 206 -
12.	Exp3: Discussion	- 215 -
13.	General discussion	- 219 -
14.	Conclusion	- 227 -
 Partie 3. Discussion générale.		 - 229 -
 Discussion générale.		 - 231 -
I.	Discussion des résultats expérimentaux	- 231 -
1.	EEM immédiat : données comportementales	- 231 -
2.	EEM immédiat : données neurophysiologiques	- 234 -
3.	EEM à long terme	- 236 -
4.	Rôle des processus d'encodage, de consolidation et de récupération dans l'EEM	- 237 -
5.	Nouvelles connaissances sur le syndrome de Williams-Beuren	- 239 -
II.	Limites et perspectives	- 241 -
 Conclusion générale.		 - 247 -
 Références bibliographiques		 - 249 -

Liste des tableaux

TABLE 1. MOOD AND NEUROPSYCHOLOGICAL ASSESSMENTS FOR CHILDREN AND YOUNG ADULTS IN EXPERIMENT 1.	- 68 -
TABLE 2. MOOD AND NEUROPSYCHOLOGICAL ASSESSMENTS FOR CHILDREN AND YOUNG ADULTS IN EXPERIMENT 2.	- 82 -
TABLE 3. MEAN RATINGS OF THE STIMULI FOR EMOTIONAL VALENCE AND AROUSAL GIVEN BY CHILDREN AND ADULTS IN THE DAPS (PICTURES) AND FAN (WORDS) DATABASES. THIS TABLE ALSO INCLUDES MEAN RATINGS OF VISUAL COMPLEXITY FOR PICTURES AND IMAGEABILITY FOR WORDS. STANDARD DEVIATIONS ARE IN PARENTHESES.	- 97 -
TABLE 4. MEAN PROPORTIONS OF CORRECT RESPONSES FOR FREE RECALL, ASSOCIATIVE RECALL AND RECOGNITION FOR NEGATIVE, POSITIVE AND NEUTRAL STIMULI (PICTURES AND WORDS) IN EXPERIMENT 1. STANDARD ERRORS ARE IN PARENTHESES.	- 98 -
TABLE 5. MEAN PROPORTIONS OF CORRECT RESPONSES FOR FREE RECALL AND ASSOCIATIVE RECALL FOR NEGATIVE, POSITIVE AND NEUTRAL STIMULI (PICTURES AND WORDS) IN EXPERIMENT 2. STANDARD ERRORS ARE IN PARENTHESES.	- 99 -
TABLE 6. MOOD, HANDEDNESS AND COGNITIVE FUNCTIONING ASSESSMENTS FOR CHILDREN AND ADULTS.	- 113 -
TABLE 7. MEAN NUMBER OF EPOCHS INCLUDED IN ERP AVERAGES FOR THE DM EFFECT FOR CHILDREN AND ADULTS. STANDARD DEVIATIONS ARE IN PARENTHESES.	- 114 -
TABLE 8. CHILDREN – WAVEFORMS – EMOTION EFFECT.	- 120 -
TABLE 9. ADULTS – WAVEFORMS – EMOTION EFFECT.	- 122 -
TABLE 10. CHILDREN – WAVEFORMS – SUCCESSFUL ENCODING EFFECT.	- 124 -
TABLE 11. ADULTS – WAVEFORMS – SUCCESSFUL ENCODING EFFECT.	- 126 -
TABLE 12. MEAN RATINGS OF EMOTIONAL VALENCE, AROUSAL AND VISUAL COMPLEXITY OF PICTURES FROM THE DAPS DATABASE, FOR CHILDREN AND ADULTS. STANDARD DEVIATIONS ARE IN PARENTHESES.	- 134 -
TABLE 13. AGE AND SEX CHARACTERISTICS, COGNITIVE FUNCTIONING AND MOOD ASSESSMENTS FOR WBS AND TD GROUPS.	- 180 -
TABLE 14. MEAN NUMBER OF EPOCHS INCLUDED IN ERP AVERAGES FOR THE OLD/NEW EFFECT FOR WBS AND TD GROUPS. STANDARD DEVIATIONS ARE IN PARENTHESES.	- 203 -
TABLE 15. DW FOR THE EMOTION EFFECT IN WBS AND TD GROUPS AT FRONTAL CLUSTER.	-

209 -

TABLE 16. DW FOR THE EMOTION EFFECT IN WBS AND TD GROUPS AT FRONTO-CENTRAL AND CENTRO-PARIETAL CLUSTERS.	- 210 -
TABLE 17. DW FOR THE EMOTION EFFECT IN WBS AND TD GROUPS AT OCCIPITAL CLUSTER.	- 211 -
TABLE 18. DW FOR THE OLD/NEW EFFECT IN WBS AND TD GROUPS AT FRONTO-CENTRAL CLUSTER.	- 212 -
TABLE 19. DW FOR THE OLD/NEW EFFECT IN WBS AND TD GROUPS AT FRONTAL AND CENTRO-PARIETAL CLUSTERS.	- 213 -
TABLE 20. DW FOR THE OLD/NEW EFFECT IN WBS AND TD GROUPS AT OCCIPITAL CLUSTER.	- 214 -
TABLE 21. EXPERIMENT 1 - MEAN RATINGS OF EMOTIONAL VALENCE AND AROUSAL OF STIMULI. STANDARD DEVIATIONS ARE IN PARENTHESES.	- 223 -
TABLE 22. EXPERIMENT 2 - MEAN RATINGS OF EMOTIONAL VALENCE AND AROUSAL OF PICTURES. STANDARD DEVIATIONS ARE IN PARENTHESES.	- 223 -
TABLE 23. EXPERIMENT 3 - MEAN RATINGS OF EMOTIONAL VALENCE, AROUSAL AND VISUAL COMPLEXITY OF PICTURES FROM THE DAPS DATABASE. STANDARD DEVIATIONS ARE IN PARENTHESES.	- 224 -
TABLE 24. MEAN CORRECT RESPONSE SCORES FOR FREE RECALL, ASSOCIATIVE RECALL AND CORRECTED RECOGNITION FOR NEGATIVE, POSITIVE AND NEUTRAL STIMULI (PICTURES AND WORDS), AS WELL AS MEAN VALENCE RATING SCORES FOR PICTURES, IN EXPERIMENT 1. STANDARD ERRORS ARE IN PARENTHESES.	- 225 -
TABLE 25. MEAN CORRECT RESPONSE SCORES FOR FREE RECALL AND ASSOCIATIVE RECALL FOR NEGATIVE, POSITIVE AND NEUTRAL PICTURES IN EXPERIMENT 2. STANDARD ERRORS ARE IN PARENTHESES.	- 226 -
TABLE 26. MEAN PROPORTIONS OF CORRECTED RECOGNITION SCORES FOR NEGATIVE, POSITIVE AND NEUTRAL PICTURES, AS WELL AS MEAN VALENCE RATING SCORES FOR PICTURES, IN EXPERIMENT 3. STANDARD ERRORS ARE IN PARENTHESES.	- 226 -

Liste des figures

FIGURE 1. MODÈLE SPI (SERIAL, PARALLEL, INDEPENDANT).	- 5 -
FIGURE 2. DIMENSIONAL MODEL OF CORE AFFECT.	- 17 -
FIGURE 3. VUE LATÉRALE DE CERTAINES STRUCTURES CÉRÉBRALES CLÉS DANS LE TRAITEMENT DES ÉMOTIONS.	- 19 -
FIGURE 4. REPRÉSENTATION DE L'ÉPN EN RÉPONSE À DES IMAGES POSITIVES, NÉGATIVES ET NEUTRES, AU NIVEAU OCCIPITAL GAUCHE ET DROIT.	- 21 -
FIGURE 5. REPRÉSENTATION DU LPP EN RÉPONSE À DES IMAGES POSITIVES, NÉGATIVES ET NEUTRES, AU NIVEAU PARIÉTAL DROIT. LES VALEURS NÉGATIVES SONT REPRÉSENTÉES VERS LE HAUT.	- 22 -
FIGURE 6. MODÈLE DE LA CONSOLIDATION.	- 28 -
FIGURE 7. MODÈLE DE LA MÉDIATION COGNITIVE.	- 29 -
FIGURE 8. PRINCIPAUX MÉCANISMES IMPLIQUÉS DANS L'ÉEM. LES ÉMOTIONS AMÉLIORENT LA MÉMOIRE ÉPISODIQUE EN MODULANT L'ACTIVITÉ DE DEUX RÉGIONS CÉRÉBRALES ASSOCIÉES AUX PROCESSUS MNÉSQUES, LE LTM ET LE CPF. CÉPENDANT, LES EFFETS DES ÉMOTIONS SUR LES RÉGIONS DU LTM ET DU CPF PEUVENT ÊTRE LIÉS À DIFFÉRENTS MÉCANISMES : L'AMYGDALÉ (AMY) ET LE LTM SOUS-TENDENT L'ÉEM PAR DES MÉCANISMES NEURO-HORMONAUX DIRECTS (BOTTOM-UP), TANDIS QUE LE CPF A UN RÔLE INDIRECT (TOP-DOWN) DANS L'ÉEM (INCLUANT ÉGALEMENT LE CORTÈX PARIÉTAL) VIA L'IMPLICATION DE FACTEURS COGNITIFS.	- 33 -
FIGURE 9. ONDES CÉRÉBRALES REPRÉSENTANT L'EFFET DM LORS DE LA PHASE D'ENCODAGE POUR LES IMAGES ÉMOTIONNELLES ET NEUTRES QUI ONT ÉTÉ CORRECTEMENT RECONNUES AVEC LEUR CONTEXTE TEMPOREL (HIT/HIT), CORRECTEMENT RECONNUES SANS LEUR CONTEXTE TEMPOREL (HIT/MISS) ET QUI ONT ÉTÉ OUBLIÉES (MISS), AU NIVEAU A) FRONTAL ET B) PARIÉTAL.	- 36 -
FIGURE 10. PROCÉDURES UTILISÉES EN A) PHASE D'ENCODAGE ET B) PHASE DE RÉCUPÉRATION POUR LES IMAGES.	- 67 -
FIGURE 11. POURCENTAGE MOYEN DE RÉPONSES CORRECTES POUR LE RAPPÈL LIBRE D'IMAGES EN FONCTION DU GROUPE (ENFANTS VS. ADULTES) ET DE LA VALENCE ÉMOTIONNELLE (NÉGATIVE VS. POSITIVE VS. NEUTRE). LES BARRES D'ERREUR REPRÉSENTENT LES ERREURS STANDARD.	- 71 -
FIGURE 12. POURCENTAGE MOYEN DE RÉPONSES CORRECTES POUR A) MOTS EN RAPPÈL LIBRE ET B) MOTS EN RAPPÈL ASSOCIATIF (SOURCE: VOIX GÉNÉRIQUE) EN FONCTION DU GROUPE	

(CHILDREN VS. ADULTS) AND EMOTIONAL VALENCE (NEGATIVE VS. POSITIVE VS. NEUTRAL). ERROR BARS REPRESENT STANDARD ERRORS.	- 73 -
FIGURE 13. PROCEDURES FOR A) ENCODING PHASE AND B) RETRIEVAL PHASE ARE ILLUSTRATED HERE FOR A SERIES OF 10 POSITIVE PICTURES.	- 81 -
FIGURE 14. MEAN PERCENTAGE OF CORRECT RESPONSES FOR A) FREE RECALL OF PICTURES AND B) ASSOCIATIVE RECALL OF PICTURES (SPATIAL LOCATION) AS A FUNCTION OF GROUP (CHILDREN VS. ADULTS) AND EMOTIONAL VALENCE (NEGATIVE VS. POSITIVE VS. NEUTRAL). ERROR BARS REPRESENT STANDARD ERRORS.	- 86 -
FIGURE 15. MEAN PERCENTAGE OF CORRECT RESPONSES FOR A) FREE RECALL OF WORDS AND B) ASSOCIATIVE RECALL OF WORDS (SPATIAL LOCATION) AS A FUNCTION OF GROUP (CHILDREN VS. ADULTS) AND EMOTIONAL VALENCE (NEGATIVE VS. POSITIVE VS. NEUTRAL). ERROR BARS REPRESENT STANDARD ERRORS.	- 88 -
FIGURE 16. PROCEDURE FOR ENCODING PHASE.	- 112 -
FIGURE 17. ELECTRODE LAYOUT CONFORMING TO THE 10-20 INTERNATIONAL SYSTEM. THE FOUR CLUSTERS, SEPARATED INTO RIGHT AND LEFT HEMISPHERE, ARE CIRCLED WITH DIFFERENT CONTINUOUS OR BROKEN LINES.	- 115 -
FIGURE 18. MEAN PERCENTAGE OF CORRECT RESPONSES FOR FREE RECALL OF PICTURES AS A FUNCTION OF GROUP (CHILDREN VS. ADULTS) AND EMOTIONAL VALENCE (NEGATIVE VS. POSITIVE VS. NEUTRAL). ERROR BARS REPRESENT STANDARD ERRORS.	- 118 -
FIGURE 19. CHILDREN'S LPP WAVEFORMS FOR THE EMOTION EFFECT AT FRONTAL, FRONTO-CENTRAL, CENTRO-PARIETAL AND OCCIPITAL CLUSTERS. NEGATIVE, POSITIVE AND NEUTRAL CONDITIONS ARE PLOTTED WITH DIFFERENT CONTINUOUS OR BROKEN LINES.	- 120 -
FIGURE 20. ADULTS' LPP WAVEFORMS FOR THE EMOTION EFFECT AT FRONTAL, FRONTO-CENTRAL, CENTRO-PARIETAL AND OCCIPITAL CLUSTERS. NEGATIVE, POSITIVE AND NEUTRAL CONDITIONS ARE PLOTTED WITH DIFFERENT CONTINUOUS OR BROKEN LINES.	- 123 -
FIGURE 21. CHILDREN'S LPP WAVEFORMS FOR THE SUCCESSFUL ENCODING EFFECT AT FRONTAL, FRONTO-CENTRAL, CENTRO-PARIETAL AND OCCIPITAL CLUSTERS. NEGATIVE, POSITIVE AND NEUTRAL CONDITIONS ARE PLOTTED WITH DIFFERENT CONTINUOUS OR BROKEN LINES.	- 125 -
FIGURE 22. ADULTS' LPP WAVEFORMS FOR THE SUCCESSFUL ENCODING EFFECT AT FRONTAL, FRONTO-CENTRAL, CENTRO-PARIETAL AND OCCIPITAL CLUSTERS. NEGATIVE, POSITIVE AND NEUTRAL CONDITIONS ARE PLOTTED WITH DIFFERENT CONTINUOUS OR BROKEN LINES.	- 126 -
FIGURE 23. PHOTOGRAPHIE PRESENTANT LES CARACTERISTIQUES FACIALES D'UN ENFANT PORTEUR DU SWB CREEE GRACE A LA COMPOSITION GRAPHIQUE DE 12 PHOTOGRAPHIES D'ENFANTS.	- 150 -

FIGURE 24. PROCEDURES USED IN A) ENCODING PHASE AND B) RETRIEVAL PHASE FOR PICTURES ARE ILLUSTRATED HERE.	- 184 -
FIGURE 25. MEAN CORRECT RESPONSES FOR A) PICTURE AND B) WORD RECALL AS A FUNCTION OF GROUP (WBS INDIVIDUALS VS. TD CHILDREN) AND EMOTIONAL VALENCE (NEGATIVE VS. POSITIVE VS. NEUTRAL). MAXIMUM SCORE: 8 FOR EACH CATEGORY OF VALENCE. ERROR BARS REPRESENT STANDARD ERRORS.	- 187 -
FIGURE 26. MEAN CORRECT RESPONSES FOR THE ASSOCIATIVE RECALL OF WORDS AS A FUNCTION OF GROUP (WBS INDIVIDUALS VS. TD CHILDREN) AND EMOTIONAL VALENCE (NEGATIVE VS. POSITIVE VS. NEUTRAL). MAXIMUM SCORE: 8 FOR EACH CATEGORY OF VALENCE. ERROR BARS REPRESENT STANDARD ERRORS.	- 188 -
FIGURE 27. MEAN VALENCE RATING OF PICTURES AS A FUNCTION OF GROUP (WBS INDIVIDUALS VS. TD CHILDREN) AND EMOTIONAL VALENCE (NEGATIVE VS. POSITIVE VS. NEUTRAL). ERROR BARS REPRESENT STANDARD ERRORS.	- 189 -
FIGURE 28. PROCEDURES FOR A) ENCODING PHASE AND B) RETRIEVAL PHASE FOR A SERIES OF 6 POSITIVE PICTURES ARE ILLUSTRATED HERE.	- 194 -
FIGURE 29. MEAN CORRECT RESPONSES FOR PICTURE RECALL AS A FUNCTION OF GROUP (WBS INDIVIDUALS VS. TD CHILDREN) AND EMOTIONAL VALENCE (NEGATIVE VS. POSITIVE VS. NEUTRAL). MAXIMUM SCORE: 12 FOR EACH CATEGORY OF VALENCE. ERROR BARS REPRESENT STANDARD ERRORS.	- 195 -
FIGURE 30. MEAN CORRECT RESPONSES FOR THE ASSOCIATIVE RECALL OF PICTURES AS A FUNCTION OF GROUP (WBS INDIVIDUALS VS. TD CHILDREN) AND EMOTIONAL VALENCE (NEGATIVE VS. POSITIVE VS. NEUTRAL). MAXIMUM SCORE: 12 FOR EACH CATEGORY OF VALENCE. ERROR BARS REPRESENT STANDARD ERRORS.	- 196 -
FIGURE 31. PROCEDURES FOR A) ENCODING PHASE AND B) RETRIEVAL PHASE FOR PICTURES ARE ILLUSTRATED HERE.	- 202 -
FIGURE 32. ELECTRODE LAYOUT CONFORMING TO THE 10-20 INTERNATIONAL SYSTEM. THE FOUR CLUSTERS, SEPARATED INTO RIGHT AND LEFT HEMISPHERE, ARE CIRCLED WITH DIFFERENT CONTINUOUS OR BROKEN LINES.	- 204 -
FIGURE 33. MEAN PROPORTION OF CORRECTED RECOGNITION OF PICTURES AS A FUNCTION OF GROUP (WBS INDIVIDUALS VS. TD CHILDREN) AND EMOTIONAL VALENCE (NEGATIVE VS. POSITIVE VS. NEUTRAL). ERROR BARS REPRESENT STANDARD ERRORS.	- 206 -
FIGURE 34. MEAN VALENCE RATING OF PICTURES AS A FUNCTION OF GROUP (WBS INDIVIDUALS VS. TD CHILDREN) AND EMOTIONAL VALENCE (NEGATIVE VS. POSITIVE VS. NEUTRAL). ERROR BARS REPRESENT STANDARD ERRORS.	- 207 -
FIGURE 35. DIFFERENCE WAVES FOR NEGATIVE MINUS NEUTRAL AND POSITIVE MINUS NEUTRAL PICTURES FOR CHILDREN AND ADOLESCENTS WITH WBS AT FRONTAL CLUSTER.	- 209 -

FIGURE 36. DIFFERENCE WAVES FOR POSITIVE OLD MINUS POSITIVE NEW AND NEUTRAL OLD MINUS NEUTRAL NEW PICTURES FOR CHILDREN AND ADOLESCENTS WITH WBS AT RIGHT FRONTO-CENTRAL CLUSTER.

- 212 -

Acronymes et abréviations

AMY : Amygdale

ANOVA : *Analysis of variance*

BIC : *Binding of item and context*

BMIS : *Brief mood introspection scale*

CBCL : *Child behavior checklist*

CCA : Cortex cingulaire antérieur

CI : *Confidence interval*

CMS : *Children's memory scale*

COF : Cortex orbitofrontal / OFC : *Orbitofrontal cortex*

CPF : Cortex préfrontal / PFC : *Prefrontal cortex*

CPH : Cortex para-hippocampique

CPP : Cortex pariétal postérieur

CPR : Cortex périrhinal

DAPS : *Developmental affective photo system*

Dm : *Difference due to memory*

DRM : Deese-Roediger-McDermott

DS : *Down syndrome*

DT : Développement typique / TD : *Typically developing*

DW : *Difference wave*

eCMR : *Emotional context maintenance and retrieval*

EEG : Electro-encéphalographie

EEM : *Emotional enhancement of memory*

EPN : *Early posterior negativity*

FA : *False alarm*

FAN : *French affective norms*

FANchild : *French affective norms for children*

FMATC : *Face mood assessment test for children*
FISH : *Fluorescent in situ hybridization*
HIT : *Correctly recognized item*
IAPS : *International affective picture system*
IRMf : Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle
ISI : *Inter-stimulus interval*
LPP : *Late positive potential*
LTM : Lobe temporal médian / MTL : *Medial temporal lobe*
M : *Mean*
PE : Potentiel évoqué / ERP : *Event-related potential*
RCF : *Rey complex figure*
REM : *Rapid eye movement*
RKG : *Remember, Know, Guess*
TEA-Ch : *Test of everyday attention for children*
TEP : Tomographie par émission de positons
TMT-A-B : *Trail making test A and B*
TSA : Trouble du spectre autistique / ASD : *Autism spectrum disorder*
SAM : *Self-assessment manikin*
SD : *Standard deviation*
SDNV : Syndrome de dysfonctions non-verbales / NLD : *Nonverbal learning disabilities*
SE : *Standard error*
SMS : *Self-Memory System*
SPI : *Serial, Parallel, Independant*
SWB : Syndrome de Williams-Beuren / WBS : *Williams-Beuren syndrome*
W : Window
WISC : *Wechsler intelligence scale for children*

Avant-propos

“The importance of emotion to the variety of human experience is evident in that what we notice and remember is not the mundane but events that evoke feelings of joy, sorrow, pleasure, and pain. Emotion provides the principal currency in human relationships as well as the motivational force for what is best and worst in human behavior.” R. J. Dolan - Emotion, Cognition, and Behavior (2002).

Bien que des siècles de recherche se soient attachés à dissocier les émotions de la cognition, les nouvelles approches adoptées dans le champ de la psychologie, des sciences cognitives et des neurosciences se sont majoritairement penchées sur les liens qui existent entre ces deux domaines. Il apparaît aujourd’hui que les émotions et la cognition interagissent intimement, par l’intermédiaire de mécanismes cognitifs et neurobiologiques variés, rendant possible l’émergence de comportements humains complexes. Notre mémoire et notre étonnante capacité à se souvenir d’évènements lointains de notre vie comme si « c’était hier » reflètent des aptitudes cognitives très développées chez l’Homme. Lorsqu’on se penche un peu plus sur ces souvenirs, on s’aperçoit qu’ils revêtent pour la grande majorité, une coloration émotionnelle, suggérant une forte influence des émotions sur l’une des fonctions cognitives les plus complexes. Il n’est, ainsi, pas étonnant de se souvenir avec détails des grands moments et étapes qui ont marqués notre vie avec son lot d’émotions fortes, en comparaison avec des évènements plus ordinaires de notre vie courante. Cette empreinte solide et durable qu’ont les émotions sur notre mémoire porte le nom de « *Emotional Enhancement of Memory* » (EEM) et a fait l’objet d’une grande variété d’études dans la littérature en psychologie et neurosciences cognitives. Il a, ainsi, été largement démontré que les évènements ou informations chargés en émotions, négatives ou positives, sont généralement mieux mémorisés que les évènements émotionnellement neutres, tant après une courte qu’une longue période de temps. Cette interaction entre émotions et mémoire s’opérerait à différents niveaux, à la fois comportemental et cérébral, et serait modulée par diverses facteurs cognitifs et phénoménologiques que nous aborderons dans ce travail de thèse. L’un des facteurs pouvant potentiellement influencer la nature de l’EEM est le développement ontogénétique. En effet, l’enfance est une période

charnière durant laquelle des modifications substantielles émergent au niveau du fonctionnement cérébral, en lien avec l'expérience de vie et l'environnement de l'enfant. Ces modifications vont notamment soutenir le développement cognitif et émotionnel de l'enfant jusqu'à l'âge adulte. Il paraît, ainsi, naturel de s'interroger sur les potentielles modulations de l'EEM chez les enfants, relatives à ces changements développementaux majeurs. Néanmoins, la plupart des études existantes à ce jour sur l'EEM se sont majoritairement limitées à l'analyse de la population adulte et donnent, par conséquent, très peu d'indications sur les spécificités de l'EEM durant le développement. L'un des objectifs de ce travail de thèse a donc été de combler ces lacunes par l'étude approfondie de l'EEM chez des enfants âgés entre 8 et 11 ans, grâce à des évaluations comportementales et neurophysiologiques. En outre, afin d'élargir nos connaissances sur l'EEM durant le développement, le deuxième objectif de ce travail de thèse s'est axé sur une approche neuropsychologique. Ainsi, ce travail s'est intéressé à l'étude de l'EEM chez des enfants et adolescents âgés entre 8 et 18 ans, présentant un trouble neuro-développemental appelé syndrome de Williams-Beuren (SWB). Le SWB est un trouble neuro-développemental rare lié à la perte accidentelle d'une vingtaine de gènes sur le chromosome 7. Cette micro-délétion est à l'origine de manifestations et d'atteintes multi-systémiques caractéristiques du syndrome, notamment une déficience intellectuelle légère à modérée ainsi qu'une personnalité très sociale et empathique. Aujourd'hui, bien qu'on ne puisse pas guérir de cette maladie, des prises en charge spécifiques sont développées, et ceci, le plus précocement possible, afin d'améliorer les capacités cognitives et la qualité de vie des personnes touchées par le syndrome. La mémoire et les émotions, ont notamment un statut particulier dans le syndrome puisque les aptitudes dans chacun de ces domaines sont dissociées suivant les mécanismes cognitifs mis en jeu. Ainsi, les performances en mémoire visuelle et auditivo-verbale semblent moins déficitaires que celles observées en mémoire visuo-spatiale. Concernant le traitement des émotions, les individus porteurs du syndrome semblent particulièrement sensibles et attirés par les émotions positives lorsqu'il s'agit d'interactions sociales, tandis que les émotions négatives semblent davantage les affecter dans un contexte environnemental non social. Ces particularités font du syndrome de Williams-Beuren un sujet d'étude privilégié pour analyser de façon plus approfondie les mécanismes cognitifs et émotionnels sous-tendant l'EEM et leur éventuelle modulation lors du développement atypique.

Ce travail de thèse s'est donc inscrit dans une démarche pluridisciplinaire, à la jonction entre psychologie expérimentale, neurophysiologie et neuropsychologie, permettant la production de

connaissances diversifiées sur l'émergence et la nature de l'EEM durant le développement typique et atypique. Afin de rendre compte des objectifs distincts de ce travail de thèse, cet ouvrage est scindé en trois parties principales. Les deux premières parties répondent respectivement à chacun des deux objectifs principaux qui sont l'analyse de l'EEM chez les enfants au développement typique dans un premier temps et chez les enfants et adolescents porteurs du SWB dans un second temps. Chacune de ces parties est composée de trois chapitres organisés de la façon suivante : un premier chapitre sur les aspects théoriques concernant la mémoire, les émotions et l'EEM dans la population d'intérêt, un deuxième chapitre sur les études expérimentales conduites avec cette population et présentées sous forme d'articles scientifiques, et un troisième chapitre contenant la discussion intermédiaire des conclusions et perspectives théoriques offertes dans cette partie. Finalement, la troisième et dernière partie de cet ouvrage présente la discussion générale des résultats révélés par l'analyse de l'EEM durant le développement typique et atypique, ainsi que la présentation des perspectives théoriques ouvertes par ce travail de thèse dans son ensemble.

Partie 1.

L'effet des émotions sur la
mémoire épisodique dans le
développement typique.

Chapitre 1.

Cadre théorique.

I. La mémoire épisodique

1. Définition et modèles théoriques de la mémoire épisodique

La mémoire épisodique fut évoquée pour la première fois en 1972 par le psychologue canadien Endel Tulving. Grâce à l'étude des pathologies de la mémoire, Tulving fit le postulat d'une division de la mémoire déclarative à long terme en deux systèmes de mémoire distincts : la mémoire épisodique et la mémoire sémantique. Depuis lors, de nombreux travaux de recherche en neurosciences et neuropsychologie ont corroboré cette approche structurale de la mémoire. Ainsi, la mémoire épisodique se réfère à la mémoire d'événements personnellement vécus et situés dans un contexte particulier. Un souvenir épisodique est notamment défini grâce à trois éléments principaux qui sont : son contenu « Quoi », son contexte spatial « Où » et son contexte temporel « Quand » d'acquisition. La mémoire épisodique repose donc essentiellement sur l'aspect contextuel unique des éléments qui la composent, à l'inverse de la mémoire sémantique qui représente la mémoire des faits et des concepts généraux sur le monde et qui ne dépend pas d'un contexte particulier d'acquisition.

Ces dernières années, divers modèles de mémoire ont vu le jour dans le but d'expliquer les mécanismes fonctionnels sous-tendant les différents systèmes de mémoire. Le modèle multi-systémique SPI (*Serial, Parallel, Independant*) créé par Tulving en 2001 (voir Figure 1) décrit le fonctionnement des processus mnésiques (encodage, stockage et récupération) de cinq systèmes de mémoire, dont la mémoire épisodique et sémantique. L'encodage correspond à la formation de la trace mnésique d'un événement, le stockage fait référence au maintien de cette trace mnésique et la récupération est le fait d'accéder et d'extraire la trace mnésique stockée. Ce modèle repose sur trois types de fonctionnement : le fonctionnement sériel du processus d'encodage, le fonctionnement

parallèle du processus de stockage et le fonctionnement indépendant de la récupération en mémoire. Ainsi, l'encodage des informations se produirait de façon hiérarchique avec l'accès au système le plus élevé, à savoir la mémoire épisodique, dépendant des opérations de traitement dans les systèmes inférieurs : la mémoire procédurale (ou mémoire des habiletés perceptivo-motrices), le système de représentation perceptive (SRP, ou mémoires perceptives), la mémoire sémantique et enfin, la mémoire de travail (manipulation d'une petite quantité d'informations durant une courte période de temps). Le stockage des informations se ferait ensuite parallèlement dans chaque système de mémoire et leur récupération aurait lieu de façon indépendante, sollicitant leur système de mémoire respectif. Par ailleurs, Tulving dissocie les différents systèmes de mémoire de son modèle par le niveau de conscience sur lequel ils reposent (Tulving, 2001). En effet, la mémoire épisodique nécessite un état de conscience dit *autonoétique*, c'est-à-dire le fait de prendre conscience de sa propre identité et de son existence (ou *self*) dans le temps subjectif s'étendant du passé au futur. Cet état de conscience permet, ainsi, à un individu de revivre l'épisode d'encodage dans son contexte original par le biais d'un voyage mental dans le temps. La mémoire sémantique et la mémoire de travail, quant à elles, sont associées à un état de conscience dit *noétique*, qui permet à un individu une conduite introspective sur le monde sans qu'il lui soit nécessaire de revivre l'épisode d'encodage. Enfin, les systèmes de mémoire hiérarchiquement inférieurs, à savoir la mémoire procédurale et les mémoires perceptives, ne reposent pas sur une prise de conscience des connaissances ni du contexte d'acquisition, et sont ainsi qualifiés d'*anoétiques*.

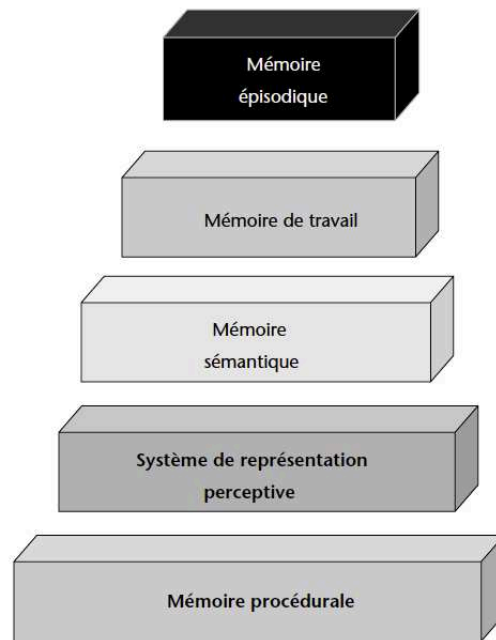


Figure 1. Modèle SPI (Serial, Parallel, Independent).

D'après Martins, Guillery-Girard, & Eustache, 2006.

Eustache & Desgranges (2008) et Eustache, Viard, & Desgranges (2016) ont étoffé par la suite le modèle SPI de Tulving avec l'appui d'études en neuropsychologie et neuro-imagerie, et ont créé le modèle MNESIS (*Memory NEo-Structural Inter-Systemic*). Ce modèle reprend notamment l'organisation hiérarchique des différents systèmes de mémoire de Tulving mais met l'accent sur les interactions réciproques qui existent entre ces systèmes, rendant compte du caractère dynamique et reconstitutif de la mémoire. Ainsi, bien que l'encodage en mémoire épisodique soit secondaire à l'encodage en mémoire sémantique, il existerait un processus de rétroaction de la mémoire épisodique vers la mémoire sémantique, désignant le fait que certains souvenirs épisodiques tendent à se « sémantiser » avec le temps. De même, une seconde rétroaction aurait lieu entre la mémoire épisodique et les mémoires perceptives, mettant en exergue les phénomènes de reviviscence conscients ou inconscients de souvenirs épisodiques, qui sont suivis par un nouvel encodage en mémoire et qui contribuent *in fine* à leur consolidation.

Une autre approche concernant la mémoire épisodique se focalise plutôt sur le type de connaissances que représentent les souvenirs épisodiques, leurs propriétés et les fonctions qu'ils servent (Conway, 2001, 2005). Selon Conway, les souvenirs épisodiques contiendraient un grand

niveau de détails sensoriels, perceptifs, cognitifs et affectifs liés à l'événement, et serviraient de base à la poursuite des buts actuels de l'individu. Cet auteur décrit les souvenirs épisodiques comme intégrés dans un système conceptuel dans lequel ils peuvent devenir la base de souvenirs autobiographiques, c'est-à-dire des connaissances référées à soi. Conway explique que la mémoire épisodique permettrait de se souvenir d'expériences personnelles récentes (de quelques minutes à quelques heures), tandis que la mémoire autobiographique serait liée à des souvenirs personnels anciens. En effet, l'accès aux souvenirs épisodiques serait perdu assez rapidement, sauf dans le cas où les souvenirs s'intégreraient au « *self* à long terme » qui représente l'ensemble des connaissances sémantiques personnelles servant à organiser les souvenirs de nos expériences personnelles et à garder une cohérence du soi. Ainsi, l'intégration de ces souvenirs dans le « *self* à long terme » permettrait leur maintien en mémoire autobiographique et, ainsi, leur persistance sur une plus longue période de temps (Conway, 2009). En d'autres termes, seuls les souvenirs épisodiques pertinents par rapport aux buts actuels de l'individu et sélectionnés par le *self* seraient retenus et maintenus en mémoire autobiographique.

Dans ce travail de thèse, la mémoire épisodique est appréhendée telle que définie dans le modèle de Tulving car la majorité des études connues à ce jour sur les facteurs pouvant influencer les processus mnésiques, particulièrement les facteurs émotionnels, se situent dans ce modèle théorique. L'effet des émotions sur la mémoire épisodique durant le développement étant la problématique principale de ce travail de thèse, il paraissait essentiel de confronter les nouvelles connaissances acquises dans ce domaine chez l'enfant avec une littérature chez l'adulte déjà existante et très développée.

2. Mémoire de l'item et mémoire associative

Comme nous l'avons vu, une des caractéristiques particulières de la mémoire épisodique est qu'elle est fondamentalement contextualisée. De ce fait, la mémoire épisodique associe différents éléments d'un épisode (« Quoi », « Où », « Quand ») pour former un souvenir global cohérent. Les études s'intéressant à la mémoire épisodique distinguent notamment différents composants du souvenir épisodique : le fait de se souvenir de l'émergence et du contenu d'un événement, généralement appelé mémoire de l'item, et le fait de se souvenir du contexte dans lequel l'événement s'est produit,

généralement appelé mémoire du contexte épisodique. Les détails contextuels peuvent être de différents types, formes ou modalités sensorielles, comme la période de temps ou le lieu d'émergence de l'événement, les personnes ou objets présents au cours de cet événement, les détails perceptifs et sensoriels de l'événement (couleur, forme, goût, son...), etc. L'association entre mémoire de l'item et mémoire du contexte épisodique est appelée mémoire associative, qui représente l'essence même du fonctionnement de la mémoire épisodique puisqu'elle nécessite d'associer le contenu de l'événement avec son contexte d'apparition. Cependant dans la littérature, l'évaluation de la mémoire épisodique pouvant se limiter à l'évaluation de la mémoire de l'item, dans ce travail de thèse, nous parlerons de la mémoire de l'item et de la mémoire associative afin de différencier ces composants principaux de la mémoire épisodique et de mieux appréhender ce qui constitue le sujet de ce travail de thèse, à savoir l'effet des émotions sur la mémoire épisodique.

Pour tester expérimentalement la mémoire de l'item, les paradigmes les plus communs utilisent des tâches de rappel et/ou de reconnaissance d'items (Yonelinas, 2002). Pour ces deux types de tâches, le participant doit dans un premier temps opérer une phase d'encodage d'items, puis restituer librement tous les items dont il se souvient dans le cas d'une tâche de rappel libre (ou restituer les items à l'aide d'indices spécifiques dans le cas d'une tâche de rappel indicé), ou discriminer les items anciens précédemment étudiés dans la phase d'encodage des items nouveaux jamais étudiés, dans le cas d'une tâche de reconnaissance. Ainsi, ces différentes tâches reposent sur des modes de récupération de l'information en mémoire qui leur sont propres. Le rappel libre repose notamment sur la capacité à restituer de façon auto-initiée des informations préalablement encodées, à l'aide de processus volontaires et contrôlés de récupération. La reconnaissance, en revanche, rend accessible à la conscience le souvenir épisodique en présentant à nouveau l'information préalablement encodée. Afin de rendre compte des processus cognitifs sous-tendant ces différents modes de récupération de l'information, Yonelinas propose, en 1994, le modèle *Dual-Process Signal Detection*. Selon ce modèle, le fait d'avoir un souvenir conscient et vivace d'un événement, composé de détails contextuels du moment de l'acquisition, reposerait sur le processus de recollection, ou remémoration. Les spécificités de cette recollection mnésique peuvent notamment être synthétisées en l'expression « Je me souviens ». A l'inverse, le fait d'avoir un souvenir reposant sur un sentiment de « déjà-vu », sans détails contextuels associés au souvenir, est lié au processus de familiarité, et fait plutôt écho au terme « Je sais ». Ainsi, la capacité de se rappeler d'une information nécessite principalement la mise en œuvre du processus de recollection tandis que la reconnaissance d'une

information peut à la fois engager le processus de recollection et celui de familiarité. Afin de distinguer l'implication de l'un ou l'autre processus dans une tâche de reconnaissance, le paradigme RKG (*Remember/Know/Guess*) a été développé (Tulving, 1985). Ce paradigme nécessite qu'au moment de la reconnaissance d'un item, le participant fasse état de l'expérience subjective accompagnant cet item. Ainsi, le participant répond « *Remember* » (R) s'il a un souvenir conscient de l'item associé à des détails contextuels liés à l'encodage, reflétant une véritable recollection épisodique, ou répond « *Know* » (K) si la reconnaissance est associée au processus de familiarité, sans accès aux informations relatives au contexte d'acquisition. La réponse « *Guess* », en revanche, évoque l'incertitude du participant concernant la reconnaissance d'un item, et n'est donc pas liée à un processus mnésique spécifique.

D'autres protocoles expérimentaux incluant des tâches de reconnaissance sont allés au-delà de la seule évaluation subjective et introspective du participant telle que mesurée dans le paradigme RKG, et ont proposé des mesures plus objectives grâce au paradigme de mémoire associative, autrement appelé paradigme de mémoire de source (Johnson, Hashtroudi, & Lindsay, 1993). Ce paradigme consiste à interroger le participant, au moment de la reconnaissance d'un item cible, sur un ou plusieurs détails contextuels qui étaient associés à cet item durant l'encodage. Ces détails contextuels peuvent, par exemple, faire référence à la voix avec laquelle l'item a été prononcé durant l'encodage dans le cas d'items verbaux, ou le cadre dans lequel l'item a été présenté dans le cas d'items visuels. Ainsi, ce paradigme permet une évaluation objective du processus de recollection lorsque le participant est capable de se souvenir à la fois de l'item et de son contexte d'acquisition, ou du processus de familiarité lorsque le participant se souvient de l'item sans les détails contextuels associés. Outre l'évaluation de ces deux processus mnésiques, ce paradigme permet d'avoir une évaluation plus précise de la mémoire épisodique dans sa globalité, en tenant compte de ses deux composants principaux qui sont la mémoire de l'item et la mémoire associative, lesquels suscitent un intérêt particulier dans ce travail de thèse.

3. Bases neuro-anatomiques de la mémoire épisodique

L'avènement et le développement de techniques de neuro-imagerie, comme l'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf) ou la tomographie par émission de positons (TEP), ont largement contribué à la connaissance des structures et fonctions cérébrales qui sous-tendent la

mémoire déclarative à long terme, dont la mémoire épisodique. Ainsi, de nombreuses régions largement distribuées dans le cerveau supportent la mémoire déclarative et sont spécifiquement activées suivant les processus mnésiques mis en jeu. L'une des régions principales est notamment le lobe temporal médian (LTM) regroupant un ensemble de structures cérébrales interconnectées, dont l'hippocampe et les aires corticales proches comme le cortex entorhinal, périrhinal (CPR) et para-hippocampique (CPH). Les informations transférées vers ces structures proviennent d'aires corticales associatives présentant une forte intégration des différentes modalités sensorielles. Les premières structures à recevoir ces informations sont le CPR et CPH puis le cortex entorhinal et finalement l'hippocampe (Lavenex & Amaral, 2000). Le modèle BIC (*Binding of Item and Context*) proposé par Diana, Yonelinas et Ranganath en 2007, stipule que le CPR et le CPH traiteraient respectivement les informations sur l'item et le contexte tandis que l'hippocampe servirait à associer ces différentes informations afin de créer un souvenir épisodique complexe et cohérent. Ainsi, selon ce modèle, le CPR serait davantage associé à la mémoire de l'item et au processus de familiarité, et l'hippocampe serait plutôt associé à la mémoire associative et au processus de recollection. En accord avec ce modèle, une revue récente de Yonelinas, Ranganath, Ekstrom, & Wiltgen (2019) souligne le rôle majeur de l'hippocampe dans le processus de recollection, en revanche, ces auteurs évoquent plutôt l'implication du néocortex dans le processus de familiarité. En outre, l'hippocampe est également engagé dans un circuit neuronal fondamental à l'intégration et la consolidation de souvenirs déclaratifs : le circuit de Papez. Ce circuit, incluant l'hippocampe, l'hypothalamus, les noyaux antérieurs du thalamus et le gyrus cingulaire, a d'ailleurs été initialement considéré par le neuroanatomiste américain James Papez comme le circuit des émotions et des comportements émotionnels. Nous reviendrons sur celui-ci lorsque nous évoquerons les mécanismes de traitement des émotions dans le sous-chapitre II qui va suivre.

Par ailleurs, de nouvelles études ont souligné le rôle d'autres régions cérébrales dans la mémoire épisodique, telles que le cortex préfrontal (CPF) et le cortex pariétal postérieur (CPP) (pour une revue, voir Ekstrom & Yonelinas, 2020). En effet, l'implication du CPF dans la mémoire déclarative, en interaction avec le LTM, a été largement démontrée dans la littérature (pour des revues voir, Simons & Spiers, 2003 et Moscovitch, Cabeza, Winocur, & Nadel, 2016). Le CPF permettrait notamment de contrôler en amont les processus d'encodage et d'élaborer des représentations mnésiques qui seront ensuite stockées en mémoire à long terme via le LTM. Lors de la récupération, l'interaction entre CPF et LTM aiderait, entre autres, à la spécification d'indices

de récupération, à l'évaluation du stock de connaissances et à la réactivation et vérification des informations stockées. Des études en neuropsychologie et en neuro-imagerie, incluant des personnes présentant des lésions du lobe frontal, ont également mis en exergue le rôle majeur du CPF dans la capacité à se souvenir des détails contextuels d'un événement et donc dans le bon fonctionnement de la mémoire associative (Simons & Spiers, 2003 ; Ranganath, Cohen, Dam, & D'Esposito, 2004 ; Mitchell & Johnson, 2009). En outre, il apparaît que le CPP serait aussi impliqué dans la récupération mnésique ainsi que dans l'expérience subjective associée au processus de recollection (pour des revues, voir Cabeza, Ciaramelli, Olson, & Moscovitch, 2008 ; Mitchell & Johnson, 2009 et Shimamura, 2011).

4. Le développement de la mémoire

Les modèles et concepts théoriques développés pour rendre compte du fonctionnement de la mémoire se sont majoritairement basés sur des observations recueillies chez l'adulte. Néanmoins, le développement ontogénétique des différents systèmes de mémoire a suscité l'intérêt de certains auteurs, dont Tulving, qui s'est penché sur les fondements de la mémoire dans son modèle SPI de 2001. En effet, selon cet auteur, la mémoire se développerait progressivement depuis la mise en place du système le plus inférieur, à savoir la mémoire procédurale, jusqu'à l'émergence du système le plus élaboré représenté par la mémoire épisodique. Ainsi, la mise en place plus précoce des systèmes les plus élémentaires servirait de base au développement plus tardif de la mémoire épisodique chez l'enfant.

Depuis, plusieurs auteurs se sont intéressés au développement de la mémoire épisodique chez l'enfant, s'accordant sur le fait que celle-ci deviendrait fonctionnelle aux environs de 5-6 ans et évoluerait de façon importante jusqu'au milieu de l'adolescence (pour des revues, voir Picard, Eustache, & Piolino, 2009 et Dégeilh, Eustache, & Guillery-Girard, 2015). Avant cet âge, les enfants ne sembleraient pas pouvoir former efficacement de souvenirs épisodiques dû à leur incapacité d'associer les informations mémorisées à des expériences conscientes de remémoration (Perner, 2000). L'expérience subjective accompagnant les souvenirs épisodiques, associée aux processus de familiarité et de recollection, a notamment fait l'objet d'études au cours du développement. En effet, ces deux processus suivraient une trajectoire développementale différente : la récupération du souvenir basée sur la familiarité deviendrait optimale vers l'âge de 8

ans tandis que celle basée sur la recollection suivrait un développement lent jusqu'à l'âge adulte (pour une revue, voir Alibrán, Angel, Bouazzaoui, Gomot, & Isingrini, 2018). Ainsi, la conscience *autonoétique* décrite par Tulving et associée au processus de recollection, se mettrait en place progressivement au cours du développement, en lien avec l'évolution des capacités mnésiques épisodiques (Martins, Guillery-Girard, & Eustache, 2006 ; Piolino, Hisland, Ruffevelle et al., 2007).

En outre, afin de rendre compte des capacités des enfants à se souvenir du contexte associé à l'événement, inhérent au fonctionnement de la mémoire épisodique, des études ont évalué la trajectoire développementale des différents éléments constitutifs d'un souvenir épisodique (« Quoi », « Où », « Quand ») (Guillery-Girard, Martins, Deshayes, et al., 2013 ; Lee, Wendelken, Bunge, & Ghetti, 2016 ; Picard, Abram, Orriols, & Piolino, 2017). Il apparaît, ainsi, que la mémorisation efficace du contenu, du contexte spatial ou du contexte temporel d'une information, se développerait de façon conjointe depuis l'âge de 6 ans jusqu'en cours d'adolescence, mais arborerait une trajectoire développementale propre à chaque élément. En effet, la récupération efficace du contenu du souvenir émergerait plus rapidement que celle du contexte spatial et temporel, tout en continuant à se développer avec l'âge. La mémoire de l'item serait donc efficiente plus précocement que la mémoire associative qui serait plus complexe à acquérir pour les enfants et augmenterait au-delà de 10 ans. Plus de précisions sur les études s'étant intéressées au développement de la mémoire épisodique en lien avec ses différents composants sont données dans l'introduction de l'Article 1 (Massol, Vantaggio, & Chainay, 2020 ; Partie 1, Chapitre 2, sous-chapitre I).

L'émergence progressive de la mémoire épisodique repose notamment, dans le cadre du modèle de Tulving, sur le fonctionnement relativement opérationnel de la mémoire sémantique. Ainsi, l'enrichissement important de la mémoire sémantique d'unités d'informations dans les premières années de vie, va permettre de structurer et de donner du sens aux souvenirs épisodiques, et finalement améliorer les procédures d'accès en mémoire à long terme. L'augmentation des performances mnésiques observées au-delà de 6 ans peut également dépendre du développement conjoint d'autres habiletés cognitives, comme les fonctions exécutives, la théorie de l'esprit et la méta-mémoire. En effet, le fait de prendre conscience de son fonctionnement et de développer des stratégies mnémotechniques adaptées à la situation, participerait à l'amélioration des capacités de

stockage et de récupération de l'information chez les enfants (pour des revues, voir Raj & Bell, 2010 et Ofen, 2012).

Pour finir, le développement de la mémoire dépend de la maturation cérébrale et du développement fonctionnel de réseaux neuronaux. Les études neuro-développementales ayant eu recours à la neuro-imagerie, ont pointé deux régions clés dans le développement de la mémoire épisodique et qui sont caractérisées par un délai de maturation et de développement fonctionnel propre : l'hippocampe, au sein du LTM, et le CPF. Bien que les premières études soulignent la maturation relativement précoce de l'hippocampe au cours des premières années de vie (e.g., Seress, Abraham, Tornoczky, & Kosztolanyi, 2001), de nouvelles études tendent à montrer que certaines subrégions de l'hippocampe suivraient un développement structurel plus lent, en lien avec le développement des capacités mnésiques (DeMaster, Pathman, Lee, & Ghetti, 2014 ; Lee, Fandakova, Johnson, Cohen, Bunge, & Ghetti, 2019). Ainsi, les meilleures performances en mémoire épisodique seraient associées à un plus gros volume de la partie postérieure de l'hippocampe chez les enfants âgés de 8 à 11 ans, et à un plus petit volume de la partie antérieure et un plus gros volume de la partie médiane chez les adultes (DeMaster et al., 2014). De plus, une récente étude de Lee et al. (2019) montre que la capacité de se souvenir des différents éléments constitutifs de la mémoire épisodique (« Quoi », « Où », « Quand ») serait sous-tendue par des subrégions distinctes de l'hippocampe, spécifiques à chaque élément, et qui disposeraient d'un délai de maturation propre au cours du développement. Contrairement à l'hippocampe pour lequel la trajectoire développementale suscite encore des interrogations, de nombreuses études s'accordent sur une maturation lente et progressive du CPF jusqu'à la fin de l'adolescence (e.g., Gogtay, Giedd, Lusk, et al., 2004). Au niveau fonctionnel, DeMaster & Ghetti (2013) ont montré que la récupération correcte en mémoire associative était associée à l'activation de l'hippocampe postérieur chez des enfants âgés de 8 à 11 ans, et de l'hippocampe antérieur chez des jeunes adultes, suggérant un déplacement de l'activité le long de l'axe antérieur/postérieur de l'hippocampe avec l'âge. En outre, une étude de Ofen, Kao, Sokol-Hessner, et al. (2007) réalisée chez des individus âgés entre 8 et 24 ans, montre une augmentation de l'activation du CPF avec l'âge, associée à la récupération correcte d'images en mémoire. De plus, l'activation du CPF était corrélée avec les meilleures capacités de recollection (restitution de détails associés au contexte de l'encodage) avec l'âge. Ofen, Chai, Schuil, Whitfield-Gabrieli, & Gabrieli (2012) et Tang, Shafer, & Ofen (2018) soulignent également une augmentation de la connectivité fonctionnelle entre le CPF et les structures du LTM au cours du

développement, associée aux performances en mémoire. Dans l'ensemble, la maturation structurale et fonctionnelle de l'hippocampe et du CPF ainsi que leur interaction, seraient donc liées à la mise en place progressive des différents composants de la mémoire épisodique avec l'âge. Il convient, néanmoins, de noter que le LTM et le CPF ne sont pas les seules régions impliquées dans le développement de la mémoire épisodique, l'augmentation des performances en mémoire a également été associée à l'activation graduelle du CPP avec l'âge (DeMaster & Ghetti, 2013 ; Ofen et al., 2012).

En résumé

Dans ce sous-chapitre, nous avons décrit la mémoire épisodique telle que définie par Tulving, à savoir une mémoire fondamentalement contextualisée associant différents éléments d'un évènement (« Quoi », « Où », « Quand ») et reposant sur un état de conscience *autonoétique* qui permet à un individu de prendre conscience de son identité et de voyager mentalement dans le temps afin de revivre l'épisode original d'un souvenir. Ontogénétiquement, la mémoire épisodique deviendrait fonctionnelle vers 5 ans mais la capacité à rappeler des évènements personnels, riches en détails contextuels, connaîtrait un développement important jusqu'en cours d'adolescence. En particulier, au cours du développement, l'accès aux représentations mnésiques reposerait de plus en plus sur le processus de recollection, c'est-à-dire le souvenir conscient et vivace d'un évènement, et de moins en moins sur le simple processus de familiarité. Par ailleurs, les capacités de récupération des informations contextuelles se développeraient plus tardivement que celles liées à la récupération du contenu du souvenir, entraînant la mise en place plus lente au cours du développement de la mémoire associative comparativement à la mémoire de l'item. Ce développement progressif de la mémoire épisodique serait également lié à la maturation lente des régions cérébrales impliquées dans les processus de mémorisation et de leur connectivité, notamment l'hippocampe, au sein du LTM, et le CPF. En outre, si les aspects théoriques relatifs à la mémoire épisodique ainsi que son développement ontogénétique ont été présentés dans ce sous-chapitre, les facteurs pouvant influencer l'efficacité et la qualité des processus mnésiques n'ont cependant pas été évoqués. Un des facteurs connus dans la littérature comme ayant une grande influence sur la mémoire épisodique est notamment le facteur émotionnel. Avant de se pencher sur l'influence que peuvent avoir les émotions sur la mémoire, objet principal de ce travail de thèse, le sous-chapitre suivant va en premier lieu s'attacher à présenter les aspects théoriques concernant les émotions ainsi que leur développement ontogénétique.

II. Le traitement des émotions

1. Théories des émotions

De nombreux débats et théories ont animé et animent encore aujourd'hui la recherche dans le domaine des émotions, si bien que plusieurs modèles théoriques ont vu le jour depuis plusieurs années, censés rendre compte de la nature des émotions et des changements comportementaux et physiologiques engendrés lors d'une réponse émotionnelle (pour une revue, voir Barrett, Mesquita, Ochsner, & Gross, 2007 et Izard, 2009). Les principaux modèles sont notamment la théorie des émotions discrètes proposée par Ekman (1992), qui délimite l'évolution, la cognition et la physiologie d'émotions uniques telles que la joie ou la colère, le modèle dimensionnel proposé par Russell (1980) décrit ci-après, et la théorie de l'évaluation cognitive ou *appraisal* proposée par Sander, Grandjean, & Scherer, (2005), qui place l'extraction du sens au centre de l'expérience émotionnelle finale, notamment en lien avec la pertinence personnelle. Chacun de ces modèles ont une conception propre des émotions, bien que les dimensions d'agréabilité et d'éveil physiologique soient communes entre les modèles. Nous reviendrons sur ces dimensions lorsque nous détaillerons ci-dessous le modèle de Russell, qui les place au centre du système émotionnel. L'intérêt que ce travail de recherche porte à ce modèle est lié au fait que la plupart des travaux réalisés dans le domaine des effets des émotions sur la mémoire repose sur l'existence de ces deux dimensions.

En premier lieu, comment sont définies les émotions dans la littérature ? Bien qu'il n'existe pas de définition unique des émotions, dû à la variation de point de vue théorique les concernant, Kleinginna & Kleinginna (1981) ont suggéré une définition opératoire à partir de la classification et de l'analyse de 92 définitions : « Les émotions sont le résultat de l'interaction de facteurs subjectifs et objectifs, réalisés par des systèmes neuronaux ou endocriniens, qui peuvent : a) induire des expériences telles que des sentiments d'éveil, de plaisir ou de déplaisir ; b) générer des processus cognitifs tels que des réorientations pertinentes sur le plan perceptif, des évaluations, des étiquetages ; c) activer des ajustements physiologiques globaux ; d) induire des comportements qui sont, le plus souvent, expressifs, dirigés vers un but et adaptatifs ». Si les émotions ont beaucoup

été étudiées en lien avec leur caractère primitif et adaptatif censé servir les comportements de survie et de bien-être des organismes vivants (LeDoux, 2012), récemment LeDoux et Hofmann (2018) ont restreint l'utilisation du terme « émotion » à l'unique composante d'expérience subjective chez l'Homme. Dans leur *current opinion*, ils expliquent que les manifestations objectives comportementales, corporelles et neurologiques ne sont que les indicateurs indirects des expériences émotionnelles personnelles.

Selon le modèle dimensionnel de Russel (*Circumplex model*, 1980), les expériences émotionnelles sont représentées dans un espace affectif à deux dimensions : celle de la valence émotionnelle et celle de l'arousal (aussi appelé éveil physiologique ou niveau d'activation). Selon Russel, ces dimensions peuvent être représentées par deux grands axes orthogonaux avec l'axe horizontal représentant la valence émotionnelle sur un continuum allant d'une valeur négative/déplaisante à une valeur positive/plaisante, avec la valeur neutre en tant qu'intermédiaire, et l'axe vertical représentant l'arousal sur un continuum allant d'une valeur calme/apaisante à une valeur agitée/éveillante (voir Figure 2). Russel postule que ces deux dimensions représenteraient des systèmes neurophysiologiques indépendants qui seraient à l'origine de l'émergence de tous les états affectifs. Ainsi, chaque expérience émotionnelle serait la conséquence de la combinaison linéaire de ces deux systèmes, qui serait ensuite représentée par une émotion particulière. Par exemple, selon cette approche, la peur est conceptualisée comme un état neurophysiologique impliquant la combinaison d'une valence négative et d'un niveau d'activation accru. L'expérience subjective de la peur découlerait ainsi des interprétations cognitives de ces changements neurophysiologiques en réponse à une stimulation spécifique de l'environnement (pour une revue, voir Posner, Russel, & Peterson, 2005).

Comme mentionné ci-dessus, les dimensions de la valence émotionnelle et de l'arousal étant largement étudiées en lien avec la modulation émotionnelle de divers processus cognitifs dans la littérature, ce travail de thèse portera un intérêt particulier à l'interaction qui existe entre ces dimensions et les processus mnésiques. Nous reviendrons sur ces aspects dans le sous-chapitre III qui va suivre.

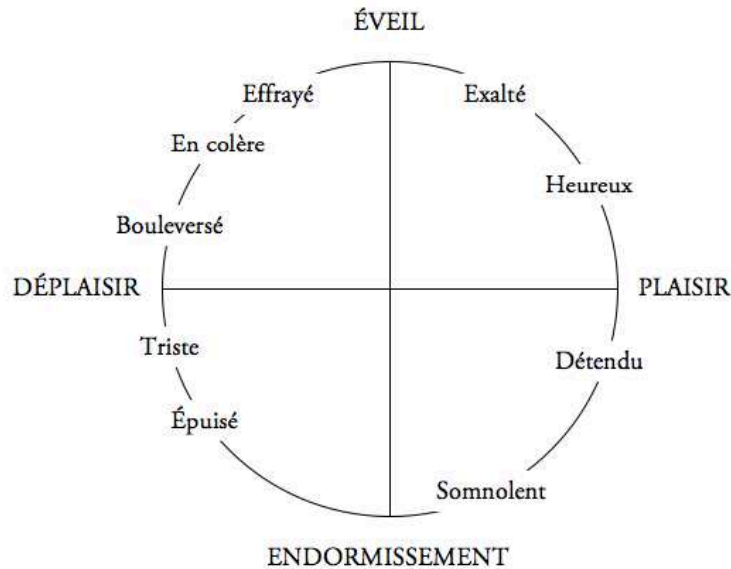


Figure 2. Dimensional model of core affect.

Adapté de Russel, 2003.

Basées sur l'approche bidimensionnelle, des méthodes d'évaluation de l'arousal et de la valence, reposant sur des déclarations verbales personnelles, se sont développées afin de rendre compte de l'expérience émotionnelle subjective évoquée par des stimuli spécifiques. L'échelle SAM (*Self-Assessment Manikin* – Lang, 1980) permet notamment d'évaluer un stimulus selon ces deux dimensions distinctes sur une échelle allant de 1 (très négatif ou peu éveillant) à 9 (très positif ou très éveillant). Grâce à cette méthode, plusieurs auteurs ont proposé des tâches d'évaluation du niveau de valence ou d'arousal de stimuli à de larges échantillons de volontaires, adultes ou enfants. Ceci dans le but de créer de grandes banques de stimuli utilisables pour des travaux de recherche sur les émotions. Ainsi, les stimuli de ces banques disposent d'une valeur moyenne pour l'arousal et la valence, censée être représentative de l'expérience émotionnelle subjective ressentie face à ces stimuli. L'une des banques de stimuli très utilisée dans la littérature est la banque d'images internationale IAPS (*International Affective Picture System*) créée par Lang, Bradley, & Cuthbert (1997), et adaptée pour les enfants par Cordon, Melinder, Goodman, & Edelstein en 2013 (DAPS - *Developmental Affective Photo System*). Très récemment, Zamora, Richard's, Introzzi, et al. (2020) ont également adapté pour les enfants la banque d'images NAPS (*Nencki Affective Picture System*) initialement créée pour les adultes. Néanmoins, l'expérience émotionnelle subjective pouvant être très variable d'une personne à une autre, ces banques de stimuli ne donnent qu'une

idée générale des émotions subjectives évoquées par les stimuli, et peuvent être agrémentées de mesures plus objectives, notamment des mesures en neuro-imagerie.

2. Bases neuro-anatomiques des émotions

Avec la multiplicité des études en neuro-imagerie, notamment en IRMf et en TEP, de nouvelles perspectives ont pu être dégagées concernant les processus émotionnels et les régions cérébrales qui les sous-tendent. Ainsi, les régions cérébrales initialement intégrées dans le circuit de Papez en 1937 puis élargies dans ce que Paul MacLean proposa être le *système limbique* en 1949, ont pu être confirmées et complétées au cours des dernières années. Les principales structures et aires cérébrales retenues aujourd'hui comme étant essentielles aux processus émotionnels sont notamment l'amygdale, l'hypothalamus, le cortex cingulaire antérieur (CCA) et le CPF (voir Figure 3) (pour des revues, voir Dalgleish, 2004 et Pessoa, 2017). Ainsi, l'amygdale, structure sous-corticale localisée au niveau du LTM, a notamment un rôle central dans le traitement de tous les stimuli ayant une valence émotionnelle, positive ou négative, bien que les premières études aient restreint son activité au seul traitement des émotions négatives, notamment de la peur (Phelps & LeDoux, 2005). Le rôle clé de l'amygdale dans le traitement des émotions réside notamment dans ses nombreuses connexions réciproques avec une multitude de régions cérébrales, dont les aires sensorielles associatives (visuelles, auditives...) qui lui permettent de recevoir et de renforcer les représentations neuronales de stimuli émotionnels. Elle dispose également d'une forte connectivité avec le CPF et le CCA qui vont venir moduler son activité et ainsi réguler la réponse émotionnelle. Au-delà du concept de valence, d'autres études montrent que l'amygdale serait principalement impliquée dans le traitement de stimuli de l'environnement pertinents pour les buts et les besoins d'un individu (pour une revue, voir Cunningham & Brosch, 2012). Dans la même optique, il a été proposé que le CPF conserverait les représentations des buts et des besoins qui vont aider aux processus de prise de décision basée sur les émotions (Davidson, 2003). Pour finir, l'hypothalamus serait à l'origine de modifications du système nerveux autonome (transpiration, accélération du rythme cardiaque...) qui s'opèrent grâce à la sécrétion d'hormones lors d'une réponse émotionnelle, et serait, tout comme l'amygdale et le CPF, aussi impliqué dans le circuit de la récompense.

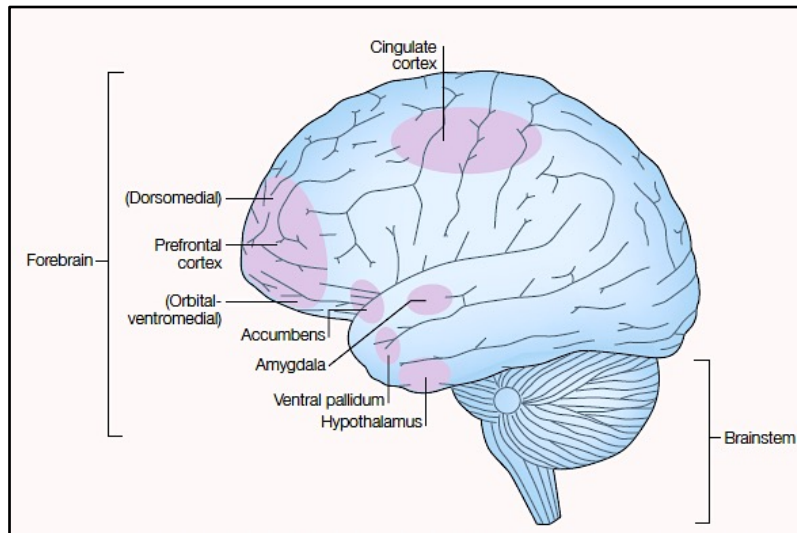


Figure 3. Vue latérale de certaines structures cérébrales clés dans le traitement des émotions.

D'après Dalgleish, 2004.

Par ailleurs, différentes théories stipulent que le traitement des émotions repose sur une activité asymétrique du cerveau (Alves, Fukusima, & Aznar-Casanova, 2008). Notamment, l'hypothèse de l'hémisphère droit (*right-hemisphere hypothesis*) propose que cet hémisphère serait plus spécialisé dans la perception, l'expression et le ressenti des émotions comparativement à l'hémisphère gauche. Autrement, l'hypothèse de la valence différentielle (*valence hypothesis*) déclare que l'asymétrie hémisphérique dans le traitement des émotions dépend de la valence émotionnelle de l'information. Selon cette hypothèse, l'hémisphère droit serait principalement associé au traitement des stimuli négatifs tandis que l'hémisphère gauche serait plutôt associé à celui des stimuli positifs.

3. Corrélats neuronaux des émotions (EEG)

L'une des techniques de neuro-imagerie particulièrement appropriée pour évaluer les corrélats neuronaux impliqués dans le traitement des émotions est la technique d'électro-encéphalographie (EEG). De plus, cette technique permet de mesurer efficacement l'influence des émotions sur divers processus cognitifs, notamment la mémoire, et sera utilisée dans l'un des protocoles expérimentaux de ce travail de thèse. Avant de se pencher sur les corrélats neuronaux reflétant l'influence des émotions sur la mémoire (sous-chapitre III), nous allons présenter dans le

paragraphe suivant les spécificités de cette technique et comment elle permet l'évaluation neurophysiologique des processus émotionnels.

L'EEG est une technique de neuro-imagerie qui permet d'évaluer les corrélats neuronaux impliqués dans une variété de processus cognitifs et de traitement des émotions, grâce à la mesure de l'activité électrique du cerveau. Les avantages principaux de cette technique sont qu'elle possède des capteurs non-invasifs et une excellente résolution temporelle, de l'ordre de la milliseconde, qui permet une exploration précise de la dynamique temporelle des processus mentaux. La limite majeure est, cependant, la résolution spatiale restreinte qui se limite à la surface du cortex et rend difficile l'identification de structures sous-corticales impliquées dans ces processus. Néanmoins, ces dernières années, l'augmentation du nombre de capteurs associée au développement de méthodes de localisation de sources, tend à compenser cette difficulté. L'une des techniques issues de l'EEG, permettant d'évaluer les réponses émotionnelles cérébrales, est la technique des potentiels évoqués (PE). Les PE désignent les modifications cérébrales électriques consécutives à la présentation de stimuli. Ces signaux électriques étant généralement très faibles, de l'ordre du micro-Volt, il est nécessaire de répéter les stimulations un grand nombre de fois, afin de pouvoir extraire l'activité électrique moyenne évoquée par ces stimulations. Cette activité électrique moyenne constitue un PE et peut être découpée en différents composants électro-physiologiques représentatifs des processus cognitifs mis en jeu. Ces composants, qui sont sous forme d'ondes, se différencient les uns des autres par leur forme, leur amplitude, leur latence (intervalle de temps entre la présentation du stimulus et l'apparition de l'onde), et leur répartition topographique à la surface du scalp (Luck, 2014).

Certains composants sont connus dans la littérature pour être modulés par le contenu émotionnel des stimuli, allant de composants précoces apparaissant aux alentours de 100ms après la présentation du stimulus, à des composants plus tardifs émergeant au-delà de 300ms (pour des revues, voir Olofsson, Nordin, Sequeira, & Polich, 2008 et Pourtois, Schettino, & Vuilleumier, 2013). Parmi les composants précoces, les composants P1 et N1 apparaissant entre 100 et 200ms après la présentation du stimulus au niveau occipito-temporal, sont particulièrement amplifiés lors de la présentation de stimuli émotionnels, surtout négatifs, et reflèteraient le traitement perceptif précoce des stimuli émotionnels au niveau du cortex visuel extrastrié. Un autre composant plus tardif et représentatif d'un traitement émotionnel est l'EPN (*Early Posterior*

Negativity). Ce composant est représenté par une déflexion négative apparaissant entre 250 et 300ms après la présentation du stimulus au niveau des sites postérieurs, notamment du cortex visuel, et plus négative pour les stimuli émotionnels ayant un fort arousal par rapport aux stimuli neutres (voir Figure 4). Ce composant refléterait principalement le recrutement de processus perceptifs additionnels pour le traitement des stimuli émotionnels par rapport aux stimuli neutres (pour une revue voir Schupp, Flaisch, Stockburger, & Junghöfer, 2006).

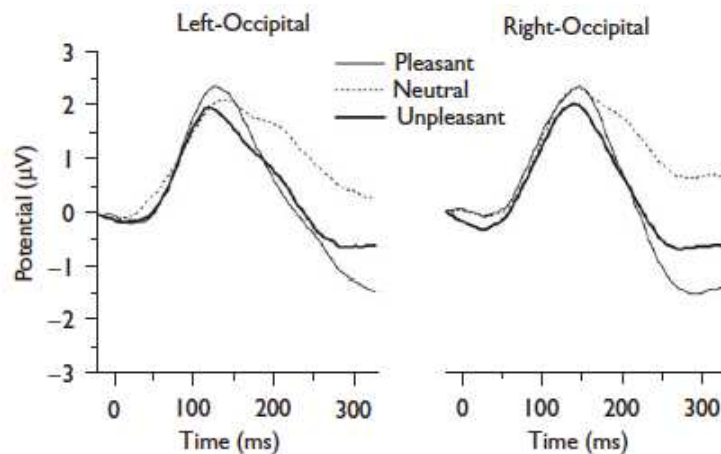


Figure 4. Représentation de l'EPN en réponse à des images positives, négatives et neutres, au niveau occipital gauche et droit.

D'après Schupp, Junghöfer, Weike, & Hamm, 2003.

Finalement, un composant tardif connu dans la littérature pour refléter un plus grand engagement attentionnel envers les stimuli émotionnels, est appelé potentiel positif tardif ou LPP (*Late Positive Potential*, parfois LPC pour *Late Positive Component*) (Cuthbert, Schupp, Bradley, Birbaumer, & Lang, 2000). Le LPP est largement distribué à la surface du scalp mais dispose d'une amplitude maximale au niveau de la région centro-pariétale. Il apparaît aux alentours de 300ms suivant la présentation du stimulus et peut durer le temps de la présentation de celui-ci. Il correspond à une déflexion plus positive lors du traitement de stimuli émotionnels (négatifs et positifs) comparativement au traitement de stimuli neutres, dénués d'émotions, et son activité peut être modulée par des stratégies intentionnelles de régulation des émotions (voir Figure 5) (pour des revues, voir Schupp et al., 2006 ; Olofsson et al., 2008 et Hajcak, MacNamara, & Olvet, 2010).

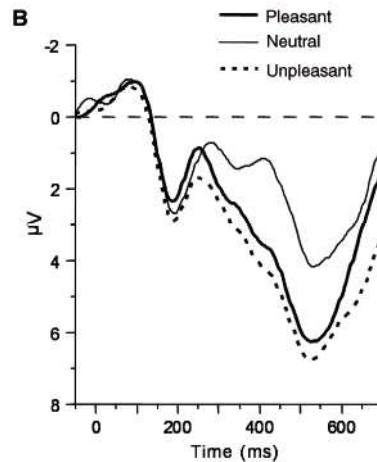


Figure 5. Représentation du LPP en réponse à des images positives, négatives et neutres, au niveau pariétal droit. Les valeurs négatives sont représentées vers le haut.

D'après Schupp, Flaisch, Stockburger, & Junghöfer, 2006.

En outre, des auteurs ont proposé que la variation topographique du LPP pouvait être liée à la contribution relative de l'arousal et de la valence des informations. En effet, selon Dolcos & Cabeza (2002), l'arousal des informations modulerait le LPP au niveau pariétal tandis que la valence émotionnelle entrainerait des modifications au niveau fronto-central. Par ailleurs, Liu, Huang, McGinnis-Deweese, Keil, & Ding (2012) ont analysé les structures cérébrales contribuant à la génération et à la modulation du LPP. Ces auteurs ont montré que l'amplitude du LPP était associée à l'activation d'une variété de régions corticales et sous-corticales liées au traitement émotionnel comme le cortex visuel, temporal et orbitofrontal ainsi que l'amygdale et l'insula antérieure. Ces résultats soulignent ainsi la pertinence de la technique des PE dans l'analyse des réponses émotionnelles. Par ailleurs, le LPP a également été associé aux processus mnésiques, et plus particulièrement à la mémorisation de stimuli émotionnels (sous-chapitre III). C'est pourquoi nous porterons un intérêt particulier à ce composant électro-physiologique dans ce travail de thèse.

4. Le développement des émotions

Le développement des processus émotionnels et leur régulation ont fait l'objet de nombreuses études ces dernières années, incluant des évaluations comportementales, physiologiques et

neuronales (pour une revue, voir Michalska & Davis, 2019). McManis, Bradley, Berg, Cuthbert, & Lang (2001) ont notamment évalué les réactions subjectives et physiologiques en réponse à des images émotionnelles tirées de la banque d'images IAPS, chez des enfants âgés de 7 à 11 ans, des adolescents âgés de 12 à 14 ans et des jeunes adultes. Les auteurs ont montré que les enfants et adolescents évaluaient la valence et l'arousal des images de la même façon que les adultes, révélés par de fortes corrélations de ces évaluations entre les trois groupes. De plus, les réactions physiologiques des enfants étaient liées à la valence des images : les images négatives entraînaient une plus grande activité du muscle corrugateur du sourcil et une plus grande décélération cardiaque par rapport aux images positives.

Sur le plan comportemental, les enfants semblent présenter le même biais attentionnel vers les stimuli négatifs ou menaçants que les jeunes adultes (pour une revue, voir Morales, Fu, & Perez-Edgar, 2016). En effet, LoBue & DeLoache (2008) ont montré que des enfants âgés de 3 à 5 ans sont capables de détecter plus rapidement les stimuli menaçants par rapport aux stimuli neutres, lorsqu'ils sont entourés de stimuli distracteurs. Ces auteurs ont également montré dans une étude ultérieure que ce biais envers les stimuli menaçants apparaîtrait très tôt au cours du développement puisqu'il semblerait être déjà présent chez des enfants âgés entre 8 et 14 mois (LoBue & DeLoache, 2010). Dans cette optique, Vaish, Grossmann, & Woodward (2008) suggèrent que le biais de *négativité* fréquemment observé chez les adultes, illustré par leur plus forte propension à traiter les stimuli négatifs de leur environnement par rapport aux stimuli positifs, apparaîtrait de façon précoce au cours du développement. Ce biais se mettrait en place en partie dans un but adaptatif, afin de permettre aux jeunes enfants d'explorer leur environnement tout en évitant les situations dangereuses de façon appropriée.

D'un point de vue neuronal, une étude de Leppänen, Moulson, Vogel-Farley, & Nelson (2007) a démontré que les composants électro-physiologiques précoces, c'est-à-dire majoritairement liés au traitement perceptif, seraient modulés par les expressions faciales négatives très tôt au cours du développement, soit à partir de 7 mois (pour une revue, voir Leppänen & Nelson, 2009). D'autres études se sont également intéressées à la modulation de composants plus tardifs comme le LPP qui reflète un engagement attentionnel plus important pour les stimuli émotionnels (Hajcak & Dennis, 2009 ; Solomon, DeCicco, & Dennis, 2012). Ces auteurs ont montré que, dès l'âge de 5 ans, les enfants présentaient une augmentation de l'amplitude du LPP en réponse à des images négatives et

positives comparativement à des images neutres, et ceci de façon similaire aux adultes. Comme chez les adultes, l'activité du LPP pouvait également être modulée lors de l'utilisation de stratégies intentionnelles de régulation des émotions chez les enfants de 5 à 7 ans (Babkirk, Rios, & Dennis, 2015), de 7 à 10 ans (Dennis & Hajcak, 2009) et les adolescents de 12 à 17 ans (Desatnik, Bel-Bahar, Nolte, et al. 2017). Néanmoins, la distribution topographique du LPP semblerait varier avec l'âge, migrant des régions postérieures chez les enfants vers des régions plus antérieures chez les adolescents (Kujawa, Klein, & Hajcak, 2012 ; Kujawa, Klein, & Proudfit, 2013 ; Pegg, Dickey, Mumper, Kessel, Klein, & Kujawa, 2019), associée à une baisse de l'amplitude du LPP jusqu'à l'âge adulte (Bondy, Stewart, Hajcak, et al., 2018 ; pour une revue sur les modulations du LPP chez les enfants, voir Wauthia & Rossignol, 2016). Récemment, Bunford, Kujawa, Fitzgerald, Monk, & Phan (2018) se sont intéressés aux régions cérébrales associées au LPP chez des enfants et adolescents âgés entre 7 et 19 ans. Les résultats montrent que l'augmentation du LPP en réponse aux expressions faciales émotionnelles était notamment corrélée aux gyri frontal inférieur, orbitofrontal et pariétal supérieur, ainsi qu'à l'amygdale, ce qui concorde avec des études réalisées chez l'adulte (Liu et al., 2012). De plus, les adolescents plus âgés présentaient une diminution de l'activation des gyri frontal, orbitofrontal et de l'amygdale, ainsi qu'une diminution du LPP, potentiellement due à une baisse de la réactivité émotionnelle avec l'âge.

En outre, des études en neuro-imagerie se sont intéressées au développement des régions cérébrales responsables des processus émotionnels et de leur régulation chez les enfants, soulignant une maturation cérébrale lente et progressive jusqu'à la fin de l'adolescence (pour une revue, voir Casey, Heller, Gee, & Cohen, 2019). Une étude de Silvers, Insel, Powers, et al. (2017) a notamment évalué la régulation émotionnelle en réponse à des images négatives et neutres chez un groupe de participants âgés de 6 à 23 ans. Les auteurs ont montré une augmentation de la capacité à réguler les émotions avec l'âge, supportée par des changements de connectivité entre le CPF et l'amygdale. Ainsi, l'amygdale montrerait une baisse d'activité durant la régulation émotionnelle avec l'âge, dû à l'influence conjointe du CPF ventro-médian et ventro-latéral sur cette structure. Gee, Humphreys, Flannery, et al. (2013) ont notamment retrouvé cette augmentation de connectivité entre le CPF et l'amygdale avec l'âge lors d'une tâche d'observation passive d'expressions faciales négatives. Selon cette étude, la régulation de la réponse amygdalienne par le CPF semblerait émerger vers 9 ans et se renforcerait progressivement au cours du développement.

En résumé

Dans ce sous-chapitre, nous avons décrit les émotions telles qu'appréhendées dans le modèle dimensionnel de Russel, c'est-à-dire représentées par deux grandes dimensions : la valence émotionnelle et l'arousal (ou éveil physiologique). Nous avons également souligné que les processus émotionnels reposent sur l'activation de vastes régions cérébrales corticales et sous-corticales interconnectées, dont l'amygdale constitue l'élément central. Par ailleurs, nous avons évoqué la pertinence de l'utilisation de l'EEG dans l'analyse de la dynamique temporelle des processus émotionnels, notamment grâce à la technique des PE. En particulier, le LPP semble être approprié dans l'analyse des processus émotionnels puisqu'il serait modulé par les stimuli émotionnels, à la fois chez les adultes et chez les enfants dès l'âge de 5 ans. Nous avons également rapporté que l'habileté de traiter les émotions se mettrait en place précocement au cours du développement ontogénétique. En revanche, la réactivité émotionnelle semblerait diminuer au cours du développement et jusqu'à l'âge adulte, dû à la maturation lente et progressive des régions cérébrales responsables de la régulation émotionnelle. Les deux premiers sous-chapitres de ce travail de thèse ont ainsi permis d'évoquer les aspects théoriques de la mémoire épisodique et des émotions à la fois chez une population adulte et au cours du développement ontogénétique. Les sous-chapitres suivant vont se consacrer à la description des aspects théoriques qui concernent l'influence des émotions sur la mémoire chez l'adulte dans un premier temps puis chez l'enfant, ce qui constitue la problématique principale de ce travail de thèse.

III. EEM chez l'adulte

1. Définition et modèles de l'EEM

Depuis de nombreuses années, les émotions et la cognition, et en particulier le lien entre ces deux domaines, ont fasciné les scientifiques du monde entier, donnant naissance à de très nombreux travaux d'exploration comportementale, physiologique et même neuro-anatomique (pour des revues, voir Dolan, 2002 ; Phelps 2006 ; Pessoa, 2008 et Mather & Fanelow, 2018). Une approche initiale a été de segmenter les régions cérébrales responsables des émotions (i.e., le cerveau émotionnel) de celles responsables de la cognition (i.e, le cerveau cognitif). Or, il est apparu progressivement que les émotions et la cognition partageaient des bases cérébrales communes et étaient fonctionnellement interconnectées et intégrées au sein du cerveau. En 2008, Pessoa stipule notamment que les systèmes des émotions et de la cognition ne seraient pas fonctionnellement séparés, rendant possible l'interaction entre émotions et cognition et l'émergence de comportements complexes. L'une des fonctions cognitives pour laquelle l'influence des émotions est largement étudiée dans la littérature est la mémoire.

Un des exemples de vie quotidienne les plus marquants de cet effet des émotions sur la mémoire est le phénomène de *flashbulb memories*, qui fait référence à un souvenir disposant d'une qualité de détails quasiment photographique d'un événement fortement émotionnel (Brown & Kulik, 1977). Ce type de souvenirs peut concerner des événements importants de notre vie personnelle ou plus largement des événements sociétaux marquants (Conway, Singer, Tagini, 2004 et Conway, 2005). Ainsi, des études ont notamment montré que des résidents de New-York se souvenaient parfaitement des circonstances dans lesquelles ils se trouvaient lorsqu'ils ont pris connaissance des attentats du 11 septembre 2001 (Paradis, Florer, Solomon, & Thompson, 2004). La vivacité de ce type de souvenirs réside dans l'émergence soudaine et inattendue de l'événement, ses conséquences importantes et son niveau d'arousal élevé (Brown & Kulik, 1977).

Dans un cadre plus général, une multitude d'études provenant de la recherche animale (pour une revue, voir McGaugh, 2004) et humaine (pour des revues récentes, voir Ack Baraly, Hot, Davidson, & Talmi, 2016 et Dolcos, Katsumi, Weymar, et al., 2017), ont montré que les informations chargées en émotions sont généralement mieux mémorisées que les informations émotionnellement neutres. Cet effet des émotions sur la mémoire a été largement étudié chez l'Homme en utilisant des stimuli de laboratoire (listes de mots, histoires, séries d'images...) disposant de différents niveaux d'arousal et de valence émotionnelle ainsi qu'une variété de tâches de récupération (rappel, rappel indicé, reconnaissance...) et d'intervalles de rétention de l'information (minutes, jours, années) (pour une revue, voir Kensinger & Schacter, 2008a). Suite à ces études, le terme *Emotional Enhancement of Memory* (EEM) fut entériné (Talmi, Schimmack, Paterson, & Moscovitch, 2007).

Différents facteurs cognitifs et neurobiologiques semblent jouer un rôle dans l'émergence d'un EEM selon si celui-ci se manifeste immédiatement après l'encodage ou s'il apparaît après un délai d'au moins une heure et persiste au cours du temps. Ainsi, selon le modèle de la médiation cognitive (*Cognitive Mediation Model*), l'EEM immédiat serait le produit de la modulation de trois facteurs cognitifs censés faciliter les processus d'encodage et de récupération : l'attention, la *distinctivité* et l'organisation sémantique (Talmi, 2013). En effet, par rapport aux stimuli neutres, les stimuli émotionnels capturent davantage de ressources attentionnelles, bénéficient d'attributs uniques qui les rendent plus distinctifs et partagent des liens sémantiques forts qui permettent une meilleure organisation conceptuelle de ces stimuli. L'attention va, ainsi, entraîner la priorisation du traitement des stimuli émotionnels durant l'encodage (pour des revues, voir Okon-Singer, Lichtenstein-Vidne, & Cohen, 2013 et Pourtois et al., 2013). Parallèlement, la *distinctivité* et l'organisation sémantique vont notamment procurer des indices de récupération censés améliorer le rappel correct des informations émotionnelles. Ces trois facteurs cognitifs sont modulés de façon automatique et involontaire, et peuvent à la fois contribuer à l'EEM de façon isolée, ou agir de concert comme dans la plupart des paradigmes classiques d'évaluation de l'EEM chez l'Homme. Par exemple, l'usage d'un encodage incident où les participants n'ont pas de raison particulière de traiter les stimuli neutres, la présentation combinée de stimuli émotionnels et neutres au sein d'une même liste (*mixed lists*), et enfin des stimuli neutres qui n'appartiennent pas à la même catégorie sémantique. Bien que ces facteurs soient dissociables de l'émotion en soi, ils accompagnent souvent les expériences émotionnelles en laboratoire et également celles de la vie quotidienne. Si bien que

lorsque l'influence de ces trois facteurs est contrôlée, l'EEM ne semble plus apparaître dans des tâches de rappel libre immédiat (Talmi & McGarry, 2012). Néanmoins, selon certaines études, l'EEM serait de plus en plus prononcé avec l'allongement de l'intervalle de rétention, c'est-à-dire après un délai de plusieurs heures, voire plusieurs jours (pour une revue, voir Yonelinas & Ritchey, 2015). Selon le modèle de la consolidation (*Modulated-Consolidation Model*), ceci est dû à la sécrétion d'hormones de stress dans le corps (adrénaline, aussi appelée épinephrine, et cortisol) lors d'un événement émotionnel avec un fort arousal, qui va initier une chaîne d'événements biologiques entraînant finalement l'activation du noyau basolatéral de l'amygdale. Par la suite, l'amygdale, grâce à ses nombreuses connexions structurales et fonctionnelles avec les structures du LTM liées à la mémoire, viendrait notamment moduler la consolidation des traces mnésiques par l'hippocampe (voir Figure 6). Ces arguments sont soutenus par de nombreuses études ayant stimulé ou bloqué l'activité neuronale lors d'un événement émotionnel, permettant d'analyser les mécanismes soutenant la consolidation de ce type d'événement chez l'Homme et chez l'animal (pour des revues, voir McGaugh, 2004 et McGaugh, 2018).

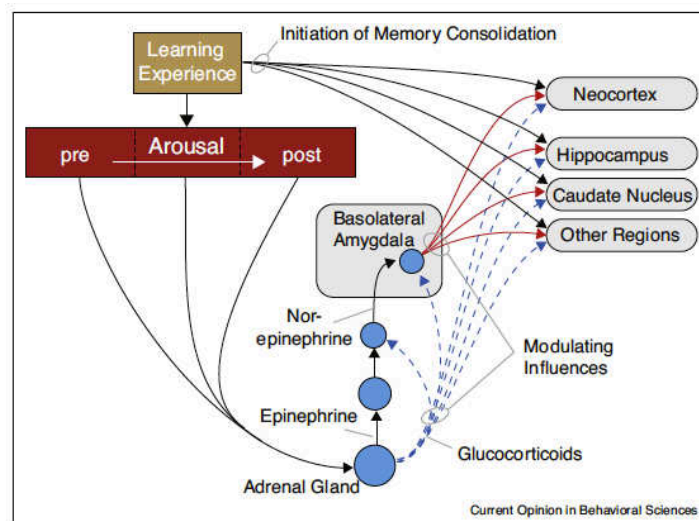


Figure 6. Modèle de la consolidation.

D'après McGaugh, 2018.

La combinaison des deux types de modèles explicités ci-dessus apporte des connaissances sur la contribution relative de facteurs cognitifs et/ou neurobiologiques dans l'émergence de l'EEM immédiat et à long terme, permettant une représentation plus complète de la mémoire émotionnelle chez l'Homme (voir Figure 7).

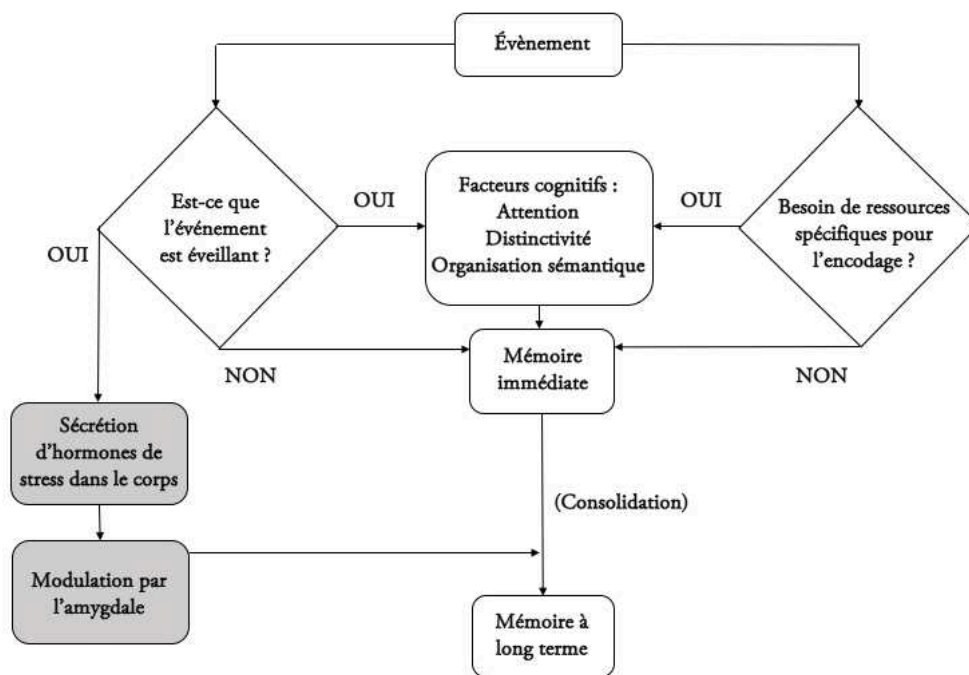


Figure 7. Modèle de la médiation cognitive.

Adapté de Talmi, 2013.

Par ailleurs, une théorie alternative a récemment été proposée par Yonelinas & Ritchey (2015) (*The emotional binding account of memory*) et stipule que l'EEM à long terme serait majoritairement soutenu par le stockage des traces mnésiques émotionnelles dans l'amygdale qui les rendrait plus stables et persistantes dans le temps. Ceci est en contradiction avec le modèle de la consolidation qui propose un désengagement de l'amygdale lorsque la consolidation des traces mnésiques par l'hippocampe est achevée. Néanmoins, que le souvenir émotionnel soit consolidé au niveau de l'hippocampe ou au niveau de l'amygdale, le sommeil aurait un rôle important dans cette consolidation, apportant un argument supplémentaire à la conception de l'EEM à long terme. En effet, des études ont montré qu'une période de sommeil engendrait sélectivement l'amélioration de la mémoire pour les stimuli émotionnels par rapport à une période d'éveil (Hu, Stylos-Allan, & Walker, 2006 ; Payne, Stickgold, Swanberg, & Kensinger, 2008).

Un autre questionnement concernant l'EEM chez l'Homme interroge la sélectivité de cet effet pour certains éléments du souvenir ou au contraire, la généralisation de cet effet à l'événement dans sa globalité. La théorie du rétrécissement attentionnel (*attentional narrowing hypothesis*) par

Easterbrook (1959), stipule que lors de la survenue d'un événement émotionnel avec un fort arousal, l'attention se concentrerait sur les éléments centraux de cet événement au détriment des éléments périphériques neutres. Une illustration parfaite de cet effet est notamment retrouvée dans la littérature sur les témoignages oculaires et désignée comme le *weapon focus effect*. Cet effet implique que des personnes exposées à une scène de crime vont principalement focaliser leurs ressources attentionnelles sur l'arme du criminel en dépit des autres détails de la scène. Ainsi, l'EEM ne serait pas généralisé à l'ensemble de l'épisode émotionnel mais bénéficierait surtout à l'élément central du souvenir (Christianson, 1992 ; Buchanan & Adolphs, 2002). Dans sa revue, Kensinger (2009) fait référence à ce phénomène avec le terme de *memory trade-off* (compromis en mémoire) qui désigne une amélioration de la mémoire pour les détails intrinsèques à l'élément central émotionnel, ou à l'item, au détriment des aspects extrinsèques, à savoir les détails périphériques (à voir aussi Mather, 2007). Cette distinction prend toute son importance lors de l'évaluation de l'effet des émotions sur les différents composants de la mémoire épisodique : la mémoire de l'item et la mémoire associative. Ainsi, l'EEM serait retrouvé à la fois pour la mémoire de l'item et pour la mémoire associative si les éléments contextuels associés à l'item émotionnel sont considérés comme intrinsèques, comme les aspects perceptifs ou la localisation spatiale de l'item, mais ne serait pas retrouvé pour la mémoire associative dans le cas d'éléments contextuels extrinsèques à l'item émotionnel, comme les détails à proximité de l'item ou faisant partie de l'arrière-plan.

Comme nous venons de le voir, les stimuli ayant un fort arousal, qu'ils soient positifs ou négatifs, sont plus susceptibles d'engendrer un EEM, soulignant le rôle majeur de l'arousal dans ce phénomène (Buchanan & Adolphs, 2002). Néanmoins, certaines études ont aussi évalué le rôle différentiel de l'arousal et de la valence dans la formation d'un EEM. En particulier, dans leur étude, Kensinger & Corkin (2004) ont utilisé deux classes de mots négatifs qui diffèrent au niveau de l'arousal (très éveillants et peu éveillants) et des mots neutres. Lorsque les participants disposaient de l'ensemble de leurs ressources attentionnelles lors de la phase d'encodage, les deux classes de mots négatifs étaient mieux reconnues que les mots neutres. Cependant, lorsque les participants devaient réaliser une tâche concurrente non liée à la tâche d'encodage en cours, seuls les mots négatifs très éveillants étaient mieux reconnus par rapport aux stimuli neutres. Ainsi, l'attention divisée durant l'encodage avait éliminé l'EEM lié à la valence, ceci étant potentiellement dû à l'interférence avec des processus cognitifs plus contrôlés. En revanche, les mots très éveillants engendraient un EEM même durant la condition d'attention divisée, révélant une influence

relativement automatique de l'arousal sur la mémoire. Par ailleurs, il semblerait que le rôle de la valence émotionnelle dans la formation d'un EEM diffère selon l'âge des individus, notamment entre des jeunes adultes et des adultes âgés, avec une influence plus importante des émotions négatives sur la mémoire chez les individus jeunes et des émotions positives chez les individus âgés. Nous reviendrons en détails sur cet effet différentiel de valence selon l'âge ultérieurement dans ce sous-chapitre.

2. Bases neuro-anatomiques de l'EEM

D'un point de vue neuro-anatomique, le rôle prépondérant de l'amygdale dans la formation de l'EEM a été amplement souligné, à la fois durant l'encodage, la consolidation et la récupération des informations émotionnelles, la rendant essentielle à la fois dans l'émergence de l'EEM immédiat et à long terme (pour une revue voir, Dolcos, Denkova, & Dolcos, 2012). Les études réalisées auprès de populations de patients cérébro-lésés ont notamment montré que l'EEM pouvait être largement réduit, voire totalement supprimé, lorsque les deux amygdales étaient endommagées (e.g., Phelps, LaBar, Anderson, et al., 1998). De plus, comme nous avons vu dans le sous-chapitre II, l'amygdale n'agit pas de façon isolée mais en lien étroit avec de multiples régions corticales et sous-corticales, notamment au niveau du LTM et du CPF (pour une revue, voir LaBar & Cabeza, 2006).

Plusieurs études s'étant intéressées à l'encodage de stimuli émotionnels ont souligné la forte implication de l'amygdale durant ce processus mnésique. Notamment, Dolcos, LaBar, & Cabeza (2004) ont montré que l'encodage efficace (i.e. donnant lieu à un rappel ultérieur) de stimuli émotionnels (positifs et négatifs) était prédit par l'activation mutuelle de l'amygdale et de l'hippocampe. En plus de ses échanges avec le LTM, une méta-analyse de Murty, Ritchey, Adcock, & LaBar (2010), a notamment mis en exergue les interactions de l'amygdale avec le cortex visuel, préfrontal et pariétal lors de l'encodage efficace d'informations émotionnelles, comparativement à des informations neutres. Les auteurs proposent que ces interactions favorisent le renforcement du traitement perceptif, de l'élaboration de liens sémantiques et de l'attention, censés servir la récupération subséquente des informations émotionnelles, en accord avec le modèle de la médiation cognitive. De plus, la connectivité entre l'amygdale et le LTM durant l'encodage semblerait prédire davantage la mémorisation d'images émotionnelles lorsque la récupération a lieu après une semaine d'intervalle par rapport à un intervalle de vingt minutes (Ritchey, Dolcos, & Cabeza, 2008). Ceci

est en accord avec le modèle de la consolidation dans lequel l'amygdale a une influence sur le processus de consolidation des informations émotionnelles. A l'instar des processus d'encodage et de consolidation, d'autres études soulignent également le rôle de l'amygdale dans le processus de récupération des informations émotionnelles. Notamment, Dolcos, LaBar, & Cabeza (2005) ont démontré une plus grande récupération de stimuli négatifs et positifs éveillants par rapport à des stimuli neutres un an après l'encodage initial, associée à une plus grande activité de l'amygdale et du LTM lors de la récupération correcte des stimuli émotionnels. De plus, en comparant l'activité de l'amygdale durant la récupération des informations basée sur la recollection ou sur celle de la familiarité, les auteurs ont démontré le rôle spécifique de cette structure dans les processus de recollection. Ceci peut être expliqué par le fait que, durant la recollection, les personnes se resituent mentalement dans le contexte émotionnel original, ce qui va faciliter la récupération de détails contextuels associés à cet événement et induire à nouveau un éveil émotionnel. En outre, d'autres études soulignent le rôle de l'amygdale lors de la récupération correcte de stimuli émotionnels quelques minutes seulement après la phase d'encodage (e.g., Shafer & Dolcos, 2014). En effet, dans cette étude, la récupération correcte des stimuli émotionnels était spécifiquement associée à l'activité de l'amygdale, de l'hippocampe et du CPF.

Si les interactions entre l'amygdale et le LTM ont fortement été investiguées en lien avec l'EEM, de nombreuses études se sont également concentrées sur les facteurs cognitifs impliqués dans l'apparition de l'EEM, en partie sous-tendus par les régions du CPF (pour des revues, voir Dolcos, Denkova, & Dolcos, 2012 et Dolcos et al., 2017). Il a notamment été suggéré que l'amygdale et le LTM sous-tendraient l'EEM par des mécanismes neuro-hormonaux directs (mécanismes *bottom-up*) tandis que le CPF aurait un rôle indirect dans l'émergence de l'EEM, via l'implication de facteurs cognitifs comme l'utilisation de stratégies mnémotechniques, l'élaboration de liens sémantiques, la mémoire de travail et les processus attentionnels (mécanismes *top-down*), et ceci à la fois durant l'encodage et la récupération des informations. Par ailleurs, certaines études suggèrent que l'amygdale et le LTM seraient préférentiellement modulés par l'arousal des informations tandis que le CPF traiterai davantage les aspects relatifs à la valence émotionnelle. Ceci reflète l'implication spécifique du CPF dans des processus de traitement des informations émotionnelles de plus haut niveau (évaluation de la valence, stratégies de contrôle cognitif etc.) (voir Figure 8, Dolcos, Iordan, & Dolcos, 2011). De plus, certaines études tendent à montrer que la connectivité fonctionnelle entre l'amygdale et l'hippocampe serait augmentée lors de l'encodage des stimuli

négatifs, tandis que la connectivité entre l'hippocampe et le CPF serait plus forte lors de l'encodage des stimuli positifs (Steinmetz, Addis, & Kensinger, 2010 ; Ritchey, LaBar, & Cabeza, 2011). D'autres études indiquent que l'encodage efficace de stimuli positifs serait sous-tendu par les régions fronto-pariétales, en lien avec l'implication de processus cognitifs élaborés comme le traitement sémantique ou conceptuel, tandis que l'encodage efficace de stimuli négatifs impliquerait plutôt les régions temporo-occipitales, en lien avec la plus forte implication de processus sensoriels (Mickley Steinmetz & Kensinger, 2009 ; Mickley & Kensinger, 2008 ; Kensinger & Schacter, 2008b). L'implication spécifique des régions frontales et postérieures dans la récupération des informations positives et négatives, respectivement, a également été relevée dans la littérature (pour une revue, voir Kensinger 2009).

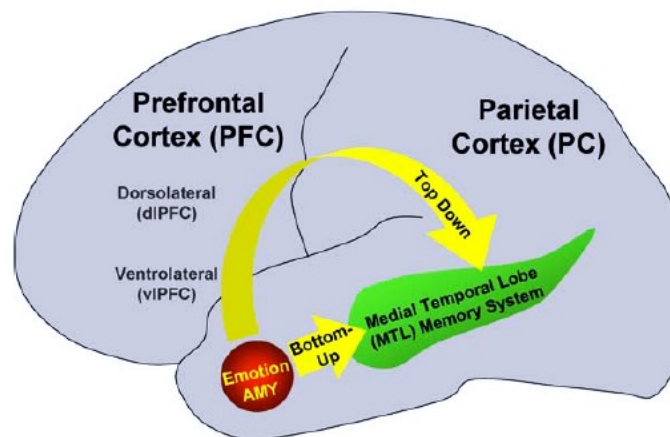


Figure 8. Principaux mécanismes impliqués dans l'EEM. Les émotions améliorent la mémoire épisodique en modulant l'activité de deux régions cérébrales associées aux processus mnésiques, le LTM et le CPF.

Cependant, les effets des émotions sur les régions du LTM et du CPF peuvent être liés à différents mécanismes : l'amygdale (AMY) et le LTM sous-tendent l'EEM par des mécanismes neuro-hormonaux directs (*bottom-up*), tandis que le CPF a un rôle indirect (*top-down*) dans l'EEM (incluant également le cortex pariétal) via l'implication de facteurs cognitifs.

D'après Dolcos, Iordan, & Dolcos, 2011.

Pour aller plus loin, certaines études se sont intéressées à la régulation émotionnelle, qui est une étape importante dans le traitement efficace et l'adaptation aux événements émotionnels, et qui pourrait affecter l'EEM. Les principales stratégies de régulation émotionnelle connues dans la littérature sont notamment la réévaluation cognitive (*cognitive reappraisal*) qui a pour but de

changer la signification des stimuli/situations émotionnelles (par exemple, en pensant que la situation n'est pas réelle), et la suppression émotionnelle (*expressive suppression*), qui vise à diminuer le comportement émotionnel (Gross, 2008). L'utilisation de la réévaluation cognitive lors de l'encodage de stimuli émotionnels entraînerait l'amélioration de la récupération subséquente des stimuli réévalués, même après un intervalle d'une ou deux semaines, tandis que la suppression émotionnelle réduirait la mémorisation des stimuli concernés. La première stratégie de régulation impliquerait une plus grande élaboration de liens sémantiques entre les stimuli, ce qui entraînerait un encodage plus profond et améliorerait la mémorisation subséquente de ces stimuli, tandis que la deuxième stratégie réduirait la réponse émotionnelle et donc altérerait la mémorisation. En outre, l'encodage efficace de stimuli réévalués serait associé à une plus grande co-activation entre l'hippocampe, l'amygdale et le gyrus frontal inférieur gauche (CPF latéral gauche) (Hayes, Morey, Petty, et al., 2010) tandis que l'encodage efficace de stimuli ayant subis la suppression émotionnelle serait plutôt associé à une diminution de l'activité de l'hippocampe et une baisse de sa connectivité avec le CPF latéral (Binder, de Quervain, Frieze, et al., 2012). Ceci est notamment d'une grande importance dans la compréhension des troubles émotionnels comme la dépression ou l'anxiété, pour lesquels la dérégulation émotionnelle est un des symptômes cliniques central.

3. Corrélats neuronaux de l'EEM (EEG)

Des études en EEG se sont intéressées aux corrélats neuronaux sous-tendant l'EEM grâce à des techniques d'analyse basées sur les PE et fréquemment utilisées dans les études sur la mémoire. En effet, afin de dissocier les mécanismes neuronaux liés au traitement perceptif de ceux liés aux processus de mémorisation lors de l'encodage des stimuli, la plupart des études sur la mémoire évaluent l'effet de mémoire subséquente (*subsequent memory effect*). Cet effet correspond à l'activité neuronale différentielle lors de l'encodage, associée aux stimuli qui vont être mémorisés par rapport à ceux qui vont être oubliés, aussi appelé l'effet Dm (*Dm effect, difference due to memory*). Des études ont notamment montré que les stimuli qui donnaient lieu à un rappel ultérieur engendraient un PE avec une amplitude plus positive par rapport aux stimuli oubliés, apparaissant aux environs de 400ms post-stimulus au niveau de la région fronto-centrale (Friedman & Johnson, 2000). Cet effet refléterait notamment le traitement plus profond des stimuli dû à un plus grand engagement attentionnel et une plus grande élaboration de liens inter-stimuli, permettant un meilleur encodage

en mémoire (Paller & Wagner, 2002). De plus, l'apparition précoce de l'effet Dm durant l'encodage refléterait un plus grand engagement de processus sensoriels tandis que l'effet tardif aurait surtout un lien avec les processus de mémoire de travail, permettant la manipulation et le maintien de l'information afin de faciliter l'encodage (Mangels, Picton, & Craik, 2001).

Quelques études ont évalué l'influence des émotions sur l'effet Dm, permettant l'analyse des corrélats neuronaux associés à l'EEM durant l'encodage (Dolcos & Cabeza, 2002 ; Righi, Marzi, Toscani, et al., 2012 ; Watts, Buratto, Brotherhood, Barnacle, & Schaefer, 2014 ; Yick, Buratto, & Schaefer, 2015 et Minor & Herzmann, 2019). Ces études ont indiqué une augmentation de l'effet Dm pour les stimuli émotionnels, concordante avec la distribution spatiale et les fenêtres temporelles d'apparition du LPP. Notamment, Dolcos & Cabeza (2002) ont montré un effet Dm plus important pour les images négatives et positives par rapport aux images neutres, durant la fenêtre temporelle 400-600ms, et maximal au niveau de la région centrale médiane. Watts et al. (2014) souligne surtout une absence de l'effet Dm pour les images neutres par rapport aux images émotionnelles lorsque celles-ci étaient présentées de façon combinée (*mixed list*), au niveau postérieur du scalp et durant les fenêtres temporelles précoce (200-400ms) et tardive (800-1500ms). Enfin, Yick et al. (2015) ont montré une augmentation de l'effet Dm pour les images émotionnelles comparativement aux images neutres à partir de 400ms jusqu'à 1500ms, au niveau des régions antérieures et postérieures, avec une augmentation plus précoce (durant la fenêtre temporelle 200-400ms) pour les images ayant un arousal élevé. De plus, la modulation de l'effet Dm par les émotions apparaissait même si le contexte temporel d'apparition des images n'était pas correctement rappelé (voir Figure 9). Dans l'ensemble, ces études suggèrent que l'engagement attentionnel pour les stimuli émotionnels durant l'encodage est un prédicteur fiable de l'EEM.

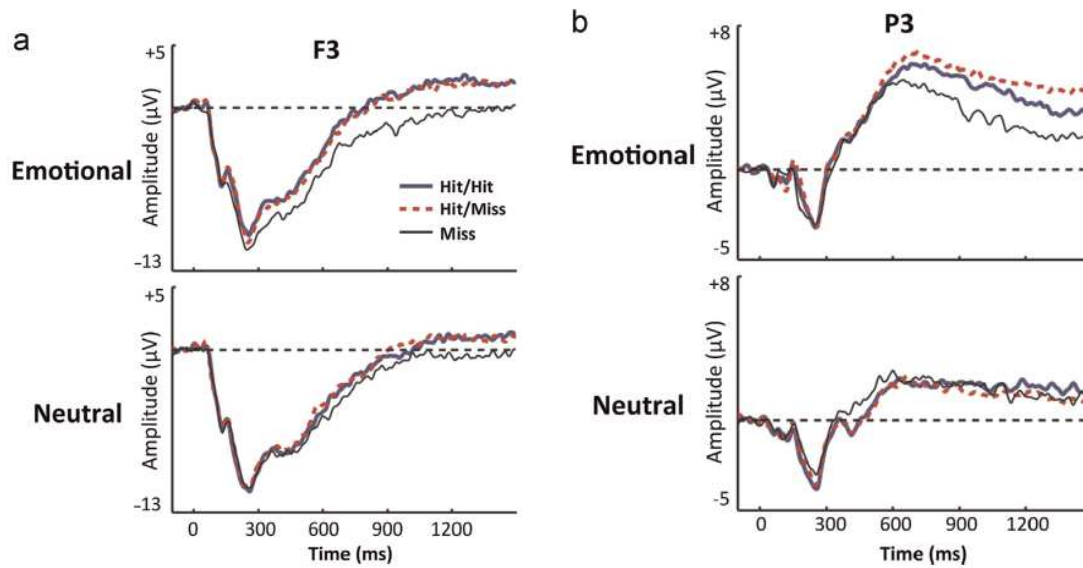


Figure 9. Ondes cérébrales représentant l'effet Dm lors de la phase d'encodage pour les images émotionnelles et neutres qui ont été correctement reconnues avec leur contexte temporel (Hit/Hit), correctement reconnues sans leur contexte temporel (Hit/Miss) et qui ont été oubliées (Miss), au niveau a) frontal et b) pariétal.

D'après Yick, Buratto, & Schaefer, 2015.

Une autre technique d'analyse provenant des études sur la mémoire est l'évaluation de l'effet ancien/nouveau (*old/new effect*) lors de la récupération des informations. Cet effet correspond à l'activité neuronale différentielle lors d'une tâche de reconnaissance, associée aux anciens stimuli (précédemment encodés) par rapport aux nouveaux stimuli. Cet effet est classiquement associé à trois composants électro-physiologiques distincts au niveau spatial et temporel : un composant frontal précoce apparaissant entre 300 et 500ms post-stimulus (aussi appelé FN400), un composant pariétal avec une prédominance hémisphérique gauche, apparaissant aux environs de 400 et 500ms post-stimulus et enfin, un composant tardif frontal prédominant au niveau de l'hémisphère droit qui apparaît autour de 500-600ms et persiste durant plus d'une seconde (Rugg & Allan, 2000 ; Sprondel, Kipp, & Mecklinger, 2011). Ces composants sont connus, dans la littérature sur la mémoire, pour refléter la contribution relative des processus de familiarité et de recollection au cours d'une tâche de reconnaissance. En effet, le composant frontal précoce serait présent lors de la reconnaissance d'un item basée sur la familiarité, en lien avec l'évaluation globale et rapide de la similarité entre l'item précédemment encodé et l'item présenté en reconnaissance. En revanche, le composant pariétal ferait plutôt référence au processus de recollection puisqu'il est modulé par la

quantité d'informations récupérées (e.g., détails contextuels) et l'expérience subjective de l'individu lors de la reconnaissance. Finalement, le composant frontal tardif a été associé à des processus de contrôle et d'évaluation de l'information récupérée en mémoire, notamment lors de tâches évaluant la mémoire associative.

Des études se sont penchées sur la modulation émotionnelle des différents composants associés à l'effet ancien/nouveau afin d'évaluer les corrélats neuronaux de l'EEM lors de la récupération (Maratos & Rugg, 2001 ; Weymar, Löw & Hamm, 2011). Maratos & Rugg (2001) ont indiqué que les mots précédemment encodés dans des phrases à connotation négative engendraient, lors de la phase de reconnaissance, une augmentation du composant pariétal gauche et l'apparition du composant frontal droit tardif comparativement à lorsqu'ils étaient encodés dans des phrases neutres. De façon similaire, Weymar et al. (2011) ont notamment montré que les images émotionnelles précédemment encodées engendraient une réponse neuronale plus ample comparativement aux images neutres, durant la fenêtre temporelle 500-800ms au niveau pariétal. Ceci était observé lors d'une tâche de reconnaissance ayant lieu une semaine après l'encodage et associée à une expérience subjective vivace. Ces résultats suggèrent que le composant électrophysiologique associé au processus de recollection est principalement modulé par les émotions lors d'une tâche de reconnaissance.

Outre l'analyse des PE, l'EEG permet aussi de mesurer les oscillations cérébrales en lien avec une multitude de processus mentaux, dont l'EEM. En effet, des oscillations thêta (4-8Hz) seraient présentes au niveau de l'amygdale lors d'un événement émotionnel éveillant, et celles-ci serviraient de substrat physiologique à la consolidation facilitée des événements émotionnels par l'hippocampe ainsi qu'à l'amélioration de leur rappel (pour une revue, voir Paré, Collins, & Pelletier, 2002). De plus, dans leur revue, Headley & Paré (2013) indiquent que les images émotionnelles éveillantes entraîneraient une augmentation des oscillations gamma (35-120Hz) au niveau du néocortex et de l'amygdale droite lors de tâches de mémoire.

4. La modulation de l'EEM avec l'âge

Parmi tous les facteurs qui influencent les mécanismes de l'EEM, l'âge des individus semble être un facteur important. De fait, de nombreuses études se sont intéressées aux changements potentiels de l'EEM avec l'âge, notamment dans le vieillissement normal. Une méta-analyse de Murphy & Isaacowitz (2008) souligne le fait que les jeunes adultes seraient sujets à un effet de *négativité*, c'est-à-dire qu'ils seraient plus enclins à traiter les stimuli négatifs de façon générale, ce qui améliorerait leur mémoire pour ce type de stimuli par rapport aux stimuli positifs et neutres (pour des revues voir, Baumeister, Bratslavsky, Finkenauer, & Vohs, 2001 ; Norris, 2019). Avec le vieillissement, cet effet de *négativité* aurait tendance à s'atténuer pour laisser place à un effet de *positivité* plus marqué en mémoire (Murphy & Isaacowitz, 2008 ; pour une revue, voir Mather, 2016). L'une des théories explicatives de cet effet de *positivité* est celle de la Sélectivité Socio-Emotionnelle (*Socioemotional Selectivity Theory* – SET, Carstensen, Fung, & Charles, 2003 ; Carstensen & DeLiema, 2018). Cette théorie stipule qu'au cours du vieillissement, la conscience accrue de la limite du temps qui reste à vivre entraînerait les personnes âgées à se concentrer davantage sur l'augmentation de leur bien-être et donc à traiter de façon privilégiée les informations positives. En effet, les personnes âgées alloueraient plus de ressources cognitives aux processus de régulation émotionnelle que les jeunes adultes et focaliseraient d'autant plus leur attention sur les stimuli positifs plutôt que négatifs. Par ailleurs, la théorie de l'intégration dynamique (*Dynamic Integration Theory* - DIT) proposée par Labouvie-Vief (2003) se dirige plutôt vers une diminution des ressources cognitives chez les adultes âgés qui les contraindraient à utiliser des stratégies de régulation émotionnelle simplifiées, comme le fait de traiter uniquement les stimuli positifs au détriment des stimuli négatifs. En outre, la théorie de l'intégration de la force et de la vulnérabilité (*Strength and Vulnerability Integration* - SAVI) proposée par Charles (2010) stipule que les personnes âgées seraient capables d'utiliser des stratégies pour éviter ou limiter l'exposition aux stimuli négatifs dans des situations n'entraînant pas un haut niveau d'éveil émotionnel. Cependant, lors de situations émotionnellement négatives entraînant un grand niveau d'éveil physiologique, les personnes âgées rencontreraient plus de difficultés pour réguler leurs émotions. Pour aller plus loin, une récente étude de Gui, Wang, Lei, et al. (2019) tend à montrer que cet effet de *positivité* chez les adultes âgés apparaîtrait lors de la consolidation des informations après une nuit de sommeil. En effet, dans leur étude, une période de sommeil augmentait sélectivement la mémoire pour les

informations positives chez les adultes âgés, comparativement aux informations négatives et neutres.

Ces spécificités comportementales pour l'EEM sont également retrouvées au niveau neuronal avec une augmentation du LPP lors de la présentation de stimuli négatifs par rapport aux stimuli positifs chez les jeunes adultes, et une diminution du LPP en réponse aux stimuli négatifs chez les adultes âgés (Kisley, Wood, & Burrows, 2007 ; Langeslag & Van Strien, 2009 et Gallant, Pun, & Yang, 2018). En outre, l'encodage de stimuli positifs chez les adultes âgés se traduirait par l'influence spécifique du CPF et de l'amygdale sur l'hippocampe (Addis, Leclerc, Muscatell, & Kensinger, 2010). Dans sa revue de 2016, Mather décrit tantôt une augmentation de l'activité du CPF médian en réponse aux stimuli négatifs, et tantôt une augmentation de l'activité de cette région en réponse aux stimuli positifs chez les adultes âgés, ce qui révélerait respectivement une réévaluation ou un désengagement attentionnel des stimuli négatifs ou un plus grand engagement attentionnel vers les stimuli positifs chez les personnes âgées, en accord avec la théorie de la régulation émotionnelle.

Néanmoins, si l'EEM apparaît préservé en mémoire de l'item, majoritairement pour les stimuli positifs chez les personnes âgées, il ne semblerait pas y avoir d'effet des émotions, positives et négatives, sur la mémoire associative. En effet, le phénomène de *memory trade-off* décrit chez les jeunes adultes par Kensinger (2009) serait plus important chez les adultes âgés entraînant une diminution de la mémoire pour les détails contextuels de l'événement émotionnel, même dans le cas de détails intrinsèques (Nashiro & Mather, 2010). Les auteurs suggèrent que les plus faibles ressources cognitives des adultes âgés ne leur permettraient pas d'utiliser des stratégies d'encodage efficaces pour lier l'item central émotionnel à ses détails intrinsèques et extrinsèques. Ils auraient, ainsi, une plus grande difficulté pour désengager leur attention de l'item central émotionnel, résultant en une baisse globale des performances en mémoire associative pour les stimuli émotionnels.

En résumé

Dans ce sous-chapitre, nous avons vu que de nombreuses études au cours des dernières années ont démontré l'influence bénéfique des émotions sur la mémoire épisodique, à la fois dans un contexte de laboratoire et dans la vie quotidienne, faisant référence au phénomène d'EEM (*Emotional Enhancement of Memory*). Les modèles de la médiation cognitive et de la consolidation soulignent notamment le rôle important de facteurs cognitifs et/ou neurobiologiques dans l'émergence de l'EEM immédiat et à long terme. Par ailleurs, nous avons vu que lorsque les émotions étaient véhiculées par l'élément central d'un événement, seuls les aspects intrinsèques de cet élément bénéficiaient d'une meilleure mémorisation, au détriment des aspects extrinsèques et contextuels. De plus, le fait de réguler volontairement ses émotions, notamment en essayant de les supprimer, pourrait affecter l'apparition de l'EEM. Nous avons également décrit les bases cérébrales qui supportent l'EEM, révélant le rôle clé de l'amygdale en lien étroit avec les régions du LTM et du CPF. En outre, à l'instar du traitement émotionnel, nous avons souligné la pertinence de l'utilisation de l'EEG dans l'évaluation des processus mnésiques ainsi que dans la modulation émotionnelle de ces processus. Deux effets sont couramment mesurés lors de l'évaluation des processus mnésiques : l'effet Dm qui correspond à l'activité neuronale différentielle lors de l'encodage, entre des stimuli qui vont être mémorisés par rapport à des stimuli qui vont être oubliés, et l'effet ancien/nouveau qui correspond à l'activité neuronale différentielle lors de la reconnaissance, entre des anciens stimuli précédemment encodés par rapport à des nouveaux stimuli. Ces effets seraient particulièrement amplifiés lors de l'encodage et de la récupération de stimuli émotionnels comparativement à des stimuli neutres. Finalement, nous avons mis en évidence l'importance de l'âge dans la modulation de l'EEM avec un effet de *négativité* en mémoire apparent chez les jeunes adultes et un effet de *positivité* retrouvé chez les adultes âgés. Ce sous-chapitre nous a permis d'évoquer les aspects théoriques de l'EEM dans la population adulte ainsi que les facteurs susceptibles d'influencer son émergence. Compte tenu des différences développementales observées entre les adultes et les enfants, évoquées dans les sous-chapitres I et II, il semble important de se poser la question de l'EEM chez les enfants qui n'ont pas encore acquis un niveau de développement cognitif mature. Le sous-chapitre suivant va donc s'intéresser aux études réalisées sur l'EEM chez l'enfant, qui constituent une littérature encore très peu abondante.

IV. EEM chez l'enfant

Nous avons vu qu'au cours de l'enfance et de l'adolescence, des changements majeurs apparaissent au niveau des capacités mnésiques et du traitement des émotions, à la fois sur le plan comportemental et cérébral. En outre, de nombreuses études indiquent que l'EEM engage des mécanismes cognitifs et cérébraux particuliers, qui ne sont pas retrouvés lors de la mémorisation d'évènements non-émotionnels, et qui peuvent être modulés par de nombreux facteurs, dont l'âge. Ces spécificités soulèvent une question majeure qui concerne l'éventuelle modulation de l'EEM au cours du développement et qui reste, à ce jour, largement sous-évaluée dans la littérature. Une revue des principales études concernant l'EEM chez l'enfant est présentée dans l'introduction de l'Article 1 (Massol, Vantaggio, & Chainay, 2020 ; Partie 1, Chapitre 2, sous-chapitre I) et de l'Article 2 comprenant une description d'études réalisées en EEG (Massol, Caron, Franck, Demily, & Chainay, soumis ; Partie 1, Chapitre 2, sous-chapitre II).

1. Études comportementales chez l'enfant

La majorité des études s'étant intéressées à l'EEM au cours du développement révèle des résultats comportementaux similaires à ceux retrouvés chez l'adulte. En effet, dès l'âge de 5 ans, les enfants semblent mieux mémoriser les informations émotionnelles, négatives et positives, par rapport aux informations neutres. Ces résultats ont été retrouvés dans plusieurs études ayant adopté des paradigmes expérimentaux similaires à ceux utilisés chez l'adulte, c'est-à-dire comprenant des stimuli de laboratoire variés comme des histoires (Davidson, Luo, & Burden, 2001 ; Van Bergen, Wall, & Salmon, 2015), des images (Vasa, Pine, Thorn, et al., 2011 ; Cordon, Melinder, Goodman, & Edelstein, 2013 ; Leventon & Bauer, 2016), des mots (Pinabiaux, Bulteau, Fohlen, et al., 2013 ; Kim, Sidhu, & Pexman, 2020) et des vidéos (Quas & Lench, 2007), dont l'aspect émotionnel est majoritairement basé sur l'approche bidimensionnelle (valence et arousal). Néanmoins, d'autres auteurs montrent que l'EEM chez les enfants peut également être observé avec des stimuli représentant des expressions faciales de peur, de joie et des expressions neutres

(Pinabiaux et al., 2013), en lien avec la théorie des émotions discrètes (Ekman, 1992). Par ailleurs, l'EEM chez les enfants peut être observé pour plusieurs types de tâches (rappel libre, reconnaissance) et plusieurs intervalles de temps entre l'encodage et la récupération (immédiat ou différé de plusieurs heures). Outre la manifestation d'un EEM général pour les informations négatives et positives chez les enfants, certaines études reportent également un effet de *négativité* chez les enfants et les adolescents qui, à l'instar des adultes, présenteraient un avantage mnésique fréquent pour les informations négatives par rapport aux informations positives (voir Stenson, Leventon, & Bauer, 2019 pour une étude chez des individus âgés de 8 à 30 ans). En revanche, il est important de noter que quelques études ne retrouvent pas cet effet des émotions sur la mémoire chez les enfants, principalement dû à des particularités méthodologiques, comme l'apparition d'un effet plafond dans les performances en reconnaissance (Leventon, Stevens, & Bauer, 2014) ou l'utilisation du paradigme DRM (Deese-Roediger-McDermott) qui favorise la production de faux souvenirs pour les mots ayant des liens sémantiques forts comme les mots émotionnels (Howe, Candel, Otgaar, Malone, & Wimmer, 2010).

Selon le modèle de la consolidation décrit précédemment, l'EEM serait d'autant plus marqué après un plus long intervalle de temps entre l'encodage de l'information et sa récupération en mémoire. Ceci a été largement mis en évidence chez l'adulte, notamment grâce à des études ayant intégré une période de sommeil dans leurs protocoles expérimentaux, censée renforcer la consolidation de toutes sortes d'informations en mémoire (Stickgold, 2005). Des études ont, ainsi, évalué si une période de sommeil pouvait avoir une influence sur l'EEM chez les enfants (Prehn-Kristensen, Göder, Chirobeja, et al., 2009 ; Prehn-Kristensen, Munz, Molzow, et al., 2013). Prehn-Kristensen et al. (2009) ont analysé l'influence du sommeil sur les performances en reconnaissance d'images négatives et neutres chez des garçons âgés de 10 à 13 ans. Dans leur étude, les participants étaient soumis à une tâche d'encodage d'images négatives et neutres, puis participaient à une tâche de reconnaissance d'images 11 heures après l'encodage, incluant ou non une nuit de sommeil. Les auteurs ont montré que les performances en reconnaissance étaient meilleures pour les images négatives comparativement aux neutres, et cet effet était accentué après une nuit de sommeil. Par ailleurs, ces résultats ne pouvaient pas être attribués à des changements au niveau des réponses émotionnelles aux images, étant donné que les évaluations d'arousal des images réalisées par les participants n'étaient pas modulées par le sommeil. Une deuxième étude de Prehn-Kristensen et al. (2013) avec un paradigme expérimental similaire à la première étude et réalisée auprès de garçons

âgés de 9 à 12 ans et de jeunes hommes âgés de 20 à 28 ans, apporte des connaissances supplémentaires sur l'effet du sommeil sur l'EEM selon l'âge. Les auteurs ont montré que l'EEM était réduit chez les enfants après une période d'éveil comparativement à une nuit de sommeil, et aucune différence n'était relevée entre les deux conditions (éveil/sommeil) pour l'EEM chez les adultes. De plus, lorsque les deux groupes étaient combinés, l'EEM était corrélée positivement aux oscillations lentes (< 1Hz) et delta (1-4Hz) durant le sommeil lent, ainsi qu'avec les oscillations thêta (4-7Hz) durant le sommeil paradoxal (ou REM, *Rapid Eye Movement sleep*), au niveau du CPF. En effet, les oscillations lentes, apparaissant au niveau frontal durant le sommeil lent, favoriseraient l'activation de représentations en mémoire par l'hippocampe tandis que les oscillations thêta, émergeant durant le sommeil REM, reflèteraient la stimulation mnésique par la synchronisation de l'activité du CPF et de l'amygdale. Les auteurs suggèrent donc que ces deux étapes séquentielles seraient nécessaires à la consolidation du souvenir émotionnel durant le sommeil, chez l'enfant et chez l'adulte.

Malgré le peu d'études réalisées chez l'enfant, contrastant avec la littérature très abondante qui existe sur l'EEM chez l'adulte, des éléments clés concernant les spécificités de ce phénomène chez l'enfant ont été mis en exergue. En revanche, parmi ces études, très peu ont inclus un groupe d'adultes, ne permettant pas la comparaison directe entre différents groupes d'âges et l'analyse des éventuelles modulations de l'EEM au cours du développement. En outre, toutes ces études se sont focalisées sur l'évaluation d'un seul composant de la mémoire épisodique qui est la mémoire de l'item, ne donnant qu'une représentation partielle de l'effet des émotions sur la mémoire épisodique chez les enfants. Toutefois, une étude s'est intéressée aux souvenirs des aspects centraux (mémoire de l'item) et contextuels (mémoire associative) d'un événement fortement émotionnel survenu au cours de la vie de 90 enfants âgés de 2 à 13 ans (Peterson & Bell, 1996). Les enfants ont été recrutés car ils avaient subi une blessure traumatique qui avait nécessité une prise en charge aux urgences d'un hôpital. Le groupe d'enfants, et des témoins adultes, étaient interrogés quelques jours et 6 mois après l'événement, grâce à des tâches de rappel libre et de rappel indicé, à propos de leur blessure et des soins hospitaliers qu'ils avaient subis. Dans leur cotation, les auteurs distinguaient les deux épisodes (blessure vs. soins hospitaliers), les informations rappelées relatives à l'événement central (e.g., informations sur la blessure et les conséquences de son apparition ; examens hospitaliers de la blessure), celles relatives aux éléments contextuels intrinsèques (e.g., le jour ou le lieu de la blessure ; famille présente dans la salle de soin) et extrinsèques (e.g., trajet jusqu'à

l'hôpital ; enregistrement et attente avant la prise en charge à l'hôpital). Les auteurs ont montré que le niveau de stress ressenti par les enfants au moment de la blessure n'avait aucun effet sur la quantité et la qualité du rappel de cet événement, tandis que les enfants très stressés durant les soins hospitaliers avaient de moins bonnes performances en rappel, à la fois pour l'élément central et les éléments contextuels. Finalement, dans leur étude, les informations relatives aux événements centraux des deux épisodes bénéficiaient d'un meilleur rappel que les détails contextuels extrinsèques chez tous les enfants. Néanmoins, cette étude ne compare pas les performances en rappel de cet événement fortement émotionnel avec un événement équivalent non-émotionnel, ne permettant pas l'analyse de l'EEM en soi. De plus, les souvenirs d'événements personnels diffèrent grandement des expériences en laboratoire du fait, notamment, de leur plus grande complexité et pertinence personnelle qui suscitent des réactions émotionnelles plus fortes, mais également de la difficulté à contrôler certains facteurs pouvant moduler l'EEM comme les émotions ressenties et les détails phénoménologiques de l'événement personnel. C'est pourquoi, dans ce travail de thèse, nous nous sommes attachées à analyser l'EEM en mémoire de l'item et en mémoire associative chez les enfants et les adultes avec des stimuli de laboratoire, afin d'élargir les connaissances sur ce phénomène au cours du développement, tout en contrôlant un maximum les facteurs susceptibles de le moduler (Partie 1, Chapitre 2, sous-chapitre I).

2. Bases neuro-anatomiques de l'EEM chez l'enfant

Bien que les régions cérébrales impliquées dans l'EEM chez l'adulte soient de mieux en mieux connues, encore peu d'études ont évalué l'EEM via des techniques de neuro-imagerie fonctionnelle au cours du développement. Les études en IRMf pouvant être relatées se sont majoritairement focalisées sur une population adolescente (Krauel, Duzel, Hinrichs, et al., 2007 ; Vasa, Pine, Thorn, et al., 2011). En particulier, Krauel et al. (2007) ont mesuré l'activité de plusieurs régions cérébrales lors de l'encodage efficace d'images négatives et neutres chez des adolescents avec un âge moyen de 15,2 ans. L'encodage efficace des images négatives recrutait deux régions clés et fréquemment retrouvées dans les études chez l'adulte, l'amygdale droite et la région para-hippocampique, ainsi que d'autres régions corticales comme le CPF, le cortex occipital et le cortex temporal latéral. Au niveau comportemental, les images négatives entraînaient un meilleur taux de reconnaissance par rapport aux images neutres. De plus, Vasa et al. (2011) ont analysé l'activité de l'amygdale et de

l'hippocampe chez des adolescents âgés de 12 à 17 ans et chez un groupe d'adultes durant l'encodage efficace d'images émotionnelles, positives et négatives. Les adolescents présentaient une augmentation de l'activité de l'amygdale droite durant l'encodage efficace des images positives, mais pas négatives, comparativement aux adultes. De plus, aucune différence au niveau de l'activation de l'hippocampe n'était observée entre ces deux populations. Les résultats comportementaux, en revanche, démontraient un meilleur rappel des images négatives par rapport aux images positives, qui bénéficiaient elles-mêmes d'un meilleur rappel que les images neutres, pour les deux groupes de participants. Dans l'ensemble, ces études montrent que l'EEM semble impliquer les mêmes régions cérébrales clés chez les adolescents et les adultes, même si une plus grande activation de l'amygdale peut émerger chez les adolescents. Outre l'utilisation d'images émotionnelles, une autre étude en IRMf s'est intéressée aux régions cérébrales activées lors de l'encodage de stimuli représentant des expressions faciales négatives (de peur) et neutres chez un groupe d'enfants âgés de 8 à 12 ans et un groupe d'adolescents âgés de 13 à 17 ans (Pinabiaux, Pannier, Chiron, et al., 2013). Les résultats comportementaux démontraient une meilleure reconnaissance des expressions faciales négatives par rapport aux expressions neutres chez les adolescents. En revanche, aucune différence n'était observée au niveau des performances entre les deux types d'expressions faciales chez les enfants, dû notamment à un plus fort taux de fausses reconnaissances des expressions faciales négatives dans ce groupe. Au niveau neuronal, l'encodage efficace des expressions faciales négatives chez les adolescents entraînait l'activation spécifique du noyau basolatéral de l'amygdale, de l'hippocampe et des cortex entorhinal et para-hippocampique. Chez les enfants, l'encodage efficace des expressions faciales négatives reposait principalement sur l'activation du noyau centromésial de l'amygdale et sur des régions extérieures au LTM comme le CPF et le cortex pariéto-occipital. Ainsi, dans cette étude, les adolescents semblaient disposer d'un développement cérébral plus mature comparativement aux enfants, puisqu'ils recrutaient les mêmes régions impliquées dans l'EEM que celles fréquemment observées chez l'adulte (Dolcos et al., 2004). Néanmoins, l'EEM ne se limite pas aux expressions faciales et les résultats observés dans cette étude chez les enfants (absence d'EEM comportemental et d'activation des régions du LTM) peuvent simplement refléter une immaturité au niveau des compétences sociales, notamment pour le traitement des expressions faciales, et non au niveau du traitement des émotions en général.

Finalement, des études en neuropsychologie ont souligné le rôle primordial de la région du LTM dans l'apparition de l'EEM durant le développement (Jambaqué, Pinabiaux, Dubouch, et al.,

2009 ; Pinabiaux, Bulteau, Fohlen, et al., 2013). En effet, la première étude montre que, contrairement aux adolescents du groupe contrôle, des patients souffrant d'épilepsie du lobe temporal âgés de 11 à 15 ans ne présentent pas d'EEM dans des tâches de rappel de stimuli verbaux émotionnels et neutres (Jambaqué et al., 2009). La deuxième étude souligne également une absence d'EEM chez des patients ayant subi une résection du lobe temporal âgés de 8 à 18 ans pour des mots négatifs, positifs et neutres, comparativement aux participants contrôles qui bénéficiaient d'un EEM général. En revanche, dans cette étude, l'EEM pour les expressions faciales de peur était préservé chez les patients, tandis que les participants contrôles présentaient un EEM général pour les expressions de peur et de joie, par rapport aux expressions neutres (Pinabiaux et al., 2013). Ces deux études montrent donc que des lésions ou des déficits fonctionnels au niveau de la région du LTM peuvent altérer l'apparition de l'EEM chez les enfants et les adolescents, suggérant la forte implication de cette région dans l'EEM, à la fois au cours du développement et à l'âge adulte.

3. Corrélats neuronaux de l'EEM chez l'enfant (EEG)

Deux études se sont intéressées aux corrélats neuronaux sous-tendant l'EEM chez les enfants grâce à la technique des PE, notamment avec l'analyse de l'effet ancien/nouveau lors de tâches de reconnaissance (réponse neuronale associée à des items anciens vs. nouveaux) (Leventon et al., 2014 ; Leventon & Bauer, 2016). La première étude a analysé les réponses neuronales de deux groupes d'enfants de 5 à 7,5 ans et de 7,5 à 9 ans lors de la reconnaissance d'images négatives, positives et neutres. Malgré une absence d'EEM au niveau comportemental dans les deux groupes, des différences sont apparues au niveau neuronal lors de la reconnaissance des images. En effet, les auteurs ont montré une augmentation de l'activité neuronale au niveau postérieur et entre 800 et 1200ms post-stimulus, en réponse aux images négatives anciennes par rapport aux images négatives nouvelles pour le groupe d'enfants plus âgé, et non pour le groupe plus jeune. Avec l'absence d'effet ancien/nouveau chez les enfants plus jeunes, couplé à l'émergence d'un effet pour les images négatives chez les enfants plus âgés, les auteurs mettent en exergue une intégration progressive entre les systèmes mnésique et émotionnel au cours de l'enfance, avec une maturation lente et continue jusqu'à l'adolescence (Leventon et al., 2014). Ces auteurs ont également évalué l'effet des émotions grâce à la mesure du LPP durant l'encodage des images. Au niveau du cluster postérieur, les enfants plus âgés présentaient un LPP plus large en réponse aux images négatives par rapport aux images neutres, pour toutes les fenêtres temporelles d'intérêt (de 800 à 2000ms post-stimulus) tandis que

les enfants plus jeunes présentaient un LPP plus large en réponses aux images émotionnelles, négatives et positives, par rapport aux neutres uniquement dans la fenêtre tardive (1600-2000ms). Au niveau du cluster frontal et central, un LPP plus ample pour les images positives comparativement aux neutres été observé dans les deux groupes d'enfants. La deuxième étude apporte des connaissances supplémentaires concernant la régulation des émotions chez les enfants et son incidence sur l'apparition de l'EEM (Leventon & Bauer, 2016). Dans cette étude, les auteurs ont proposé une tâche d'encodage d'images négatives, positives et neutres à un groupe de jeunes filles de 8 ans durant laquelle elles étaient invitées à réguler leurs émotions grâce à une stratégie de réévaluation cognitive censée réduire l'éveil émotionnel. Un à cinq jours après la phase d'encodage, une tâche de reconnaissance leur était proposée avec les images initiales, les images initiales réévaluées et de nouvelles images. Les auteurs ont analysé l'activité neuronale en réponse aux images émotionnelles et neutres durant la phase d'encodage et la phase de reconnaissance. Au niveau comportemental, les auteurs ont démontré un effet de *négativité* avec de meilleures performances pour la reconnaissance des images négatives par rapport aux neutres, sans aucune différence entre les images positives et neutres. En revanche, cet effet de *négativité* disparaissait pour les images négatives réévaluées qui n'étaient pas mieux reconnues que les images neutres. De plus, le LPP était réduit pour les images négatives réévaluées lors des phases d'encodage et de reconnaissance. Cette étude montre donc que les stratégies de régulation des émotions négatives peuvent affecter l'EEM chez les enfants ainsi que l'amplitude du LPP lors de l'encodage et de la reconnaissance. Ceci souligne le rôle important de l'arousal durant l'encodage d'images négatives sur l'émergence éventuelle d'un EEM, dès l'âge de 8 ans.

À ce jour, l'effet Dm relatif à l'activité neuronale durant l'encodage d'un item ultérieurement rappelé par rapport à un item oublié, n'a encore jamais été étudié pour des items émotionnels chez les enfants. Pourtant, une récente étude de Rollins & Riggins (2018) utilisant des items non-émotionnels montre que les enfants de 6 à 8 ans et les adolescents de 12 à 13 ans ont un effet Dm comparable à des jeunes adultes au niveau des clusters frontal, central et pariétal durant la fenêtre temporelle 700-900ms post-stimulus. Ces résultats suggèrent un développement relativement précoce des corrélats neuronaux associés à un encodage efficace chez les enfants. Néanmoins, il semble important d'évaluer quels processus mnésiques (encodage, consolidation, récupération) sont modulés par les émotions chez les enfants, et à quel point les modèles de l'EEM existants chez l'adulte sont applicables chez des individus encore en développement, notamment les modèles de

la médiation cognitive et de la consolidation. Bien que des premiers indices semblent montrer que les émotions influencent le processus de consolidation (Prehn-Kristensen et al., 2009, 2013) et de récupération (Leventon et al., 2014, 2016) chez les enfants, aucune étude ne s'est encore intéressée à l'influence des émotions sur le processus d'encodage. Il semble donc important de s'intéresser aux facteurs cognitifs censés faciliter l'encodage des informations émotionnelles dans cette population, en lien avec le modèle de la médiation cognitive. L'évaluation de l'effet Dm, et des fluctuations du LPP durant l'encodage efficace de stimuli émotionnels par rapport à des stimuli neutres, permettrait ainsi d'obtenir des indices neuronaux du modèle de la médiation cognitive chez les enfants. En effet, ces modulations neuronales semblent refléter en partie le plus grand engagement attentionnel envers les stimuli émotionnels durant l'encodage, ce qui constitue selon ce modèle, l'un des facteurs cognitifs permettant l'émergence de l'EEM. Une des études comprises dans ce travail de thèse a notamment été créée afin de pallier ces lacunes, grâce à l'étude des corrélats neuronaux associés à l'EEM durant l'encodage chez les enfants et les adultes (Partie 1, Chapitre 2, sous-chapitre II).

En résumé

Dans le dernier sous-chapitre de la Partie 1, nous avons vu que les quelques études réalisées sur l'EEM au cours du développement tendent à montrer que les enfants présenteraient, au même titre que les adultes, un effet bénéfique des émotions sur la mémoire épisodique, et ceci dès l'âge de 5 ans. Ces études se sont, cependant, concentrées sur l'évaluation de l'EEM en mémoire de l'item et ne donnent aucune indication sur l'EEM en mémoire associative chez l'enfant dans un contexte de laboratoire. Par ailleurs, des études en neuro-imagerie réalisées dans la population adolescente révèlent le recrutement de régions cérébrales communes à celles observées chez les adultes lors de l'émergence d'un EEM, bien qu'une plus grande activation de l'amygdale ait été soulignée chez les adolescents. En outre, des études réalisées en EEG montrent la modulation de l'effet ancien/nouveau par les émotions chez des enfants âgés de plus de 7 ans, comparativement à des enfants plus jeunes, reflétant l'influence des émotions sur les corrélats neuronaux associés à la récupération mnésique à partir de 7 ans. Ceci suggère également qu'il y aurait une intégration progressive entre les systèmes mnésique et émotionnel au cours du développement. Pour finir, les modèles explicatifs de l'émergence de l'EEM immédiat et à long terme développés chez l'adulte, à savoir les modèles de la médiation cognitive et de la consolidation, ne font pas de prédictions spécifiques pour des individus en cours de développement. Bien que des études aient analysé l'EEM à long terme chez les enfants et donnent des premiers indices sur l'applicabilité du modèle de la consolidation dans le développement, aucune étude, en revanche, n'a testé la pertinence du modèle de la médiation cognitive chez les enfants. Au vu de la littérature existante sur la mémoire épisodique, le traitement des émotions et l'EEM, à la fois chez l'adulte et au cours du développement ontogénétique, le sous-chapitre suivant va décrire les objectifs principaux de la première partie de ce travail de thèse concernant l'étude de l'EEM chez l'enfant au développement typique.

V. Objectifs de la première partie

L'effet des émotions sur la mémoire, ou EEM, suscite l'intérêt des chercheurs depuis de nombreuses années, à la fois par le biais de travaux en psychologie cognitive et neuropsychologie mais aussi en neuro-imagerie. La littérature abondante dans ce domaine chez l'adulte apporte des connaissances solides sur les mécanismes cognitifs et neurobiologiques à l'origine de ce phénomène, les bases cérébrales qui le sous-tendent et les facteurs phénoménologiques susceptibles de le moduler. En revanche, encore aujourd'hui, l'un des champs de l'EEM reste largement inexploré, à savoir le champ du développement. Or, l'enfance est une période charnière durant laquelle des modifications majeures émergent au niveau du fonctionnement cérébral, sous-tendant le développement cognitif et émotionnel de l'enfant jusqu'à l'âge adulte. Il est, ainsi, essentiel de s'interroger sur l'émergence et la nature de l'interaction entre mémoire et émotions au cours du développement, à la fois d'un point de vue comportemental et neurophysiologique.

Jusqu'à présent, les études s'étant intéressées à l'EEM chez les enfants tendent à montrer que l'interaction entre mémoire et émotions se mettrait en place assez précocement au cours du développement puisque les émotions sembleraient améliorer les performances en mémoire des enfants, dès l'âge de 5 ans. En revanche, de nombreuses questions restent encore en suspens concernant l'EEM au cours du développement. Les études s'étant intéressées à cet effet chez les enfants se sont majoritairement focalisées sur un seul composant de la mémoire épisodique, à savoir la mémoire de l'item. Or, la mémoire épisodique est une fonction complexe nécessitant l'association de différents éléments d'un épisode, et dont les composants arborent une trajectoire développementale spécifique et peuvent être différemment affectés par les émotions chez l'adulte. De plus, la plupart des études n'ont pas intégré plusieurs groupes d'âges dans leurs protocoles expérimentaux, excluant ainsi l'analyse des éventuelles modulations de l'EEM associées à l'âge. Une autre question concernant l'EEM chez les enfants réside également dans l'effet différentiel de la valence émotionnelle, négative ou positive, de l'information sur la mémoire. De récentes études proposent que les enfants seraient sujets au même effet de *négativité* en mémoire fréquemment observé chez les jeunes adultes. De plus amples investigations sont nécessaires afin de distinguer cet

effet particulier de valence sur la mémoire chez les enfants, en comparaison directe avec un groupe de jeunes adultes. Pour finir, d'autres études soulignent l'importance de l'utilisation de multiples mesures, à la fois comportementales, physiologiques et neuronales, afin d'analyser de façon plus systématique l'émergence et les spécificités de l'EEM chez les enfants, qui peuvent différer suivant les mesures appliquées.

L'objectif principal de la première partie de ce travail de thèse vise donc à élargir le champ des connaissances concernant l'EEM à l'analyse de ses spécificités au cours du développement typique. La première étude, comportant deux expériences comportementales, a été créée afin de pallier les faiblesses relevées dans la littérature actuelle concernant l'évaluation de l'EEM pour les différents composants de la mémoire épisodique, ainsi que leur modulation respective associée à l'âge. Ainsi, cette première étude s'est intéressée à l'évaluation de l'EEM en mémoire de l'item et en mémoire associative grâce à la réalisation de deux expériences avec deux groupes d'enfants âgés de 8 à 11 ans, en comparaison avec deux groupes de jeunes adultes. En outre, devant le peu d'études existant concernant le développement des corrélats neuronaux sous-tendant l'EEM chez les enfants, la deuxième étude s'est intéressée aux réponses neuronales associées au traitement des émotions et à l'EEM durant l'encodage d'images chez un groupe d'enfants âgés de 8 à 11 ans et un groupe de jeunes adultes, grâce à la technique des PE (mesures du LPP et de l'effet Dm). Cette deuxième étude visait, tout d'abord, à analyser plus systématiquement l'EEM chez les enfants, en comparaison avec les adultes, afin de révéler d'éventuelles différences développementales au niveau comportemental et/ou neuronal. De plus, cette étude avait pour objectif d'apporter des premiers indices neuronaux sur le développement des processus cognitifs mis en jeu dans le modèle de la médiation cognitive, notamment les processus attentionnels, et ainsi obtenir de nouvelles preuves sur l'éventuelle validité de ce modèle dans le champ du développement.

Chapitre 2.

Études expérimentales.

I. Étude 1 (Expériences 1 et 2) - EEM en mémoire de l'item et en mémoire associative chez l'enfant et l'adulte : étude comportementale

Article 1 : Massol, S., Vantaggio, S., & Chainay, H. (2020). Emotional modulation of episodic memory in school-age children and adults: Emotional items and their associated contextual details. *Journal of Experimental Psychology: General*, 149(9), 1684-1703.

1. Préambule

Dans l'Étude 1, deux expériences comportementales ont été conçues afin d'évaluer l'EEM pour les deux composants principaux de la mémoire épisodique, à savoir la mémoire de l'item et la mémoire associative, chez les enfants et les adultes. Pour cela, deux types de stimuli (images et mots) avec une valence émotionnelle négative, positive ou neutre, ainsi que plusieurs contextes de présentation des stimuli (visuel, auditivo-verbal, visuo-spatial) ont été utilisés. L'objectif principal de cette étude était de valider les observations de précédentes études concernant l'EEM en mémoire de l'item chez les enfants. Ceci était réalisé grâce à l'utilisation de deux types de stimuli pour prévenir d'éventuelles différences liées à la méthodologie utilisée, et pouvoir généraliser nos résultats. De plus, cette étude permettait d'étendre le champ des connaissances à l'évaluation de l'EEM en mémoire associative chez les enfants, qui n'avait encore jamais été analysé en condition de laboratoire pour cette population. Là encore, diverses informations contextuelles ont été utilisées afin de prendre en compte les aspects connus dans la littérature chez l'adulte comme pouvant influencer l'EEM en mémoire associative, notamment les aspect intrinsèques et extrinsèques des détails contextuels. Ainsi, l'information contextuelle à associer avec les stimuli était le genre de la voix (féminin ou

masculin) avec laquelle les mots étaient prononcés (contexte auditivo-verbal intrinsèque) et la forme du cadre (fenêtre ou tableau) dans lequel les images étaient présentées (contexte visuel extrinsèque) dans l'Expérience 1, et la localisation spatiale (matrice de 16 cases) des images et des mots présentés visuellement (contexte visuo-spatial intrinsèque) dans l'Expérience 2.

Deux groupes d'enfants âgés de 9 à 11 ans ($n = 32$) et de 8 à 10 ans ($n = 36$) ont respectivement participé à l'Expérience 1 et 2, et ont été comparé à deux groupes équivalents de jeunes adultes âgés de 18 à 30 ans. Pour chaque expérience, les participants ont réalisé une tâche d'encodage intentionnel de stimuli suivie par une phase de récupération immédiate des stimuli et de leurs contextes de présentation. Pour cela, ils ont été soumis à une tâche de reconnaissance des stimuli (mémoire de l'item), une tâche de rappel des informations contextuelles associées aux stimuli (mémoire associative) et enfin une tâche de rappel libre des stimuli (mémoire de l'item).

Nos hypothèses pour cette étude étaient que les enfants présentent un effet des émotions sur la mémoire de l'item, avec des meilleures performances mnésiques pour les stimuli négatifs et positifs comparativement aux neutres, et ceci quel que soit le type de stimulus (images ou mots). Nous nous attendions également à ce que les stimuli négatifs présentent un avantage en mémoire comparativement aux stimuli positifs chez les enfants, à la lumière de certaines études ayant montré un biais attentionnel et une influence plus importante des stimuli négatifs en mémoire durant le développement. En revanche, nous ne pouvions pas donner une hypothèse claire concernant l'effet des émotions sur la mémoire associative chez les enfants compte tenu du développement tardif de ce type de mémoire pouvant s'étendre jusqu'au milieu de l'adolescence. En effet, les émotions pouvaient soit atténuer l'écart de performances fréquemment observé entre les enfants et les adultes pour la mémoire associative, soit accentuer cet écart dans le cas où les ressources attentionnelles des enfants seraient capturées par l'item central émotionnel, ne permettant pas de traiter efficacement les détails contextuels et donc de les associer avec l'item central.

Cette étude a fait l'objet d'une publication dans *Journal of Experimental Psychology: General* et est présentée sous forme d'article scientifique ci-après. L'article comprend le cadre théorique de notre étude, les méthodologies utilisées dans l'Expérience 1 et 2, les résultats obtenus pour chaque expérience, la discussion des résultats de chaque expérience, ainsi qu'une discussion générale concernant l'étude dans son ensemble.

Emotional modulation of episodic memory in school-age children and adults: emotional items and their associated contextual details

Publié dans *Journal of Experimental Psychology: General*, 149(9), 1684-1703.

Sarah Massol, Sophie Vantaggio, & Hanna Chainay

Laboratoire d'Étude des Mécanismes Cognitifs (EMC), EA3082
Université Lumière Lyon 2, Bron, France

2. Abstract

It is well established that emotional events are better remembered than neutral events. However, little is known about Emotional Enhancement of Memory (EEM) in children. This is particularly the case when the main components of episodic memory are considered: core information (item memory) and its associated contextual details (associative memory). In two experiments, the present study tested whether the negative or positive emotional valence of words and pictures can influence item and associative memory. The contextual information to be associated with items was the gender of the voice pronouncing words and the type of frame in which pictures were displayed in Experiment 1, and the spatial location of stimuli in Experiment 2. Two groups of 8 to 11-year-old children (Exp 1 $n = 32$ and Exp 2 $n = 36$) performed the experiments and were compared to two groups of equivalent numbers of young adults. Participants completed an intentional-encoding task followed by immediate item recognition, associative recall and item recall tasks. Over the two experiments and in both groups, the results revealed: (1) no EEM for words and pictures in recognition tasks, (2) EEM for words in item recall and associative recall tasks, and (3) mixed results for pictures, with an EEM being observed in item recall tasks but not systematically in associative

recall tasks. By extending the results over two types of stimuli and their associated contextual information, our study provides new knowledge concerning the effect of emotions on episodic memory in children, which seems to be similar to that observed in young adults.

Keywords: school-age children, emotions, episodic memory, associative memory

3. Introduction

Emotionally charged information is more likely to be remembered than neutral information (for reviews, see Hamann, 2001 and Dolcos, Katsumi, Weymar et al., 2017). This effect, which is referred to as the emotional enhancement of memory (EEM), has been convincingly demonstrated in young and older adults regardless of the type of stimulus (pictures, words, stories etc.), type of memory task and interval between the initial encoding phase and the later memory retrieval test (Kensinger & Schacter, 2008a). Emotional information is thought to be based on two underlying dimensions: arousal and valence (Russel, 1980, 2003; Barrett, Mesquita, Ochsner, & Gross, 2007). Arousal refers to a continuum that varies from calmness to excitement, whereas valence refers to a continuum that varies from negativity to positivity, with neutral as an intermediate value. Both dimensions are involved in the emotional enhancement of memory (Kensinger & Corkin, 2004).

Although there is general agreement about the emotional regulation of memory in adults, the age-related difference in EEM is still being investigated. In fact, a *negativity* effect (better memory for negatively-valenced stimuli) seems to be more specific to young adults and a *positivity* effect (better memory for positively-valenced stimuli) more specific to older adults (Murphy & Isaacowitz, 2008). This may be explained by age-related differences in the availability of cognitive resources (e.g., Labouvie-Vief, Grühn & Studer, 2010) or emotional regulation (e.g., Carstensen, Fung, & Charles, 2003). Surprisingly, less is known about the emotional enhancement of memory in typically developing children. Nevertheless, the availability of cognitive resources and emotional processing also present specific patterns in children, which differ from those observed in young adults (Luna, Garver, Urban et al., 2004; Thompson, 2011; Gee, Humphreys, Flannery et al., 2013; Perlman & Pephrey, 2011; Todd, Evans, Morris, Lewis & Taylor, 2010; Kujawa, Klein & Hajcak, 2012). In particular, a recent review by Michalska & Davis (2019) suggests that, from a behavioral and functional perspective, emotional responses and regulation undergo significant development during childhood and adolescence, although this pattern of findings may vary

depending on multiple factors such as the type of task, stimulus or analysis used. Importantly, Gee et al. (2013) showed a decline in amygdala reactivity to fearful faces coupled with increasing regulatory activity of the prefrontal cortex (PFC) during development. According to this study, this regulatory development seems to emerge as of 9 years of age and to grow stronger with age. In contrast, some findings have shown that children as young as 5 years old gave adult-like emotional responses in terms of subjective ratings and neuronal activity when pictures of visual scenes were used as stimuli (McManis, Bradley, Berg et al., 2001, Hajcak & Dennis, 2009; McRae, Gross, Weber et al., 2012). Moreover, children showed the same attentional bias towards threatening stimuli as young adults (for a review, see Morales, Fu, & Perez-Edgar, 2016). Considering these similarities or discrepancies relative to emotional reactivity and regulation between children and adults, we might expect the emotional regulation of memory processes in children to also present certain specificities. However, these specificities have largely been under-investigated.

Few studies have examined children's memory for emotional information and these have reported inconsistent findings. Davidson, Luo, & Burden (2001) investigated 6 to 11-year-old children's recall of emotional and non-emotional behaviors presented in short stories. The results showed that the children recalled more negative and positive emotional behaviors than non-emotional behaviors when asked to perform immediate recall and recall after a 24-hour interval. Cordon, Melinder, Goodman, & Edelstein (2013) showed that 8 to 12-year-old children recognized more negative images than neutral ones after a one-week interval. In addition, Quas & Lench (2007) observed that 5 to 6-year-old children's memory for fear-eliciting video clips was positively correlated with physiological arousal during encoding. However, as the Cordon et al. (2013) and Quas & Lench (2007) studies did not include positive stimuli, they provide only a partial insight into emotional memory in children. By contrast, the study by Van Bergen, Wall, & Salmon (2015) raises the possibility of a *negativity* effect in young children. The authors investigated 5 to 6-year-old children's recall of emotional experiences presented in six brief stories and showed that they recalled more emotional stories than neutral ones and also that negative stories were recalled better than positive ones. Taken together, these studies suggest that the emotional content of the stimuli enhances memory in children (for a review, see Hamann & Stevens, 2013). Nevertheless, the results of other studies, which did not show better memory for emotional than neutral stimuli, are inconsistent with this suggestion (Howe, Candel, Otgaar, Malone, & Wimmer, 2010; Leventon, Stevens, & Bauer, 2014; Peterson & Bell, 1996). Nonetheless, although Leventon et al. (2014) did not find an EEM in children's behavioral

recognition responses, the neuronal activity associated with picture recognition was larger for negative pictures than for positive and neutral ones in children older than 7.5 years.

One important point is that all these studies have focused primarily on item memory tasks, i.e. tasks that involve the ability to remember that an item was previously encountered. However, according to studies with adults, emotions also play a role in the ability to remember contextual details associated with an item (associative memory). The contextual details associated with an item can refer to the time or place at which the item was encountered, from whom it was learned, its modality of presentation etc. In several studies performed with young adults, an emotional enhancement of associative memory occurred when participants had to remember the color in which words were written (Doerksen & Shimamura, 2001; Kensinger & Corkin, 2003; D'Argembeau & Van der Linden, 2004) or the spatial location of words (D'Argembeau & Van der Linden, 2004) and pictures (Mather & Neshmith, 2008; Nashiro & Mather, 2010). Taken together, these findings may indicate that emotional events are often remembered in greater detail than neutral ones. However, other findings in the literature point towards an *emotion-induced memory trade-off* in associative memory (for a review, see Kensinger, 2009). This *memory trade-off* suggests that central arousing aspects of an emotional event are better remembered than the associated neutral peripheral information. This may be due to emotional arousal which tends to restrict the attentional focus to central aspects at the expense of irrelevant contextual details. This, in turn, impairs the binding (integration) of central and peripheral aspects into a stable memory representation. In addition, behavioral findings suggest that the effect of emotions on associative memory could be different depending on whether the to-be-remembered contextual details are intrinsically linked to the emotional item (within-item features), or whether they are extrinsic or contextual in nature (Yonelinas & Ritchey, 2015). Thus, emotions would support memory for specific intrinsic features but not for extrinsic contextual details such as nearby objects (Nashiro & Mather, 2010) or prompts (Mao, You, Li, & Guo, 2015) associated with emotional pictures or for colored frames surrounding emotional scenes (Rimmele, Davachi, Petrov, Dougal, & Phelps, 2011).

It is possible that developmental differences described in the effect of emotions on item memory may also be observed in associative memory. Support for this hypothesis comes from a number of studies that have investigated age-related differences in the emotional enhancement of associative memory in adults. The findings have shown that the *memory trade-off effect* is greater in older than in younger adults, with poorer memory for contextual details being observed, even in

the case of details intrinsically linked to the emotional item (Nashiro & Mather, 2010). The authors suggested that, due to their limited cognitive resources, older adults do not use effective strategies to bind the emotional item with its contextual features, and that this in turn leads to the impairment of memory for the latter despite the presence of an emotional enhancement of item memory.

Although, as far as we know, no study has examined the effect of emotions on associative memory in children, some authors have investigated the developmental time course of associative memory in this population, since this is a critical component underpinning episodic memory (for a review, see Raj & Bell, 2010). Cykowicz, Friedman, Snodgrass, & Duff (2001), for example, compared the developmental change in associative memory, relative to item memory, in 7 to 9-year-old children and young adults. They showed that performance improved with age for both item and associative memory, and that the age difference for associative memory was much larger than for item memory. More recently, Picard, Abram, Orriols & Piolino (2017) showed that factual memory is quite efficient from the age of 6, but that it increases continuously from the age of 8 through to young adulthood, that associative memory for details improves greatly from the age of 10, with very few differences being observed between 6 and 10 years, and that spatial and temporal associative memory develop progressively throughout childhood and reach maturity in young adolescence. From a neurodevelopmental point of view, the development of associative memory with age is thought to be due to functional and structural changes in the hippocampus and the medial temporal lobe (MTL) structures that occur during childhood (DeMaster & Ghetti, 2013; Guillery-Girard, Martins, Deshayes et al., 2013; Sastre III, Wendelken, Lee, Bunge, & Ghetti, 2016) and are critical for binding items with their context (Diana, Yonelinas & Ranganath, 2007), as well as to the protracted maturation of the prefrontal cortex (PFC) until young adulthood (Gogtay, Giedd, Lusk et al., 2004) and the increasing structural and functional connectivity of the PFC with MTL regions (Ofen, Chai, Schuil, Whitfield-Gabrieli, & Gabrieli, 2012; Demaster & Ghetti, 2013). For example, Guillery-Girard et al. (2013) investigated the development of episodic memory in children in correlation with gray matter volume by exploring its three main associative components: feature (what), spatial (where) and temporal (when) information. The authors found that the performance of feature associative memory increases continuously up to the age of 10 years, that spatial associative memory performance increases until early adulthood and that temporal associative memory performance increases sharply between 9 and 10 years of age. These differential changes are related to the decrease in gray matter volume in cerebral networks, including dorsolateral and ventrolateral PFC, temporal regions and the hippocampus. Similar results were

found by Lee, Wendelken, Bunge & Ghetti (2016). More recently, Lee, Fandakova, Johnson, Cohen, Bunge & Ghetti, (2019) suggested that these differences in developmental time course are related to structural changes in the anterior and posterior hippocampus that occur through to adolescence. Taken together, these findings suggest that the different components of episodic memory jointly improve in children from 6 years old to late adolescence, but with different developmental time courses.

Therefore, with regard to the continuous development of item memory and the different types of associative memory in children, it seems essential to evaluate whether emotions might interact differentially with these components of episodic memory in this population. We therefore conducted two experiments examining the retrieval of items as well of associated contextual information through different paradigms. In Experiment 1, two different types of contextual information were used to evaluate associative memory, namely the shape of the frame in which pictures were displayed, and the gender of the voice (male or female) in which words were spoken. As the former type of information is somewhat extrinsic and the latter somewhat intrinsic to the item, we used the same type of contextual information, i.e. the spatial location of the stimuli, for both pictures and words in Experiment 2. As one possible explanation for the inconsistent findings relating to emotional enhancement of item memory in children is the variability in the employed methodology (e.g., using pictures vs. words as stimuli, and recall vs. recognition as memory retrieval tasks), it was essential in the present study to examine this effect in a more systematic way. Thus, because most studies have focused only on one type of stimulus, most frequently pictures, one of the goals of the current research was to examine the consistency of EEM in children across two different types of stimuli, namely pictures and words. Further, typically only one type of memory test has been used in previous studies, i.e. a recall or recognition task. Thus, in the present study, it was essential to use both tasks, together with an associative recall task, in order to provide a more systematic assessment of the effect of emotions on the different components of episodic memory. Moreover, most studies have used only negative and neutral stimuli, thus rendering impossible the observation of any *negativity* or *positivity* effects in children. In the present study, both negative and positive stimuli were used to address an important shortcoming in our understanding of the emotional modulation of memory in children.

Two different groups of 8 to 11-year-old children, chosen because this age seems to be crucial for the development of both item and associative memory, performed the two experiments and were compared to two different groups of young adults. This approach made it possible to

assess age-related differences. Through these two experiments, we hope to obtain new knowledge of emotional processing and memory functioning in school-age children.

Experiment 1

In this experiment, our goal was to examine the effect of emotions on item memory using recognition and free recall tasks, as well as to examine their effect on associative memory using an associative recall task. This was done in order to investigate the main components of episodic memory, i.e. item and associative memory. Specifically, we examined whether there is a dissociation between the ability to remember emotional (negative or positive) and neutral items and the ability to remember the item's associated contextual information. In this experiment, the contextual information used to evaluate associative memory was the gender of the voice (female, male) in which words were spoken (source) and the shape of the frame (picture, window) in which pictures were presented (context). For the item memory task, we hypothesized that negative and positive stimuli would elicit better memory performance than neutral ones in children, and that this effect could be broadened to different types of stimuli (pictures or words). Along with a general emotional enhancement of memory, we considered it possible that a *negativity* effect might also occur given the attentional bias towards negative stimuli (Morales et al., 2016) and the stronger neuronal recognition responses observed for negative pictures than for positive ones (Leventon et al., 2014) among school-age children. However, it was not clear whether children would experience an emotional enhancement of associative memory. Given the late development of associative memory for non-emotional information in children (Cycowicz et al., 2001; Picard et al., 2017), emotions could either reduce this associative memory deficit or exacerbate it because of the lower availability of cognitive resources in children compared to young adults (Luna et al., 2004). The latter hypothesis would be similar to the case of older adults, who have poorer associative memory for emotional items.

4. Exp1: Method

Participants

Thirty-two typically developing children (9-11 years of age, 16 girls and 16 boys) and 32 young adults (18-29 years of age, 25 women and 7 men) participated in this study (see Table 1). It should be noted that our group of young adults was not balanced on gender. However, we did not expect gender differences in the participants' performances in this study. The sample size was chosen in the light of an *a priori* power analysis (Faul, Erdfelder, Lang & Buchner, 2007) based on previous studies (ex. Cordon et al., 2013) that estimated that at least 20 participants per group were required to obtain a small effect size ($d = 0.3$) with power of 0.80. The children were recruited from a local elementary school, and the young adults were undergraduate students recruited at the university. All the participants were healthy, native-French speakers, and reported no history of psychiatric, neurodevelopmental, neurological or learning disorders. They were not taking any somatic medications and did not have any uncorrected visual or hearing problems. Prior to testing, the children's parents and the young adults gave written informed consent, and the children gave verbal assent in accordance with the Helsinki declaration. The research was approved by the Ethical Review Board (Comité de Protection des Personnes Nord-Ouest IV, Lille, France, No. 2017 A03321 52).

Stimuli and Material

Pictures

Sixty color photographs (567 x 425 pixels) depicting various types of scenes with common animate and inanimate elements were used (equal number of pictures depicting and not depicting humans). In this way, 20 positive, 20 negative and 20 neutral pictures were selected from the Developmental Affective Photo System (DAPS: Cordon et al., 2013), which provides ratings of the emotional valence, arousal and complexity of pictures obtained from adults and children. The pictures were similar for the children and adults and were selected to have equivalent valence and arousal ratings across the two age groups (all t-test comparisons were nonsignificant, $p > .05$, see Appendix – Table 3 for means and standard errors). For the children, the positive, negative and neutral pictures differed significantly in terms of valence (all t-test comparisons were significant, $p < .0001$) and emotional pictures (negative and positive) were significantly more arousing than neutral pictures (both $p < .0001$). Negative and positive pictures did not differ in terms of arousal ($p = .65$). For the

adults, the positive, negative and neutral pictures differed significantly in terms of valence (all t-test comparisons were significant, $p < .0001$) and emotional pictures (negative and positive) were significantly more arousing than neutral pictures (both $p < .0001$). Negative and positive pictures did not differ in terms of arousal ($p = .17$). For both age groups, the positive, negative and neutral pictures were also matched on visual complexity (all $p > .17$). The 60 pictures were split into two lists of 30 pictures (10 positive, 10 negative and 10 neutral) for the encoding and retrieval phases of our experiment in such a way that each list was used equally often for the two phases. All the pictures were presented visually, with half of the pictures framed with a gray picture frame and the other half with a gray window frame (the frame for the two halves was reversed across participants) in equal proportions over the positive, negative and neutral pictures within each list. In neither of the valence categories did the pictures differ in terms of valence, arousal or complexity between the two lists and this was true for both children and adults (all t-test comparisons were nonsignificant, $p > .22$).

Words

Sixty French concrete and abstract words were used (equal number of concrete and abstract words). Thus, 20 positive, 20 negative and 20 neutral words were selected from two large corpora of French words (FAN and FANchild databases: Monnier & Syssau, 2014, 2017) in the light of their emotional valence and arousal as evaluated by adults and children. The words were similar for the children and adults and were selected to have equivalent valence and arousal ratings across the two age groups (all t-test comparisons were nonsignificant, $p > .05$, see Appendix – Table 3 for means and standard errors). For the children, the positive, negative and neutral words differed in terms of valence (all t-test comparisons were significant, $p < .0001$) and emotional words (negative and positive) were significantly more arousing than neutral words (both $p < .0001$). Negative and positive words did not differ in terms of arousal ($p = .11$). For the adults, the positive, negative and neutral words differed in terms of valence (all t-test comparisons were significant, $p < .001$) and emotional words (negative and positive) were significantly more arousing than neutral words (both $p < .0001$). Negative and positive words did not differ in terms of arousal ($p = .29$). For both age groups, the positive, negative and neutral words were also matched on subjective psycholinguistic index *imageability*, word length and frequency of use by school-age children and adults (all $p > .17$). All the words were concomitantly presented visually and aurally. They were recorded using Macintosh voice synthesis with a female voice (“Audrey”) with a French accent for half of the words

and a male voice (“Thomas”) with a French accent for the other half (the gender of the voice for the two halves was reversed across participants). The voices were presented in equal proportions over the positive, negative and neutral words. All the words were presented with a neutral tone of voice for two reasons: firstly, some words did not have an emotional meaning *per se* and it would therefore have been difficult to decide on the exact type of emotion that should be used to pronounce them; secondly, it has been shown that valence ratings for negative words, but not for positive words, can be affected by the tone in which they are spoken (emotional vs. neutral), meaning that negative words are judged as more negative when spoken in a negative tone than in a neutral tone (Bertels, Kolinsky, & Morais, 2009). This could potentially have interfered with the selection criteria for our stimuli. The 60 words were split into two lists of 30 words (10 positive, 10 negative and 10 neutral) for the encoding and retrieval phases of our experiment in such a way that each list was used equally often for the two phases. In neither of the valence categories did the words differ in terms of valence, arousal, *imageability*, word length and frequency of use between the two lists and this was true for both children and adults (all t-test comparisons were nonsignificant, $p > .14$).

Mood and Neuropsychological Assessments

The Face Mood Assessment Test for Children (FMATC – Christodoulou & Burke, 2016) and the French version of the Brief Mood Introspection Scale (BMIS – Mayer & Gaschke, 1988) were administered to obtain self-reports of the children’s and adults’ emotional states. In the FMATC, the children had to select one of six faces illustrating emotional expressions on a scale of 1 (sad) to 6 (happy). The BMIS is a mood adjective scale consisting of 16 mood-adjectives which can indicate, among other moods, a pleasant or unpleasant mood. The BMIS was shortened to 12 mood-adjectives for the children by removing all the adjectives that are not commonly used and which could have impeded understanding. Thus, mood was evaluated on a scale of 16 (very unpleasant mood) to 64 (very pleasant mood) for the adults and 12 (very unpleasant mood) to 48 (very pleasant mood) for the children. In order to assess the children’s memory ability, the spatial and story memory subscales of the Children’s Memory Scale (CMS – Cohen, 1997) were administered. The children’s executive functions were measured with the Rey Complex Figure Test (RCF – Rey, 1959) and the Test of Everyday Attention for Children (TEA-Ch – Manly, Robertson, Anderson, & Nimmo-Smith, 1999), and those of the adults were measured using the RCF and the Trail Making Test A and B (TMT-A-B). The different tests evaluating executive functions were used as

filler tasks in the procedure. Moreover, the Wechsler Intelligence Scale for Children (WISC V – Wechsler, 2014) was administered to the children in order to assess their verbal comprehension (similarities subtest) and fluid reasoning (matrix reasoning subtest).

Procedure

Before starting the experiment, the children and adults completed the FMATC and BMIS to self-report their emotional state.

The study consisted of two similar parts (both composed of encoding and retrieval phases), one including pictures and the other including words. These were performed successively in an order which was counterbalanced between participants.

During the picture encoding phase, 30 stimuli, including 10 positive, 10 negative and 10 neutral pictures, were presented successively in a pseudorandom but fixed order in such a way that no more than two pictures of the same valence or with the same frame occurred in succession. Each picture was presented on a computer screen for 3000ms for adults and 5000ms for children and was preceded by a 1-s fixation cross to ensure that the participants fixated the center of the screen. The participants were asked to remember the pictures and the frame in which they were displayed. To focus the participants' attention, they were asked to respond to the question 'Does the picture depict a human?' by pressing one of two keys, corresponding to 'yes' or 'no', respectively, and labeled with colored stickers. They did this for each of the pictures. The proportion of pictures which contained or did not contain a human was equivalent for each valence category and for each type of frame. After the encoding phase, the participants performed a 5-min filler task before completing the retrieval phase. First, they had to complete a recognition task together with an associative recall task. They saw the 30 old pictures from the encoding phase without the frame intermixed with 10 new pictures from each valence category to give a total of 60 pictures. The pictures were presented in a pseudorandom but fixed order in such a way that no more than three old or new pictures and no more than two pictures of the same valence occurred in succession. The participants indicated whether they thought each of the pictures was old or not using the same keypress response as previously. They then had to indicate, in the same way, if they thought the picture had been framed with a picture frame or a window frame (associative recall). For the pictures they thought were new, the participants were instructed to make a random response about the frame. For each task, the two options appeared below the picture in the same colors as the corresponding keypress responses. Each picture was presented on the computer screen until the

response was made by the participant and was preceded by a 1-s fixation cross. The participants were asked to respond as accurately and quickly as possible. The two computer responses for the encoding phase and the retrieval phase (recognition and associative recall tasks) were counterbalanced across participants (see Figure 10). Finally, after another 5-min filler task, which followed the recognition and associative recall tasks, the participants had to complete a free item recall task and were instructed to orally recall as many pictures as they could remember from the encoding phase (out of the 30), regardless of the order in which they had appeared. This was to prevent potential interference effects in the associative recall task as reported by D'Argembeau & Van der Linden (2004) in a situation in which the free recall task was completed first. This may have been because the participants reactivated contextual information during the item recall task and this, in turn, might have interfered with the later associative recall task. For this task, the participants were instructed to give as many details about the pictures as possible so that anyone could recognize them. If the experimenter felt that the description of the pictures was not precise enough, she asked the participant for clarification. The experimenter wrote down the participants' answers. If there was any doubt about the identity of the picture during scoring, double-scoring was performed.

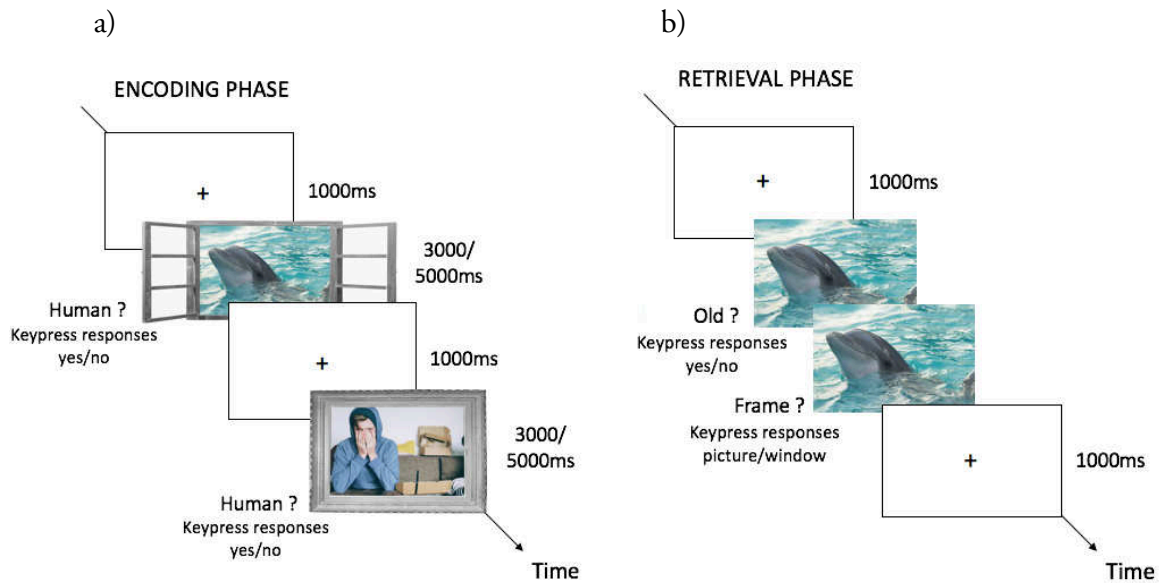


Figure 10. Procedures used in a) encoding phase and b) retrieval phase for pictures.¹

The procedure for the word encoding and retrieval phases was identical to that for pictures, except that the words were displayed concomitantly visually and aurally in the encoding phase, with a 1-s fixation cross preceding each word onset. The adult participants were asked to respond to the question ‘Is the word concrete?’, while the children had to answer the question ‘Can you physically touch the object named by the word?’. The responses were given by pressing the same two keys as previously. In the retrieval phase, the words were only presented visually and the participants indicated whether they thought each word was old or not and whether the word had been spoken with a female or a male voice. The same two keypresses were again used. The words were presented in black with a Courier New font in bold, 60-point size.

For both the picture and word parts, practice trials with 4 stimuli for the encoding phase were presented to make sure that the children understood how to complete the task. This was repeated as necessary until it was clear that the children understood. The experiment was programmed and run with the E-Prime software (2.0) on an HP PC.

¹ The pictures are not from the DAPS and are used for illustrative purposes only. They have been downloaded from the photography sharing website unsplash.com and are used in accordance with the Terms and Conditions of the website which do not require further permission.

At the end of the experiment, we administered several neuropsychological tests (described above) in order to characterize this population and to ensure that the cognitive functioning of all the children was within the normal range. This was indeed the case. The raw and standard means performances for all the tests are presented in Table 1.

Function	Test	Children N = 32	Young Adults N = 32
	Mean Age	10.45 (0.43)	23.75 (2.79)
	Female / Male	16 girls and 16 boys	25 females and 7 males
Mood	FMATC	5.14 (0.75)	/
	BMIS	38.94 (4.63)	51.75 (3.63)
Cognitive functioning	WISC-V Similarities	0.72 (0.20)	/
	WISC-V Matrix Reasoning	0.77 (0.23)	/
Memory	CMS Spatial location 1	0.73 (0.24)	/
	CMS Spatial location 2 (delayed recall)	0.68 (0.20)	/
	CMS Story 1 (units)	0.65 (0.26)	/
	CMS Story 2 (units delayed recall)	0.72 (0.25)	/
	CMS Story 2 (recognition)	0.51 (0.25)	/
	Rey Complex Figure (recall accuracy)	0.63 (0.28)	0.29 (0.28)
	Rey Complex Figure (copy accuracy)	0.65 (0.26)	0.74 (0.42)
Executive Functions	TEA-Ch	0.68 (0.29)	/
	TMT-A	/	0.63 (0.28)
	TMT-B	/	0.47 (0.24)

Table 1. Mood and neuropsychological assessments for children and young adults in Experiment 1.

Note: Raw mean scores are presented for FMATC and BMIS. Mean percentile ranks are presented for subtests of WISC-V, CMS, Rey Complex Figure, TEA-Ch and TMT-A-B. Standard deviations are in parentheses.

Data analysis

The scores for correct free recall (item memory for pictures and words), recognition (corrected recognition scores: HITs-FAs for pictures and words), and associative recall (associative memory: context for pictures and source for words) for the positive, negative and neutral stimuli were used for the statistical analysis². Preliminary analyses were performed to check for sphericity (Mauchly's test) and homogeneity of variance and no violations were found for any of the data. First, we ran a mixed-measures ANOVA including all the data, with Valence (positive vs. negative vs. neutral), Task (item recall vs. item recognition vs. associative recall), Stimulus (pictures vs. words) as within-subject factors and Group (children vs. adults) as between-subject factor. For associative recall (context or source), the mixed-measures ANOVA was performed on correct responses for correctly recognized items only. Then, mixed-measures ANOVAs with Valence (positive vs. negative vs. neutral) as within-subject factor and Group (children vs. adults) as between-subject factor, were performed on the different scores separately for the different tasks and for pictures and words. These were followed by planned comparisons. All the results in the text and figures are expressed in percentages.

5. Exp1: Results

See Appendix – Table 4 for means and standard errors of all the results of Experiment 1.

Global analysis

Here we report only the significant main effects and interactions. The ANOVA showed significant main effects of Valence $F(2,124) = 17.99$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .23$, Stimulus $F(1,62) = 5.01$, $p < .03$, partial $\eta^2 = .08$ and Task $F(2,124) = 1203.54$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .95$. The Valence x Task $F(4,248) = 5.76$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .09$, Stimulus x Task $F(2,124) = 26.52$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .30$ and Task x Group $F(4,248) = 20.29$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .25$, interactions were significant. Most importantly, the Valence x Stimulus x Task interaction was also significant,

² We also calculated the discriminability index d' and ran the statistical analysis on this index for pictures and words in both groups, i.e. children and adults. As the results were similar to those obtained for corrected recognition scores (HIT – FA), we do not report these analyses.

$F(4,248) = 3.90, p < .004$, partial $\eta^2 = .06$. First of all, for all the tasks (item recall, item recognition and associative recall), performances were similar for negative pictures and negative words, for positive pictures and positive words, and for neutral pictures and neutral words (all $p > .52$). To try to identify more precisely the effects of emotion as a function of the stimulus type and task, we performed separate mixed-measures ANOVAs, with Valence (positive vs. negative vs. neutral) as within-subject factor and Group (children vs. adults) as between-subject factor, on the different scores separately for pictures, words and for each task. These were followed by planned comparisons (see below).

Pictures

Item Recall

For the pictures in the recall task, the ANOVA yielded a significant Valence x Group interaction, $F(2,124) = 3.07, p < .05$, partial $\eta^2 = .05$. Planned comparisons showed that adults had better recall for negative (Mean = 44.1, SD = 3.2), $F(1,31) = 15.98, p < .001$, and positive (M = 41.6, SD = 3.2), $F(1,31) = 11.39, p < .01$, than for neutral stimuli (M = 28.1, SD = 2.8). The difference between negative and positive stimuli was not significant, $F(1,31) = .28, p = .60$. Children had better recall for negative stimuli (M = 37.5, SD = 3.1) than for positive (M = 26.9, SD = 3.2), $F(1,31) = 5.05, p < .05$, and neutral stimuli (M = 28.1, SD = 3.3), $F(1,31) = 6.82, p < .01$. The difference between positive and neutral stimuli was not significant, $F(1,31) = .09, p = .76$ (see Figure 11).

A significant main effect of Group also emerged, $F(1,62) = 6.35, p < .01$, partial $\eta^2 = .09$, with adults (M = 37.9, SD = 2.0) performing better than children (M = 30.8, SD = 2.0). A few intrusions of “new pictures” from the recognition task were also reported: 4 intrusions of negative pictures, 4 intrusions of positive pictures, and 2 intrusions of neutral pictures for the 32 participants overall.

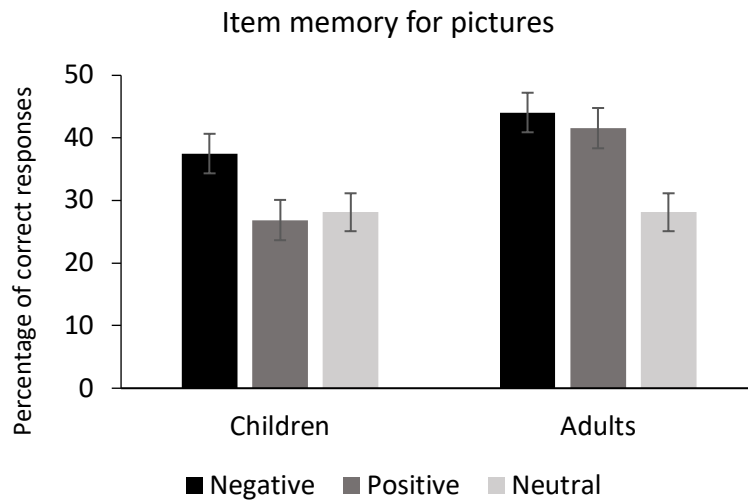


Figure 11. Mean percentage of correct responses for free recall of pictures as a function of group (children vs. adults) and emotional valence (negative vs. positive vs. neutral). Error bars represent standard errors.

Item Recognition

For the pictures in the recognition task, there were no significant main effects or interactions (all $p > .05$) but there was a trend toward a main effect of Valence, $F(2,124) = 2.92$, $p = .06$, partial $\eta^2 = .05$. Planned comparisons showed that the participants tended to recognize negative stimuli ($M = 88.4$, $SD = 1.5$) better than neutral ones ($M = 84.1$, $SD = 1.9$), $F(1,62) = 5.62$, $p < .05$. The difference between negative and positive stimuli ($M = 87.9$, $SD = 1.6$) was not significant, $F(1,62) = .053$, $p = .82$, and there was a trend toward better recognition of positive stimuli than neutral ones, $F(1,62) = 3.52$, $p = .07$.

Associative Recall

For the pictures in the associative recall task, there were no significant main effects or interactions (all $p > .05$). The associative recall proportions for context (frames) were as follows: negative ($M = 49.2$, $SD = 1.9$), positive ($M = 50.0$, $SD = 2.2$), and neutral pictures ($M = 49.7$, $SD = 2.0$).

*Words**Item Recall*

For the words in the recall task, the ANOVA yielded a significant main effect of Valence, $F(2,124) = 11.02$, $p < .0001$, partial $\eta^2 = .15$. Planned comparisons showed that participants had better recall for negative ($M = 32.2$, $SD = 1.9$), $F(1,62) = 22.38$, $p < .0001$, and positive stimuli ($M = 27.0$, $SD = 1.7$), $F(1,62) = 8.83$, $p < .01$, than for neutral stimuli ($M = 20.9$, $SD = 1.6$). The difference between negative and positive stimuli was not significant but there was a trend toward better recall of negative stimuli, $F(1,62) = 3.59$, $p = .06$ (see Figure 12-A).

A significant main effect of Group also emerged, $F(1,62) = 11.04$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .16$, with better adults ($M = 30.4$, $SD = 1.6$) performing better than children ($M = 23.0$, $SD = 1.6$). The Valence x Group interaction was not significant, $F(2,124) = .09$, $p = .92$, partial $\eta^2 = .001$. A few intrusions of “new words” from the recognition task were also reported: 5 intrusions of negative words, 8 intrusions of positive words, and 5 intrusions of neutral words for the 32 participants overall.

Item Recognition

For the words in the recognition task, the ANOVA yielded a significant main effect of Group only, $F(1,62) = 10.05$, $p < .01$, partial $\eta^2 = .14$, with children ($M = 85.6$, $SD = 2.0$) performing better than adults ($M = 76.7$, $SD = 2.0$). The main effect of Valence and the Valence x Group interaction were not significant, $F(2,124) = .78$, $p = .46$, partial $\eta^2 = .01$ and $F(2,124) = .43$, $p = .65$, partial $\eta^2 = .007$, respectively.

Associative Recall

For the words in the associative recall task, the ANOVA yielded a significant main effect of Valence, $F(2,124) = 7.38$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .11$. Planned comparisons showed that participants recalled the source better for negative ($M = 58.1$, $SD = 2.1$), $F(1,62) = 11.38$, $p < .001$, and positive stimuli ($M = 58.3$, $SD = 2.4$), $F(1,62) = 9.05$, $p < .004$, than for neutral stimuli ($M = 48.6$, $SD = 2.3$). The difference between associative recall for negative and positive stimuli was not significant, $F(1,62) = .004$, $p = .95$ (see Figure 12-B). The effect of Group and the Valence x Group interaction were not significant, $F(1,62) = .69$, $p = .41$, partial $\eta^2 = .01$ and $F(2,124) = .37$, $p = .69$, partial $\eta^2 = .006$, respectively.

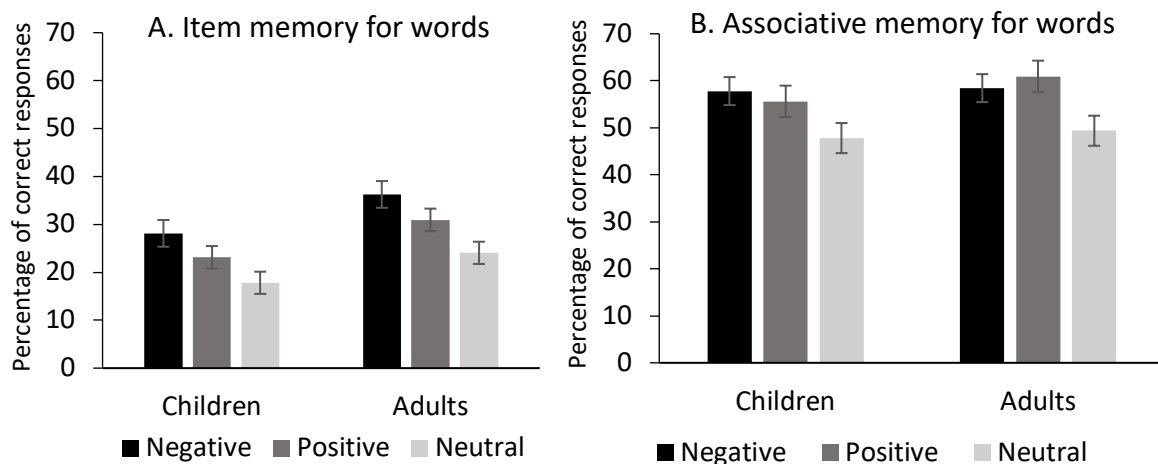


Figure 12. Mean percentage of correct responses for A) words in free recall and B) words in associative recall (source: voice gender) as a function of group (children vs. adults) and emotional valence (negative vs. positive vs. neutral). Error bars represent standard errors.

6. Exp1: Discussion

In Experiment 1, an emotional enhancement of item memory was observed for both children and young adults. More precisely, EEM occurred for words and pictures in the item recall task, but not in the item recognition task (despite a trend toward better recognition of emotional pictures than of neutral ones). This was possibly due to the relatively high overall recognition scores (more than 80% of correct responses). These results are in line with other studies that have shown that the emotional content of information enhances item memory in children (e.g., Van Bergen et al., 2015 but for a review, see Hamann & Stevens, 2013) and adults (for a review, see Dolcos et al., 2017), but are also consistent with a study that has not found EEM in recognition task in children (Leventon et al., 2014). Leventon et al. (2014) explain this in terms of the high levels of the recognition scores, almost representing ceiling effects, that may have limited their ability to detect EEM and this may also be the case in our study. In addition, our data showed, for the first time in children, an EEM in the associative recall task, although this enhancement was observed only for words. In fact, the children recalled positive and negative words and their associated source information (male or female voice) better than neutral ones. In the case of pictures, however, a dissociation emerged between the item memory and associative memory tasks, in that negative

pictures were better recalled than positive and neutral ones, but there was no advantage for the recall of context information associated with negative or positive stimuli as compared to neutral ones. Moreover, it is of particular interest that the emotional enhancement of memory in children did not differ significantly from that observed in adults across the different tasks, besides for the picture recall, in which the children presented a memory advantage only for negative pictures, while adults recalled negative and positive pictures similarly well relative to neutral ones. These results reveal that the children did experience an emotional enhancement of both item and associative memory when the stimuli were words, just as the young adults did. However, as we did not find an effect of emotions in associative memory for the pictures in either group, the emotional enhancement of associated contextual details overall may depend on the type of stimuli and/or the type of associated information.

With regard to the item memory tasks, our prediction that emotions, both negative and positive, would improve item memory in children whatever the type of stimulus was not entirely confirmed by our data. In fact, in the same way as for adults and in accordance with our hypothesis, we observed a general EEM for words in the case of both negative and positive stimuli, but unlike in adults and contrary to our hypothesis, only negative pictures were recalled better than positive and neutral ones. This was the only difference observed in EEM between children and adults. We have suggested that a *negativity* effect can occur in children along with a general emotional enhancement of memory. Despite this, positive pictures were not recalled better than neutral ones in this experiment. Our results therefore suggest that the influence of negative and positive emotions on item memory in children acts differently depending on the type of stimulus. This could be due to the specific features of visual stimuli. In fact, pictures from the DAPS database (which includes some pictures from the International Affective Picture System – IAPS –Lang, Bradley & Cuthbert, 1999) are thought to induce relatively strong emotional arousal due to certain evocative, explicitly imaged content such as people with guns, accidents, scenes of war etc. Even if arousal were scrupulously controlled between negative and positive pictures within each group (children and adults) as well as between groups then, based on the existing evaluations, the children who participated in the present study might have somehow perceived the negative pictures as more arousing than the positive pictures and this might, in turn, have improved the memorization only of the negative pictures. It is important to note that differences in visual complexity between the different types of emotional stimuli cannot explain these results, given that we controlled the visual

complexity of our stimuli. The existing literature on children reports only two studies that have used DAPS/IAPS pictures to evaluate emotional memory. The first one, Cordon et al. (2013), found that negative pictures were recognized better than neutral ones but, unfortunately, the authors did not include positive pictures in their tasks. The second, Leventon et al. (2014), used negative, positive and neutral pictures, but failed to show any emotional enhancement of memory in a behavioral recognition task. However, these authors have shown that children older than 7.5 years old exhibit greater neuronal activity when recognizing negative pictures than when recognizing positive and neutral ones, thus showing that negative emotions could influence memory earlier in development than positive ones. Similarly, other studies that have manipulated IAPS pictures have shown an attentional bias (Waters, Lipp, & Spence, 2004) and greater amygdala reactivity (McRae et al., 2012) in response to negative pictures in school-age children and this may well cause such pictures to be remembered better (LaBar & Cabeza, 2006) than positive and neutral ones.

With regard to associative memory, our main aim was to determine whether school-age children, like young adults, show an emotional enhancement of contextual information associated with items. The results indicated that associative memory for words was enhanced by both negative and positive emotions in young adults as well as children. Thus, this is the first study to show that school-age children could benefit from an overall emotional enhancement of memory for items and the associated contextual information, thereby providing evidence of a genuine emotional episodic memory. It appears that the children in our study possessed sufficient cognitive resources and mnemonic strategies to perform the associative recall task (Ghetti & Lee, 2011). Moreover, while the children's performances in the item recall task were overall significantly lower than those of the young adults, the children's and adults' performances in the associative recall task were similar, including for neutral words. Thus, emotions did not reduce the deficit in associative memory in children as we have suggested, because there was no such deficit. Many developmental studies agree that episodic memory, that is the ability to bind an item and its context into an integrated episodic representation, improves substantially during childhood (Ghetti & Lee, 2011; Guillery-Girard et al., 2013; Lee, Wendelken, Bunge, & Ghetti, 2016). Although heterogeneous age-related trajectories in episodic memory are reported depending on the type of relational binding, Guillery-Girard et al. (2013) highlight, in particular, a critical period in the developmental time course of episodic memory at around 8 to 10 years of age. This could explain why, unlike the 7 to 8-year-

old children in Cycowicz et al. (2001), who had an associative memory deficit relative to adults, the 9 to 11-year-old children in our study performed well on both the emotional and non-emotional items in the associative memory task, and even reached adult performances. Moreover, in our sample of children, the emotional system and its interaction with the memory system seem to have already been well developed, considering the emotional enhancement of item and associative memory observed for words. This is in line with developmental studies on emotional processing that have shown that children exhibit adult-like neuronal activity in response to negative and positive emotional stimuli, as measured by event-related potentials (ERP) (Hajcak & Dennis, 2009; Bondy, Stewart, Hajcak et al., 2018). These emotional processing abilities may well bolster children's memory for emotional information, as has been reported in several child studies involving item memory (e.g., Van Bergen et al., 2015), and also improve their memory for associated contextual information. We further discuss the effect of emotions on item and associative memory in children in the general discussion.

Unlike in the case of words, we did not observe an EEM for associative memory for pictures in either children or adults. Thus, our data suggest that emotion may act differently on associative memory depending on the type of stimulus. Given that similar results were obtained for children and adults, this finding cannot be a consequence of developmental differences. However, it could possibly be due to the type of contextual information associated with the items. It has previously been demonstrated that emotion enhances memory for details which correspond to intrinsic or within-item features, but not for extrinsic contextual ones (for a review, see Yonelinas & Ritchey, 2015). Yet, the associative memory task for pictures used in our study required participants to remember the frames surrounding the pictures, which are considered to be extrinsic features, whereas the associative memory task used for words required them to remember the gender of the voice in which the words were spoken, and this is considered to be an intrinsic feature. In her review, Mather (2007) explained that the attention directed toward an emotionally arousing item does contribute to the processing of the item itself, but not to the processing of its extrinsic contextual information. Thus, emotional arousal in response to DAPS pictures could have restricted the participants' attention to the details of the emotional scene to the detriment of the contextual neutral frame. Such arousal might therefore have improved the memory for emotional pictures themselves but not for their context of presentation. If this were the case, it might be expected that, given that item memory improved for emotional pictures, associative memory for

these pictures might be poorer than for neutral ones. However, this was not the case in our experiment. Another possibility is that, in comparison with written and spoken words, the DAPS pictures depicted relatively complex emotional and neutral scenes with many visual features. This could make the encoding of the content of the pictures, whatever their emotional nature, more effortful and attention-demanding, with the result that attention was drawn away from the surrounding context, thereby preventing it from being bound with the picture itself (Lee et al. 2016). Thus, it is possible that the participants might not have encoded the contextual features of the pictures because of the difficulty of switching their attention away from the content. In the case of words, by contrast, although the processing involved in identifying the gender of the voice in which words are spoken may require cognitive resources (Kausler Pucket, 1980), the spoken words were heard automatically. Therefore, the participants did not have to switch their attention away from the words in order to encode voice information and had more attentional resources available to perform a more thorough processing in order to bind words with their sources. This was particularly true in the case of emotional words, which attract more attention, thereby leading to better associative memory.

Nevertheless, it is not clear whether the dissociation observed in both children and adults between item and associative memory for pictures but not for words depends on the type of stimulus or on the type of information to be associated with the item. Thus, in Experiment 2, we wanted to further examine the emotional modulation of associative memory by using the same contextual information for pictures and words, namely their spatial location. As the development of episodic memory may fluctuate depending on the type of information to be associated with an item (e.g., context, source, time, space) in childhood (Guillery-Girard et al., 2013; Lee et al., 2016; Picard et al., 2017), it seems essential to examine the emotional modulation of episodic memory in children under various conditions.

Experiment 2

In Experiment 1, an emotional enhancement of associative memory was observed for words in children and young adults, but not for pictures. This double discrepancy between words and pictures in the effect of emotions on associative memory was rather surprising. In the discussion of

Experiment 1, we proposed that it might be due, at least in part, to the level of effortful processing required to bind items with their specific contextual information during encoding and to the fact that this effort is greater for pictures than words. Therefore, to evaluate associative memory in Experiment 2, we decided to use the same contextual information for pictures and words, i.e. their spatial location (memory for where on a screen an item appeared). Moreover, as episodic memory exhibits different developmental trajectories in children depending on the type of information to be associated with an item, we wanted to ensure that the emotional enhancement of associative memory observed in children in our first experiment could be extended to another type of information. Based on the results of our first experiment, and given the assumption that the different results obtained for pictures and words in emotional associative memory in Experiment 1 were due to the different types of information that had to be associated with the pictures and words, we hypothesized that, in the present experiment, children and adults would benefit from a similar emotional enhancement of item and associative memory for both pictures and words.

7. Exp2: Method

Participants

Thirty-six typically developing children (8-10 years of age, 23 girls and 13 boys) and 36 young adults (18-30 years of age, 18 women and 18 men) participated in this study (see Table 2). Recruitment and consent procedures, as well as inclusion and exclusion criteria, were the same as in Experiment 1 for both groups.

Stimuli and Material

The stimuli were the same as those used in Experiment 1. For this experiment, all the stimuli were resized to 200 x 200 pixels so that they could be presented in a square grid during the encoding phase of the experiment. In the case of the picture stimuli, the 60 pictures were divided into six lists (2 positive, 2 negative and 2 neutral) of 10 pictures each in such a way that, for each category of valence, there were no inter-list differences between the pictures in terms of valence, arousal and complexity for either the children or the adults, all $p > .22$. Similarly, words were divided into six lists with no significant differences in terms of valence, arousal, *imageability*, word length or frequency of use between the lists for either the children or the adults, all $p > .14$.

The six lists were used to construct six experimental series of 10 stimuli each, all of which belonged to the same valence category (negative, positive or neutral). The six series were presented twice, giving a total of 12 series (4 negative, 4 positive and 4 neutral series of 10 stimuli). We decided to proceed in this way because we were unable to select enough stimuli to allow us to construct 4 series per valence using different stimuli and we considered that having only two series per valence might not have been enough to observe an effect of emotions on associative memory.

All the experiment was programmed and run with the OpenSesame software (3.0) (Mathôt, Schreij, & Theeuwes, 2012) on an HP PC.

Procedure

The study consisted of two similar parts (both composed of encoding and retrieval phases), one including pictures and the other including words. These took place successively with a counterbalanced order between participants. In each part of the experiment, the participants performed 12 series of encoding and immediate retrieval trials.

For the pictures, 12 series of 10 pictures were presented in succession in a grid of 16 white squares on a black background arranged in a similar way to Macri, Pavard, & Versace (2018). For each series, the ten pictures were randomly assigned to 10 squares (out of the 16) within the grid in such a way that the pictures appeared equally frequently in each location for the negative, positive and neutral series and for each participant. The series were presented in such a way that each of the valence categories followed one another in a sequence that prevented two series of the same valence appearing in succession. The order of valence presentation for the first six series was counterbalanced between participants in such a way that each category of valence appeared equally often at the beginning, in the middle and at the end of the presentation of the series. More precisely, there were three orders of presentation depending on the valence of the series (order 1: positive, negative, neutral; order 2: neutral, positive, negative; order 3: negative, neutral, positive). In addition, we counterbalanced the presentation of the two series of the same valence across the participants. Thus, for example, one participant saw the first six series in the following order: positive series 1, negative series 1, neutral series 1, positive series 2, negative series 2 and neutral series 2. Another participant saw the series 1 and 2 in reverse order: positive series 2, negative series 2, neutral series 2, positive series 1, negative series 1 and neutral series 1. The same order of

presentation was used for the six repeated series for any given participant but with a different order of stimulus presentation within each series and with different locations being used.

In the encoding phase, each picture was presented to the adults for 2500ms and to the children for 5000ms, with an inter-stimulus interval (ISI) of 250ms. The participants were asked to remember the pictures and their locations. The retrieval phase began after each series of ten pictures, with the same pictures being presented again one after another in a random order and centered on a black background (with the initial size of 567 x 425). Each picture was displayed for 2000ms, after which the empty grid of white squares was presented. The participants then had to click on the square in which they thought the picture had been presented in the encoding phase (associative recall). Thus, for each of the 12 series, the participants first had to encode and then had to retrieve the locations of the pictures (see Figure 13). After performing the 12 series, the participants completed a 5-min filler task before orally recalling as many pictures (out of the 60) as they could remember, regardless of the order in which they had appeared. The participants were instructed to give as many details about the pictures as possible so that anyone could recognize them. If the experimenter felt that the description of the pictures was not precise enough, she asked the participant for clarifications. The experimenter wrote down the participants' answers. The same criteria as for Experiment 1 were applied for the scoring of the responses.

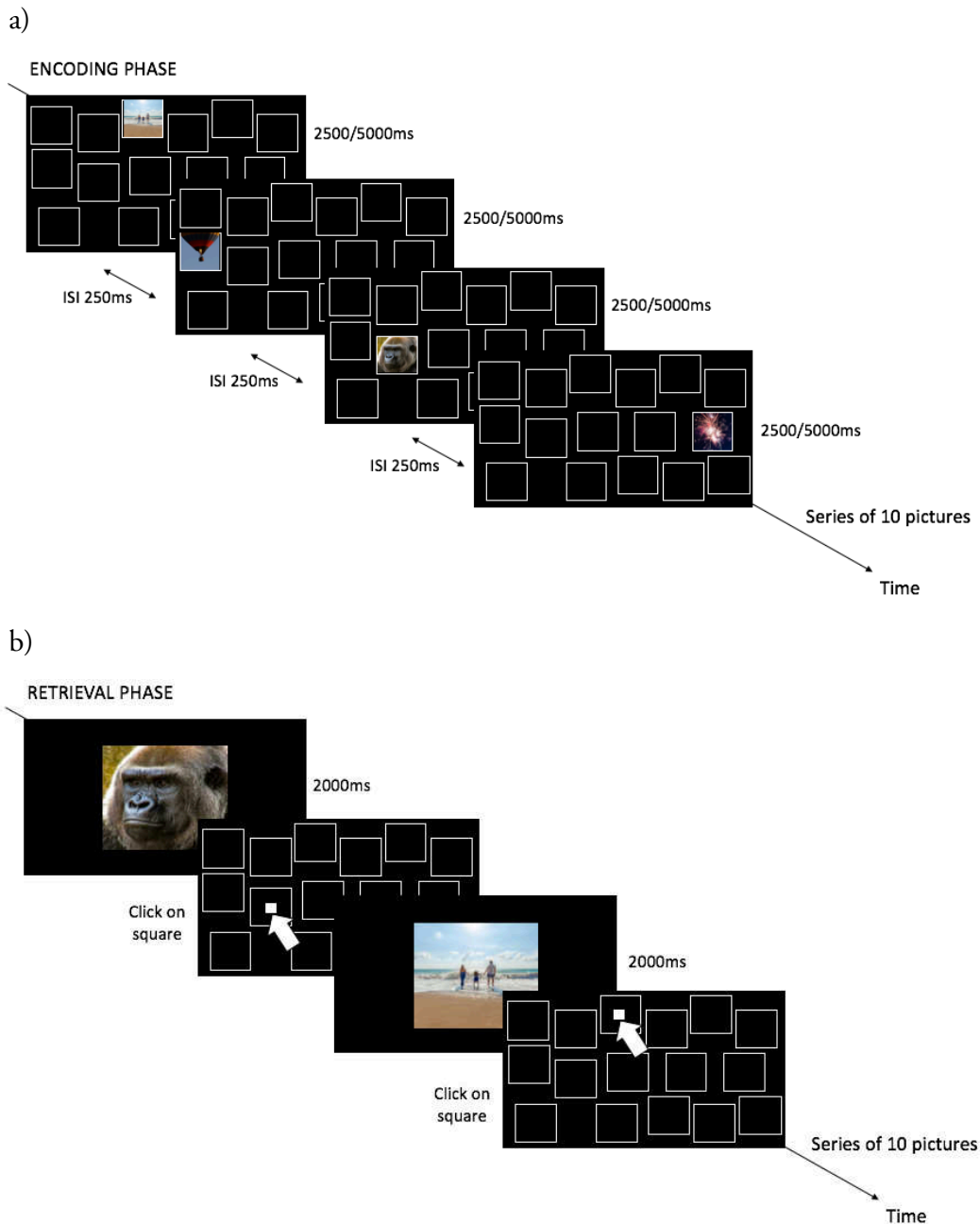


Figure 13. Procedures for a) encoding phase and b) retrieval phase are illustrated here for a series of 10 positive pictures.³

³ The pictures are not from the DAPS and are used for illustrative purposes only. They have been downloaded from the photography sharing website unsplash.com and are used in accordance with the Terms and Conditions of the website which do not require further permission.

The procedure for the words was identical to that for pictures, with the words being presented in black inside a solid white square (Calibri font, 25-point size for the encoding phase and 75-point size for the retrieval phase).

At the end of the experiment, we administered several neuropsychological tests (described in the method part of Experiment 1) in order to characterize this population and to ensure that the cognitive functioning of all the children was within the normal range. This was indeed the case. The raw and standard means performances for all the tests are presented in Table 2.

Function	Test	Children N = 36	Young Adults N = 36
	Mean Age	9.63 (0.55)	25.29 (3.28)
	Female / Male	23 girls and 13 boys	18 females and 18 males
Mood	FMATC	5.14 (0.79)	/
	BMIS	38.86 (4.60)	50.61 (4.90)
Cognitive functioning	WISC-V Similarities	0.72 (0.20)	/
	WISC-V Matrix Reasoning	0.70 (0.22)	/
Memory	Rey Complex Figure (recall accuracy)	0.62 (0.29)	0.41 (0.26)
	Rey Complex Figure (copy accuracy)	0.66 (0.26)	0.85 (0.34)
Executive Functions	TEA-Ch	0.63 (0.28)	/
	TMT-A	/	0.68 (0.20)
	TMT-B	/	0.44 (0.30)

Table 2. Mood and neuropsychological assessments for children and young adults in Experiment 2.

Note: Raw mean scores are presented for FMATC and BMIS. Mean percentile ranks are presented for subtests of WISC-V, Rey Complex Figure, TEA-Ch and TMT-A-B. Standard deviations are in parentheses.

Data analysis

The correct free recall (item memory for pictures and words) and associative recall (associative memory: location of pictures and words) scores for positive, negative and neutral stimuli were used

for the statistical analysis. Preliminary analyses were performed to check for sphericity (Mauchly's test) and homogeneity of variance. No violations were found for any of the data. We first performed a mixed-measures ANOVA including all data, with Valence (positive vs. negative vs. neutral), Task (item recall vs. associative recall - six initial series vs. associative recall - six final series), Stimulus (pictures vs. words) as within-subject factors and Group (children vs. adults) as between-subjects factor. Next, mixed-measures ANOVAs with Valence (positive vs. negative vs. neutral) as within-subject factor and Group (children vs. adults) as between-subjects factor, were performed on the different scores separately for the different tasks and for pictures and words. These were followed by planned comparisons. We included Repetition of the series in the task factor to check that repetition of the six initial series did not impact the associative recall performances. All the results in the text and figures are expressed in percentages.

8. Exp2: Results

See Appendix – Table 5 for means and standard errors of all the results of Experiment 2.

Global analysis

Here we report only the significant main effects and interactions. The ANOVA showed significant main effects of Valence, $F(2,140) = 27.26$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .28$, Stimulus $F(1,70) = 120.91$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .63$, Task $F(2,140) = 128.09$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .65$ and Group $F(1,70) = 37.8$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .35$. The Valence x Task $F(4,280) = 13.73$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .16$, Valence x Stimulus $F(2,140) = 6.61$, $p < .002$, partial $\eta^2 = .09$, Stimulus x Task $F(2,140) = 21.40$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .23$, Stimulus x Group $F(1,70) = 9.09$, $p < .004$, partial $\eta^2 = .12$ and Task x Group $F(4,248) = 20.29$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .25$, interactions were significant. The Stimulus x Task x Group interaction $F(2,140) = 4.73$, $p < .01$, partial $\eta^2 = .06$ was also significant. In item recall, the children's performances, $t(152) = 1.6$, $p = .91$, were similar for both words ($M = 20.7$, $SE = 2.6$) and pictures ($M = 24.2$, $SE = 2.6$), while in associative recall, their performances were poorer for words than pictures, for both the six initial series, $t(152) = 4.0$, $p < .005$ (for words $M = 43.0$, $SE = 2.6$; for pictures $M = 51.8$, $SE = 2.6$), and for the six final series, $t(152) = 7.8$, $p < .001$ (for words $M = 32.3$, $SE = 2.6$; for pictures $M = 49.5$, $SE = 2.6$). In item recall, the adult's performances were poorer for words ($M = 35.9$, $SE = 2.6$) than for pictures ($M = 47.5$, $SE = 2.6$),

$t(152) = 5.3, p < .001$, and the same was true in associative recall for both the six initial series, $t(152) = 9.5, p < .001$ (for words $M = 48.4, SE = 2.6$; for pictures $M = 69.1, SE = 2.6$), and the six final series, $t(152) = 8.7, p < .001$ (for words $M = 52.3, SE = 2.6$; for pictures $M = 71.5, SE = 2.6$). Most importantly, the Valence x Stimulus x Task interaction was also significant, $F(4,280) = 4.39, p < .002$, partial $\eta^2 = .06$. To better understand this interaction, we performed the analysis for each task separately. In the item recall task, performances were better for negative pictures ($M = 43.7, SE = 2.2$) than for negative words ($M = 34.6, SE = 2.2$), $t(449) = 4.12, p < .006$, but were similar for positive pictures ($M = 36.8, SE = 2.2$) and positive words ($M = 29.2, SE = 2.2$), $t(449) = 3.30, p = .09$, as well as for neutral pictures ($M = 28.2, SE = 2.2$) and neutral words ($M = 21.7, SE = 2.2$), $t(449) = 2.89, p = .26$. In the associative recall task for the six initial series, performances were better for negative pictures ($M = 57.8, SE = 2.2$) than for negative words ($M = 50.1, SE = 2.2$), $t(449) = 3.52, p < .05$, for positive pictures ($M = 64.4, SE = 2.2$) than for positive words ($M = 46.8, SE = 2.2$), $t(449) = 7.89, p < .001$, and for neutral pictures ($M = 59.9, SE = 2.2$) than for neutral words ($M = 40.9, SE = 2.2$), $t(449) = 8.68, p < .001$. In the associative recall task for the six final series, performances were better for negative pictures ($M = 60.3, SE = 2.2$) than for negative words ($M = 47.4, SE = 2.2$), $t(449) = 5.98, p < .001$, for positive pictures ($M = 60.6, SE = 2.2$) than for positive words ($M = 39.9, SE = 2.2$), $t(449) = 9.41, p < .001$, and for neutral pictures ($M = 61.1, SE = 2.2$) than for neutral words ($M = 40.5, SE = 2.2$), $t(449) = 9.24, p < .001$. To try to identify the effects of emotion more precisely as a function of the stimulus type and task, we performed separate mixed-measures ANOVAs, with Valence (positive vs. negative vs. neutral) as within-subject factor and Group (children vs. adults) as between-subjects factor, on the different scores for pictures, words and for each task separately. These analyses were followed by planned comparisons (see below).

Pictures

Item Recall

For the pictures in the recall task, the ANOVA yielded a significant main effect of Valence, $F(2,140) = 37.88, p < .0001$, partial $\eta^2 = .35$. Planned comparisons showed that the participants had better recall for negative (Mean = 43.3, SD = 1.8) than for positive ($M = 36.3, SD = 1.9$), $F(1,70) = 17.99, p < .0001$, or neutral pictures ($M = 27.9, SD = 1.7$), $F(1,70) = 65.39, p < .0001$.

Positive pictures were also recalled better than neutral ones, $F(1,70) = 23.01$, $p < .0001$ (see Figure 14-A).

A significant main effect of Group also emerged, $F(1,70) = 60.06$, $p < .0001$, partial $\eta^2 = .46$, with adults ($M = 47.5$, $SD = 2.1$) performing better than children ($M = 24.2$, $SD = 2.1$). The Valence x Group interaction was not significant, $F(2,140) = .95$, $p = .39$, partial $\eta^2 = .01$.

Associative Recall

For the pictures in the associative recall task, the ANOVA yielded a significant Valence x Repetition interaction, $F(2,140) = 3.24$, $p = .04$, partial $\eta^2 = .04$. For the six initial series, planned comparisons showed that participants had better recall for the locations of positive ($M = 64.0$, $SD = 2.3$) than of negative ($M = 57.6$, $SD = 1.9$), $F(1,70) = 12.03$, $p < .001$, or neutral pictures ($M = 59.7$, $SD = 2.2$), $F(1,70) = 5.30$, $p < .05$. The difference between negative and neutral pictures was not significant, $F(1,70) = 1.30$, $p = .26$. For the six final series, however, there was no effect of emotional valence, with all planned comparisons between negative, positive and neutral pictures having $p > .78$ (see Figure 14-B).

A significant main effect of Group also emerged, $F(1,70) = 26.22$, $p < .0001$, partial $\eta^2 = .27$, with adults ($M = 70.3$, $SD = 2.7$) performing better than children ($M = 50.6$, $SD = 2.7$). The Valence x Group interaction was not significant, $F(2,140) = .55$, $p = .58$, partial $\eta^2 = .008$.

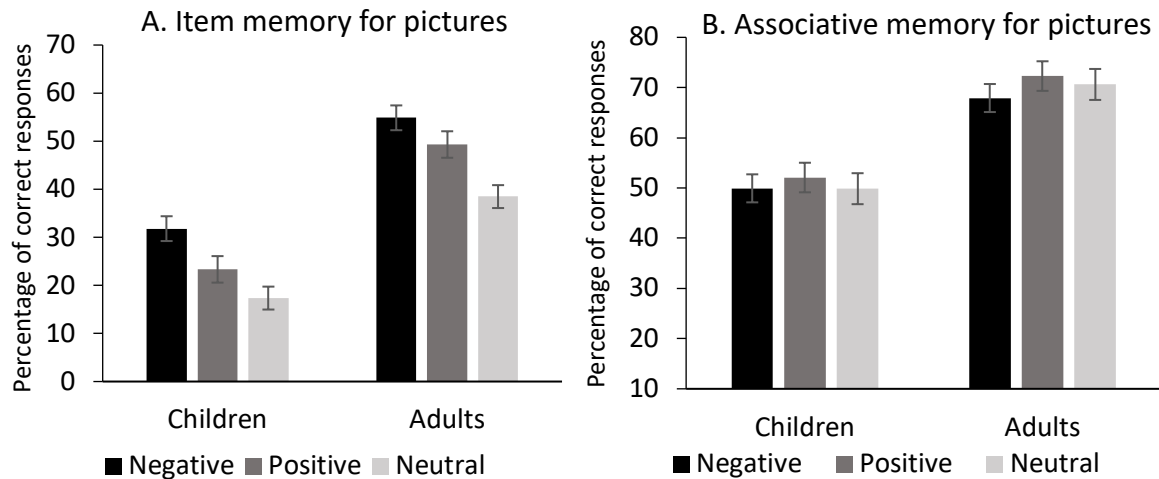


Figure 14. Mean percentage of correct responses for A) free recall of pictures and B) associative recall of pictures (spatial location) as a function of group (children vs. adults) and emotional valence (negative vs. positive vs. neutral). Error bars represent standard errors.

Words

Item Recall

For the words in the recall task, the ANOVA yielded a significant main effect of Valence, $F(2,140) = 19.52$, $p < .0001$, partial $\eta^2 = .22$. Planned comparisons showed that participants had better recall for negative ($M = 34.2$, $SD = 1.8$) than for positive ($M = 29.0$, $SD = 1.7$), $F(1,70) = 6.39$, $p < .01$, or neutral words ($M = 21.5$, $SD = 1.8$), $F(1,70) = 44.68$, $p < .0001$. Positive words were also recalled better than neutral ones, $F(1,70) = 12.01$, $p < .001$ (see Figure 15-A).

A significant main effect of Group also emerged, $F(1,70) = 36.63$, $p < .0001$, partial $\eta^2 = .34$, with adults ($M = 35.8$, $SD = 1.8$) performing better than children ($M = 20.7$, $SD = 1.8$). The Valence x Group interaction was not significant, $F(2,140) = .67$, $p = .51$, partial $\eta^2 = .01$.

Associative Recall

For the words in the associative recall task, the ANOVA yielded a significant main effect of Valence, $F(2,140) = 16.59$, $p < .0001$, partial $\eta^2 = .19$. Planned comparisons showed that participants had better recall of the locations of negative ($M = 48.4$, $SD = 2.0$) than of positive ($M = 43.1$, $SD = 2.0$), $F(1,70) = 14.37$, $p < .0002$, or neutral words, ($M = 40.5$, $SD = 2.0$), $F(1,70) = 34.91$, $p < .0001$.

The difference between positive and neutral words was not significant but there was a trend toward better recall of the locations of positive stimuli than of neutral ones, $F(1,70) = 3.21$, $p = .07$.

There was also a trend toward a Valence*Repetition interaction, $F(2,140) = 2.36$, $p = .09$, partial $\eta^2 = .03$. For the six initial series, planned comparisons showed that participants had better recall for the locations of negative ($M = 49.9$, $SD = 2.3$), $F(1,70) = 26.29$, $p < .0001$, and positive words ($M = 46.6$, $SD = 2.3$), $F(1,70) = 7.66$, $p < .007$, than for those of neutral words ($M = 40.6$, $SD = 2.1$). The difference between negative and positive words was not significant, $F(1,70) = 2.41$, $p = .13$. For the six final series, however, participants had better recall for the locations of negative ($M = 47.0$, $SD = 2.2$) than of positive ($M = 39.6$, $SD = 2.4$), $F(1,70) = 11.17$, $p < .001$, or neutral words, ($M = 40.4$, $SD = 2.4$), $F(1,70) = 9.60$, $p < .003$. The difference between positive and neutral words was not significant, $F(1,70) = .12$, $p = .73$.

There was also a trend toward a Valence x Group interaction, $F(2,140) = 2.45$, $p = .09$, partial $\eta^2 = .03$. Planned comparisons showed that children had better recall of the locations of negative ($M = 43.9$, $SD = 2.8$) than of positive ($M = 36.1$, $SD = 2.9$), $F(1,70) = 15.20$, $p < .0002$, or neutral words ($M = 32.9$, $SD = 2.8$), $F(1,70) = 32.53$, $p < .0001$, and that adults were better able to recall the locations of negative ($M = 52.9$, $SD = 2.8$) than of neutral words ($M = 47.9$, $SD = 2.8$), $F(1,70) = 7.03$, $p < .009$, (see Figure 15-B).

A significant main effect of Group also emerged, $F(1,70) = 12.10$, $p < .0001$, partial $\eta^2 = .15$, with adults ($M = 50.3$, $SD = 2.6$) performing better than children ($M = 37.7$, $SD = 2.6$).

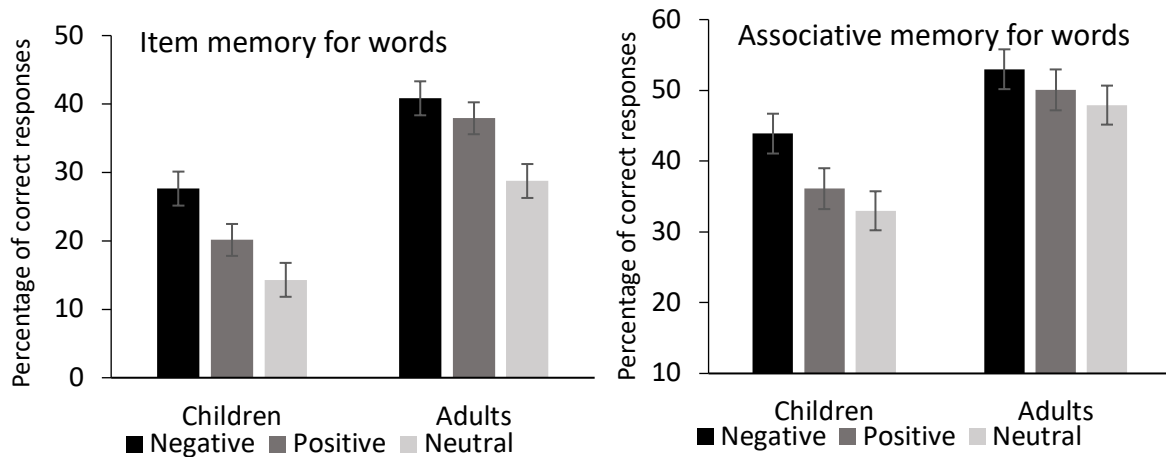


Figure 15. Mean percentage of correct responses for A) free recall of words and B) associative recall of words (spatial location) as a function of group (children vs. adults) and emotional valence (negative vs. positive vs. neutral). Error bars represent standard errors.

9. Exp2: Discussion

In Experiment 2, a similar emotional enhancement of memory was observed for words and pictures in both children and young adults in the item recall task, whereas the enhancement differed in the associative recall task depending on the type of stimulus. It is important to note that in none of these tasks did the influence of emotion on memory in children differ significantly from that observed in adults. In fact, in the case of item memory for words and pictures, both groups recalled negative and positive stimuli better than neutral ones, with negative stimuli being memorized better than positive ones. This points to the existence of a *negativity* effect along with a general emotional enhancement of memory. In the case of associative memory, a general emotional enhancement of memory occurred for words, with the locations of negative and positive words being recalled better than those of neutral ones. In the case of pictures, there was a *positivity* effect, with the locations of positive pictures being recalled better than those of negative and neutral ones. Moreover, the emotional enhancement of associative memory was impacted by stimulus repetition, especially in the case of positive stimuli. These results are inconsistent with our prediction that if the type of contextual information to be associated with an item is identical then a similar emotional enhancement of associative memory should be observed for both words and pictures. However, at

the developmental level, both children and adults did exhibit the same effect of emotions on item and associative memory, as we had predicted.

With regard to the item memory tasks, our results confirm our prediction that children would, like young adults, exhibit a general emotional enhancement of memory whatever the type of stimulus, with, in particular, a memory advantage being observed for negative stimuli over positive ones. These results are in line with Van Bergen et al. (2015) who showed that 5 to 6-year-old children recalled negative and positive stories better than neutral ones, and also recalled negative stories better than positive ones. This pattern is also broadly observed in young adults (Murphy & Isaacowitz, 2008). A review by Vaish, Grossmann, & Woodward (2008) argues that several factors may account for the *negativity* effect. One of the most important of these is the crucial adaptive evolutionary function of helping infants to avoid potentially harmful stimuli. However, according to Vaish et al. (2008), the strength of negative emotions results from the positive context established early in development, when positive emotions and interactions are largely experienced and perceived. Another suggestion, made by LoBue and DeLoache (2008) in line with Vaish et al.'s proposition, is that negative stimuli mobilize more attentional resources than other stimuli, both in children and adults. Indeed, LoBue and DeLoache (2008) demonstrated that 3 to 5-year-old children are as able as adults to detect threatening stimuli more quickly than other neutral stimuli in an array of distractors. This facilitated attention for negative stimuli could lead to these stimuli being processed more thoroughly during encoding and this, in turn, would enhance their memorability (for reviews, see Baumeister, Bratslavsky, Finkenauer, & Vohs, 2001 and Kensinger, 2009).

If we consider associative memory, as we tested it using location recall tasks, a general emotional enhancement occurred for words, and a *positivity* effect occurred for pictures. Therefore, for words, we replicated our results from Experiment 1 while using a different type of contextual information. This argues in favor of the existence of an emotional enhancement of associative memory in children and adults regardless of the contextual information to be associated with an item. This is consistent with certain other studies in the literature on adults that have shown an emotional enhancement of the memory for the spatial locations of words or the color in which they were presented or framed (D'Argembeau & Van der Linden, 2004; Doerksen & Shimamura, 2001 and Kensinger & Corkin, 2003). Pictures differ from words in that emotions have been found to

modulate associative memory only for positive pictures. Our results are inconsistent with other studies that have assessed the modulation of associative memory for locations in young adults by negative and positive emotions when using IAPS pictures. In these studies, this modulation was either absent (Mather, Mitchell, Raye et al. 2006) or present (Mather & Nesmith, 2008; Nashiro & Mather, 2010), but with no difference between negative and positive pictures. The authors specified that the different findings could be the result of the specific use of a rehearsal technique to remember series of pictures. Thus, rehearsing several arousing pictures immediately after seeing them in a sequence makes it very difficult to integrate the stimuli with their locations because of the attentional focus required during rehearsal, thus leading to poorer associative memory for emotionally arousing pictures. It is therefore possible that in our experiment, it was more difficult to bind the negative pictures with their locations than the positive ones due to the specific ability of the former to increase attentional selectivity, even when they elicited the same level of physiological arousal as positive pictures (Van Steenbergen, Band & Hommel, 2011).

In addition, the emotional enhancement of associative memory was impacted by stimulus repetition for pictures and a corresponding tendency was observed for words, and especially for positive ones. Indeed, a general emotional enhancement of associative memory occurred for words in the six initial series, whereas a *negativity* effect was obtained when the series were repeated. Similarly, for pictures, the *positivity* effect obtained for the first series gave way to equivalent performances for emotional and neutral pictures when the stimuli were repeated. Thus, in our experiment, stimulus repetition seemed to affect solely memory for positive stimuli. This is in line with the ERP study of Carretié, Hinojosa & Mercado (2003), who found stronger attentional habituation in response to positive than to negative stimuli which, nevertheless, were matched on arousal level. It is also consistent with the findings reported by Wright, Fischer, Whalen et al. (2001) who observed a higher level of habituation for happy than for fearful faces. Thus, in these studies, negative stimuli were better able to attract and maintain the participants' attention across repetitions. Moreover, by repeating the same stimuli in different locations from the initial ones, we also increased the level of interference between the first and second stimulus presentations and this could have impaired the participants' associative memory performances, especially for positive stimuli.

Most importantly, emotions again enhanced associative memory in school-age children in our experiment: a general emotional enhancement of memory occurred for words and a *positivity* effect occurred for pictures. However, in this experiment, the children's performances were poorer than those of the young adults in all the tasks and both for emotional and neutral stimuli. This could be explained by the slow development of associative memory, and therefore also episodic memory, across childhood (for a review, see Raj & Bell, 2010). This applies in particular to the spatial component of episodic memory, which may not be fully developed until early adulthood (Guillery-Girard et al., 2013). We further discuss these developmental differences in episodic memory performances in the general discussion.

10. General discussion

In the present study, we conducted two experiments to investigate the effect of emotions on item and associative memory in school-age children and young adults. To do this, we used two different memory tasks and two different types of stimulus together with contextual information to be associated with the item. Overall, an effect of emotions was observed only in the recall tasks (free item recall and associative recall). In the case of words, the children exhibited a general emotional enhancement of both item and associative memory, regardless of the contextual information to be associated with the item. However, the results we obtained for pictures were quite mixed, with an emotional enhancement of item memory limited to negative pictures being observed in the first experiment and such an enhancement being observed for both negative and positive pictures in the second experiment. There was also no emotional modulation of associative memory in the former experiment and a *positivity* effect in the latter. It is important to note that although, in our experiments, the children's overall memory performances were poorer than those of the young adults, both groups exhibited a similar effect of emotions on memory across all the tasks, except in the case of item memory in the first experiment. In this experiment, the adults recalled both negative and positive pictures better, whereas the children presented better memory only for negative pictures. These findings therefore indicate that children do experience an emotional enhancement of both components of episodic memory (item and contextual information) similar to that observed in young adults, although this effect may vary depending on the type of stimulus used, i.e. pictures or words. Before considering the implications of the type of stimulus for

emotional associative memory, we present a number of mechanisms that underlie the developmental time course of episodic memory and emotional systems, as well as the way they interact as age increases. We then discuss how these mechanisms can account for our present findings.

Many developmental studies have shown that episodic memory improves greatly during childhood (Ghetti & Lee, 2011, Lee et al., 2016) and that it is related to the improvement of the capacity to bind the central and peripheral aspects of an event into a unique and coherent episode. On the behavioral level, Guillery-Girard et al. (2013), Lee et al. (2016) and Picard et al. (2017) have emphasized different age-related trajectories relating to the developmental time course of item and associative memory from 6 years of age through to adulthood. Overall in our study, compared to young adults, the 9 to 11- (Experiment 1) and 8- to 10- (Experiment 2) year-old children had poorer recall performances for item memory, and the 8 to 10-year-old children in Experiment 2 had poorer recall performances for the associative memory of spatial locations. Thus, in line with the aforementioned studies, it appears that episodic memory processes in our sample of school-age children are still developing. However, the fact that the 9 to 11-year-old children achieved performances similar to those of the young adults for associative memory in Experiment 1 (context for pictures and source for words), as well as for picture recognition, and performed even better on word recognition, may suggest that some encoding and retrieval processes reach maturation faster than others. In fact, in this group of children, free recall abilities were less efficient than associative recall and recognition skills, suggesting that they experienced more difficulty for some types of retrieval. Indeed, when retrieval cues were given (presentation of the item during recognition and associative recall tasks), the children were able to retrieve the item and its associated contextual information, thus suggesting the existence of successful recognition and binding processes. Moreover, the different findings obtained for associative memory performances in children relative to young adults in Experiment 1 and Experiment 2 possibly suggest the existence of developmental differences in episodic memory processes. These might have been less developed in the children in Experiment 2, who were a little younger than those in Experiment 1. More particularly, these finding might be due to the different developmental time course of the capacity to process specific contextual information. Thus, memory for spatial location could become established later than memory for context or source. This would further support the findings of Guillery-Girard et al.

(2013) and Picard et al. (2017). However, as we did not directly compare children's performances in Experiment 1 and Experiment 2, these findings need further investigation.

Concerning emotional processing, the amygdala, a brain structure that mediates emotional responses, is activated in a similar way in response to negative pictures in children and young adults (McRae et al., 2012), and is increasingly regulated by the PFC with age (Perlman & Pelphrey, 2011; Gee et al., 2013). This structure is also closely related to MTL regions, including the hippocampus, which support the emotional modulation of memory (LaBar & Cabeza, 2006). Across two experiments in the present study, we observed an emotional enhancement of episodic memory in children which was similar to that observed in young adults. Therefore, although the emotional and memory systems are still undergoing development, it seems that they interacted in the school-age children involved in the present study. These results are in line with several studies which have found that item memory was enhanced by emotions in children (Davidson et al., 2001; Cordon et al., 2013; Van Bergen et al., 2015; but for a review, see Hamman & Stevens, 2013). Moreover, our study is the first one to show that children might also exhibit an emotional enhancement of associative memory, especially for words, and provides us with a deeper understanding of the interaction between emotional and memory systems in children. Indeed, given that episodic memory, which requires the binding of items and their context, is mainly supported by the hippocampus in combination with other MTL and PFC regions (Ghetti & Lee, 2011), we may assume that the amygdala is already connected with these different regions in children, thus leading to an emotional enhancement of episodic memory overall. It could be pointed out, however, that these findings relate to short retention intervals and may be different in the case of longer retention intervals, given that the activation of the amygdala has been shown to modulate the long-term consolidation of memory traces in the hippocampus (LaBar & Cabeza, 2006, Yonelinas & Ritchey, 2015). Further behavioral and neuroimaging studies investigating the emotional modulation of memory in children across short and long retention intervals are needed in order to clarify these matters. Moreover, if we consider recent works that have shown that activation of the amygdala could be predominately linked to the motivational salience of the stimuli (for a review, see Cunningham and Brosch, 2012), the effect of emotions on memory could be linked to the subject's current motivational state and this possibility should be taken into account in future investigations.

Another question addressed in the present study concerns the role of the specific type of stimulus and contextual information in associative memory performances. Indeed, in our first experiment, an emotional enhancement of item memory was observed for both words and pictures, whereas an associative memory enhancement was observed only for words. The level of effortful processing required to bind items with their contextual information was not the same for the two types of stimuli used in this experiment and we therefore think it likely that this is the reason why this discrepancy occurred. This explanation seems even more probable if we consider that the *memory trade-off* is more likely to occur for extrinsic associated details (pictures and frames in our experiment) than for intrinsic ones (words and voice gender) (Kensinger, 2009; Yonelinas & Ritchey, 2015). Our Experiment 2, in which the type of contextual information was intrinsic and identical (spatial location) for words and pictures, but different from that used in Experiment 1, allows us to widen the scope of our findings. In both experiments, words elicited better item and associative memory in children and young adults, regardless of the type of contextual information (source or spatial location). However, for pictures, although an EEM was observed for item memory in both experiments, it did not extend to associative memory in Experiment 1 (for an extrinsic context) and only a *positivity* effect was observed in Experiment 2 (for spatial location, which is intrinsic) for all the participants. As the type of contextual information was both identical and intrinsic for both the words and the pictures in Experiment 2, and given that we still observed differences in associative memory between these two types of stimuli, the *memory trade-off* effect and type of contextual information to be associated with the items cannot entirely account for our findings. This discrepancy might, therefore, reflect differences in the properties belonging specifically to words and pictures rather than differences in the contextual information. Indeed, as discussed in Experiment 1, DAPS/IAPS pictures, which depict real-life visual scenes, induce stronger emotional reactions in terms of physiological arousal, valence and attentional bias than individual words, since these have poorer ecological value (Okon-Singer, Lichtenstein-Vidne, & Cohen, 2013). In addition, DAPS pictures, whether emotional or neutral, are physically more complex than words and have many visual features that further capture participants' attention. Therefore, these findings suggest that the processing and binding of associated contextual information for pictures depicting visual scenes could be more idiosyncratic and may not depend on the type of contextual information. Thus, it will be necessary to examine whether this excess of attentional resources devoted to the content of pictures leads to better or weaker associative memory and whether this outcome is or is not dependent on valence.

In conclusion, the present study demonstrates, for the first time, that school-age children present an emotional enhancement of both components of episodic memory, namely both core and contextual information, although the enhancement may be modulated by the type of stimulus. Indeed, the children in our study had better item memory for emotional than for neutral words, and this EEM extended to the specific contextual information of these words, regardless of its type. They therefore remembered the overall episode better in the case of emotional than neutral words. Moreover, no significant developmental difference in EEM was observed between school-age children and young adults for item and associative memory for words. This suggests that the interaction between emotional and memory systems is already well developed in 8 to 11-year-old children, even though the memory performances of the children were worse overall. As a dissociation between item and associative memory was observed for pictures in all the participants, regardless of the type of contextual information, it seems that the type of stimulus was the main factor in the various effects involved in associative memory performances across these two experiments. With regard to these contrasting findings between words and pictures in the case of associative memory, it seems essential to further investigate this issue using different paradigms and different age groups of children in order to better understand the effect of emotions on both components of episodic memory during development. From a broader perspective, we think that this work may be of interest to researchers studying real-world experiences of emotion and who focus on the impact of these experiences on children's well-being and development.

Context of the research:

The present research is part of a more general avenue of research that we are conducting concerning the relation between emotion and memory. Although there is general agreement about the emotional modulation of memory in adults, several points are currently being investigated. In particular, these include (1) age-related differences in the Emotional Enhancement of Memory (EEM) and (2) its modulation by neurological or psychiatric diseases (e.g., Alzheimer's disease, depression, schizophrenia). In fact, the *negativity effect* (better memory for negative stimuli) seems to be more prominent in young adults and the *positivity effect* (better memory for positive stimuli) more prominent in older adults. Our previous studies have focused on this relation in normal and pathological aging, due to Alzheimer's Disease, and have confirmed the presence of a *positivity effect*

in normal aging and, under some circumstances, in Alzheimer's disease. The *positivity effect* may be explained by age-related differences in the availability of cognitive resources or emotional regulation. It is therefore possible that the effect of emotions on memory is different in children and young adults. Surprisingly, fewer studies have focused on this question and consequently less is known about EEM in typically developing children and children with neurodevelopmental disorders. We therefore decided to use a behavioral and neuroimaging approach (EEG) to study the effect of emotions on memory in typically developing children and children with Williams-Beuren syndrome, who have specific emotional and memory processes. We are currently collecting data using the same protocol as that used in the present study with children with Williams-Beuren syndrome and we are conducting another study using EEG measures in combination with recognition and recall tasks in order to better understand the age-related neural bases of emotional memory enhancement.

Acknowledgements:

We warmly thank the children and young adults for their participations in this research, as well as the teachers from the elementary schools for their help during recruitment. We also thank Ingrid Cordon, Annika Melinder, Gail Goodman and Robin Edelstein for sharing their DAPS database, and Timothy Pownall for English proofreading.

This work was supported by the LABEX CORTEX (Grant ANR-11-LABX-0042) of Université de Lyon, within the program "Investissements d'Avenir" (Grant ANR-11-IDEX-0007), operated by the French National Research Agency (ANR).

The data appearing in the manuscript were presented in a poster session at the conference of the International Society for Research on Emotion (ISRE) in July 2019 and at the 21th conference of the European Society for Cognitive Psychology (ESCoP) in September 2019.

Appendix:

DAPS and FAN databases	Children		Adults			
		Valence ^a	Arousal ^a	Valence ^a	Arousal ^a	Complexity ^b
Pictures	Negative	3.18 (.32)	5.94 (.89)	3.16 (.26)	5.90 (.52)	2.45 (.47)
	Positive	7.21 (.36)	5.82 (.82)	7.07 (.36)	5.67 (.56)	2.13 (.44)
	Neutral	5.80 (.42)	3.72 (.42)	5.73 (.38)	3.43 (.70)	2.20 (.67)
Words						Imageability ^c
	Negative	3.26 (.73)	4.79 (.69)	3.09 (.63)	5.19 (1.01)	5.10 (1.57)
	Positive	7.09 (.69)	5.24 (1.04)	7.29 (.61)	4.88 (1.00)	5.14 (1.74)
	Neutral	5.07 (.35)	3.96 (.41)	5.21 (.51)	3.78 (.55)	5.44 (1.24)

Table 3. Mean ratings of the stimuli for emotional valence and arousal given by children and adults in the DAPS (pictures) and FAN (words) databases. This table also includes mean ratings of visual complexity for pictures and imageability for words. Standard deviations are in parentheses.

^aValence and arousal are rated on a scale of 1 (very negative/not arousing at all) to 9 (very positive/highly arousing)

^bVisual complexity is rated on a scale of 1 (very simple) to 4 (very complex)

^cImageability is rated on a scale of 1 (very low imagery value) to 7 (very high imagery value)

Experiment 1		Children	Young adults
Pictures			
Free recall			
	Negative	.38 (.03)	.44 (.03)
	Positive	.27 (.03)	.42 (.03)
	Neutral	.28 (.03)	.28 (.03)
Associative recall (context: frames)			
	Negative	.49 (.03)	.49 (.03)
	Positive	.49 (.03)	.51 (.03)
	Neutral	.47 (.03)	.53 (.03)
Recognition			
	Negative	.89 (.02)	.88 (.02)
	Positive	.91 (.02)	.85 (.02)
	Neutral	.86 (.03)	.82 (.03)
Words			
Free recall			
	Negative	.28 (.03)	.36 (.03)
	Positive	.23 (.02)	.31 (.02)
	Neutral	.18 (.02)	.24 (.02)
Associative recall (source: voice gender)			
	Negative	.58 (.03)	.58 (.03)
	Positive	.56 (.03)	.61 (.03)
	Neutral	.48 (.03)	.49 (.03)
Recognition			
	Negative	.86 (.03)	.78 (.03)
	Positive	.83 (.03)	.77 (.03)
	Neutral	.88 (.03)	.76 (.03)

Table 4. Mean proportions of correct responses for free recall, associative recall and recognition for negative, positive and neutral stimuli (pictures and words) in Experiment 1. Standard errors are in parentheses.

Experiment 2		Children	Young adults
Pictures			
Free recall			
	Negative	.32 (.03)	.55 (.03)
	Positive	.23 (.03)	.49 (.03)
	Neutral	.17 (.03)	.38 (.03)
Associative recall (spatial location)			
	Negative	.50 (.03)	.68 (.03)
	Positive	.52 (.03)	.72 (.03)
	Neutral	.50 (.03)	.70 (.03)
Words			
Free recall			
	Negative	.28 (.02)	.41 (.02)
	Positive	.20 (.02)	.38 (.02)
	Neutral	.14 (.02)	.29 (.02)
Associative recall (spatial location)			
	Negative	.44 (.03)	.53 (.03)
	Positive	.36 (.03)	.50 (.03)
	Neutral	.33 (.03)	.48 (.03)

Table 5. Mean proportions of correct responses for free recall and associative recall for negative, positive and neutral stimuli (pictures and words) in Experiment 2. Standard errors are in parentheses.

11. Conclusion

Nous avons présenté, ci-dessus, l'Étude 1 de ce travail de thèse qui est composée de deux expériences comportementales réalisées chez des enfants âgés de 8 à 11 ans, en comparaison avec des jeunes adultes. L'objectif de cette étude était d'évaluer l'EEM chez l'enfant pour les différents composants de la mémoire épisodique, à savoir la mémoire de l'item et la mémoire associative, à l'aide de différents types de stimuli (images et mots) et contextes de présentation de stimuli (visuel, auditivo-verbal, visuo-spatial). Dans l'ensemble, cette étude a démontré la présence d'un EEM chez les enfants, à la fois en mémoire de l'item et en mémoire associative, et de façon similaire aux jeunes adultes. En revanche, les résultats variaient selon le type de stimulus utilisé, à savoir les mots ou les images. Ceci souligne l'importance de l'utilisation d'une méthodologie diversifiée afin de mieux comprendre les mécanismes sous-tendant l'EEM, et afin d'avoir une représentation générale de l'influence des émotions sur la mémoire épisodique dans son ensemble. En outre, cette étude a également révélé que les enfants pouvaient parfois exprimer un EEM général avec un avantage des stimuli négatifs en mémoire, voire même uniquement un effet de *négativité*, particulièrement dans des tâches de rappel libre de stimuli.

II. Étude 2 (Expérience 3) - Corrélats neuronaux de l'EEM chez l'enfant et l'adulte : étude en électro-encéphalographie (EEG)

Article 2 : Massol, S., Caron, C., Franck, N., Demily, C., & Chainay, H. (soumis) Emotional modulation of episodic memory in school-age children and adults : An event-related potential study. *Brain and Cognition*.

1. Préambule

Sur le plan comportemental, l'Étude 1 s'est attachée à démontrer l'existence de l'EEM chez les enfants pour les deux composants principaux de la mémoire épisodique, à savoir la mémoire de l'item et la mémoire associative. Cette étude a également permis de comparer directement les enfants et les adultes pour l'EEM au niveau comportemental et de révéler des résultats similaires entre les deux groupes. Dans le but d'étendre nos connaissances sur les mécanismes sous-tendant l'EEM chez les enfants, l'Étude 2 s'est focalisée sur les corrélats neuronaux associés à l'EEM, afin de révéler d'éventuelles différences développementales au niveau neuronal entre les enfants et les adultes. En effet, si l'EEM semble similaire au niveau comportemental quel que soit le niveau de développement, celui-ci peut néanmoins reposer sur des mécanismes cognitifs et neuronaux différents entre les deux groupes. Ainsi, l'objectif principal de cette étude était d'apporter des connaissances supplémentaires sur les mécanismes cognitifs mis en jeu lors de l'encodage, pouvant sous-tendre l'émergence de l'EEM chez les enfants. Ceci était réalisé par le biais de l'évaluation de corrélats neuronaux censés refléter le plus grand engagement attentionnel envers les stimuli émotionnels par rapport aux stimuli neutres, durant la phase d'encodage. En effet, dans le cadre du modèle de la médiation cognitive chez l'adulte, la modulation de l'attention durant l'encodage représente un des mécanismes cognitifs permettant l'émergence d'un EEM subséquent. Cette étude nous permettait donc de vérifier si l'EEM était sous-tendu par des mécanismes cognitifs similaires quel que soit le niveau de développement des individus, et ainsi de vérifier l'applicabilité d'une partie du modèle de la médiation cognitive à une population encore en développement.

Pour cela, 26 enfants âgés de 8 à 11 ans et 30 jeunes adultes âgés de 18 à 30 ans ont participé à cette étude. Les participants ont réalisé des tâches d'encodage intentionnel d'images négatives, positives et neutres, suivies par des tâches de rappel libre des images. Grâce à la technique de l'EEG, des analyses des réponses neuronales lors de l'encodage des images étaient incluses pour les deux groupes de participants. L'amplitude moyenne du potentiel évoqué LPP a été analysée afin d'évaluer les réactions émotionnelles suscitées par les images négatives ou positives, comparativement aux images neutres (décrit dans l'Article 2 avec le terme *emotion effect*). De plus, afin d'évaluer l'EEM, l'amplitude moyenne du LPP a été analysée pour les images émotionnelles et neutres qui ont bénéficié d'un encodage efficace (*successful encoding*), c'est-à-dire qui ont donné lieu à un rappel ultérieur. De plus, nous avons mesuré l'effet Dm (*Dm effect*), c'est-à-dire l'activité neuronale différentielle durant l'encodage entre les images qui ont été mémorisées comparativement aux images qui ont été oubliées, pour les trois catégories d'images (négatives, positives et neutres).

Au niveau comportemental, notre hypothèse pour cette étude était que les enfants présentent, comme pour les tâches de rappel de l'Étude 1, un effet général des émotions sur la mémoire avec potentiellement un avantage mnésique pour les images négatives par rapport aux images positives. Au niveau neuronal, nous nous attendions à ce que le LPP soit plus ample en réponse aux images émotionnelles comparativement aux images neutres, et ceci de façon encore plus importante pour les images négatives. De plus, le LPP devait être plus ample pour les images émotionnelles ayant bénéficiées d'un encodage efficace comparativement aux images neutres efficacement encodées. Les mêmes résultats étaient attendus pour l'effet Dm. Par ailleurs, les enfants ne disposant pas d'un développement cérébral mature, nous nous attendions à des différences topographiques au niveau de l'émergence du LPP entre les enfants et les adultes, suggérant une différence de maturité au niveau des bases cérébrales sous-jacentes.

Cette étude a été soumise pour publication à *Brain and Cognition* et est présentée sous forme d'article scientifique ci-après. L'article comprend le cadre théorique de notre étude, la méthodologie utilisée, les résultats obtenus ainsi que la discussion de ces résultats.

Emotional modulation of episodic memory in school-age children and adults: An Event-Related Potential study

Soumis pour publication à *Brain and Cognition*.

Sarah Massol¹, Cora Caron², Nicolas Franck², Caroline Demily³, & Hanna Chainay¹

¹Laboratoire d'Étude des Mécanismes Cognitifs (EMC), EA3082
Université Lumière Lyon 2, Bron, France

²Pôle Centre rive gauche et Centre Ressource de réhabilitation psychosociale, Centre hospitalier le Vinatier et Institut Marc Jeannerod, UMR 5229 (CNRS et Université Claude Bernard Lyon 1),
Bron, France

³Pôle Hospitalo-Universitaire ADIS, Centre de Référence Maladie Rares GénoPsy, Centre Hospitalier Le Vinatier et Institut Marc Jeannerod UMR 5229 (CNRS et Université Claude Bernard Lyon 1), Bron, France

2. Abstract

The Emotional Enhancement of Memory (EEM) has been well demonstrated in adults but less is known about EEM in children. The present study tested the impact of emotional valence of pictures on episodic memory using behavioral and neurophysiological measures. Twenty-six 8- to 11-year-old children were tested and compared to thirty young adults. Both groups participated in pictures' intentional encoding tasks while event-related potentials (ERPs) were recorded, followed by immediate free recall tasks. Behavioral results revealed a general EEM in free recall performances in both groups, along with a *negativity effect* in children. ERP responses revealed a particular sensitivity to negative pictures in children with a late *emotion effect* at anterior clusters, as well as

greater LPP for the successful encoding of emotional pictures compared to neutral ones. For adults, the *emotion effect* was more pronounced for positive pictures, across all time windows from the centro-parietal to the frontal part and localized in the left hemisphere. The successful encoding of positive pictures elicited also greater LPP at anterior clusters in adults. By combining behavioral and neurophysiological measures to assess the EEM in children compared with adults, our study provides new knowledge concerning the interaction between emotional and memory processes during development.

Keywords: school-age children, emotions, episodic memory, electro-encephalography (EEG)

3. Introduction

The emotional enhancement of memory (EEM), or having a better memory for emotional than neutral information, has been extensively demonstrated in adults using various paradigms with different type of information (pictures, words, stories etc.) or memory task (for reviews, see Hamann, 2001; Dolcos, Katsumi, Weymar et al., 2017). Enhancing effects of emotion are notably attributed to two dimensions of emotional information: arousal, ranging from calm to exciting, and valence, ranging from unpleasant to pleasant (Russel, 1980, 2003; Barrett, Mesquita, Ochsner, & Gross, 2007; Kensinger & Corkin, 2004). Consistent with the cognitive mediation hypothesis, several psychological studies have suggested that the effects of emotional arousal on memory can be partly explained by cognitive factors such as increased attention toward emotional stimuli (Talmi, Schimmack, Paterson, & Moscovitch, 2007; Talmi & McGarry, 2012). In this respect, emotional stimuli capture more attentional resources than neutral ones and are, therefore, more efficiently encoded in memory (Watts, Buratto, Brotherhood, Barnacle, & Schaefer, 2014).

Electrophysiological studies, such as event-related potential (ERP) studies, provide a valuable opportunity to investigate this cognitive mediation of the effect of emotion on memory and have been widely used in adults (Dolcos & Cabeza, 2002; Weymar, Löw & Hamm, 2011; Watts et al., 2014; Schupp, Kirmse, Schmälzle, Fleisch, & Renner, 2016; Yick, Buratto & Schaefer, 2016). In particular, these studies have examined how EEM is reflected by an ERP component thought to index greater attentional engagement toward emotional stimuli: the late positive potential (LPP). The LPP can appear at several latency ranges (often categorized as early, middle

and late) mainly between 400 and 2000ms after stimulus onset, and it is maximal at centro-parietal sites. This potential can reflect both an *emotion effect*, i.e. a greater amplitude during the presentation of negative and positive stimuli compared to neutrals, and a greater *Dm effect* (or *subsequent memory effect*), i.e. the differential brain activity during encoding associated with later remembered vs. forgotten stimuli, for emotional stimuli compared to neutral ones. Specifically, Dolcos & Cabeza (2002) have analyzed both of these effects in their study and they have observed larger LPP during the presentation of emotional pictures compared to neutral ones at fronto-central and parietal locations (*emotion effect*), as well as larger *Dm effect* for emotional pictures compared to neutral ones during the 400-600ms time window, maximal at midline central electrode. Similar results were found by Weymar et al. (2011), with previously seen emotional pictures eliciting larger LPP (during the 500-800ms time window at centro-parietal sites) than neutral ones during recognition phase. Thus, LPP index emotional enhancement of memory during encoding and retrieval, suggesting that attentional engagement toward emotional stimuli is a reliable predictor of the EEM, even though some ERP modulations may vary depending on stimulus materials and experimental paradigm (for a review, see Olofsson, Nordin, Sequeira, & Polich, 2008).

Although there is general agreement about the emotional regulation of memory in adults, both behavior and neural responses are modulated by age and the emotional valence of information. Some behavioral studies suggest that young adults have a better memory for negative stimuli while older adults have a better memory for positive stimuli, which has been called the *negativity* and *positivity* effects respectively (Murphy & Isaacowitz, 2008, for reviews see Mather & Carstensen, 2005 and Reed & Carstensen, 2012). These behavioral findings are also found at the neural level with several ERP studies showing a modulation of the *emotion effect* with age. Notably, they show an enhancement of the LPP during the presentation of negative over positive stimuli in younger adults and reduced LPP in response to negative stimuli in older adults, during the 400-700ms time window for Kisley, Wood, & Burrows (2007), the 700-1000ms time window for Langeslag & Van Strien (2009) and the 600-900ms time window for Gallant, Pun, & Yang (2018). Some authors suggested that, at least at the behavioral level, these results may be due to age-related differences in the availability of cognitive resources (e.g., Labouvie-Vief, Grünh & Studer, 2010) while other proposed that they are rather due to differences in emotional regulation (e.g., Carstensen, Fung, & Charles, 2003).

Less is known about the emotional enhancement of memory in children, both on behavioral and neurophysiological level. However, children, like older adults, present specific patterns in the

availability of cognitive resources and emotion processing in comparison to young adults (Gee et al., 2013; Kujawa, Klein, & Hajcak, 2012; Luna, Garver, Urban, Lazar, & Sweeney, 2004; Perlman & Pelphrey, 2011; Thompson, 2011; Todd, Evans, Morris, Lewis, & Taylor, 2010). This is possibly in relation with the significant behavioral and cerebral development of emotional responses and regulation during childhood and adolescence (for a review, see Michalska & Davis, 2019), which can likely influence the emotional regulation of memory processes. Nevertheless, evidence from ERP studies using emotional pictures suggest that children, as young as 5 years old, elicit an adult-like *emotion effect* with an enhancement of the LPP in response to negative and positive pictures compared to neutral ones, in the middle and late time windows (from 700 to 2000ms after stimulus onset) at centro-parietal sites (Hajcak & Dennis, 2009; Solomon, DeCicco, & Dennis, 2012). However, developmental changes seem to occur at the neural level with the scalp distribution of the LPP that shift from occipital sites in middle childhood to more anterior regions in adolescence (Kujawa, Klein, & Hajcak, 2012; Kujawa, Klein, & Proudfit, 2013; Pegg, Dickey, Mumper, Kessel, Klein, & Kujawa, 2019) associated with a decrease in amplitude until adulthood during the 400-1000ms time window (Bondy, Stewart, Hajcak et al., 2018). These changes in scalp distribution of the LPP suggest the contribution of different neural resources, and hence, cognitive processes, for the emotion processing across the development.

From a behavioral perspective, some studies have investigated the EEM in children and have shown either an EEM with better memory for negative and positive stimuli alike in 6- to 11-year-old children (Davidson, Luo, & Burden, 2001), better memory for negative and positive stimuli with an advantage for negative ones in 5- to 6-year-old (Van Bergen, Wall, & Salmon, 2015) and 8- to 11-year-old children (Massol, Vantaggio, & Chainay, 2020), and better memory for negative compared to neutral stimuli without comparison with positive ones (Quas & Lench, 2007; Cordon, Melinder, Goodman, & Edelstein, 2013). While the majority of studies suggest that children do demonstrate an EEM (for a review, see Hamann & Stevens, 2013), there are still some inconsistencies with studies showing no effect of emotion on memory in children (Howe, Candel, Otgaar, Malone, & Wimmer, 2010; Leventon, Stevens, & Bauer, 2014; Peterson & Bell, 1996). Because all the studies did not assess the children's EEM in relation to that in adults, it is not clear whether the EEM is consistent across development. An early hint has been given by a recent study that investigated the effect of emotion on recognition memory across middle childhood, adolescence and early adulthood, in 8- to 30-year-old individuals (Stenson, Leventon, & Bauer, 2019). The authors have shown similar results across the age range, with significantly

better memory for negative and positive pictures relative to neutrals, showing great consistency in EEM from the middle childhood to adulthood. Moreover, in this study, the negative-neutral memory difference was larger than the positive-neutral difference, suggesting a general EEM along with a *negativity* effect for all the participants. The study of Massol et al. (2020) also added evidence for this consistency across age with similar results obtained between groups of 8- to 11-year-old children and groups of young adults for the effect of emotion on item and associative memory. These behavioral findings should be further addressed through physiological measures to examine developmental change in the neural correlates underlying emotional memory. To date, only two ERP studies have investigated the neural responses associated with the EEM in children (Leventon, Stevens, & Bauer, 2014 and Leventon & Bauer, 2016). The first authors have shown, despite the lack of emotional influence on behavioral recognition performance, a larger LPP during encoding and recognition of negative pictures in 7.5- to 9-year-old children relative to positive and neutral pictures. Moreover, Leventon & Bauer (2016) analyzed the EEM separately for negative and positive stimuli across two recognition tasks in 8-year-old girls. They have shown that girls demonstrate enhanced behavioral recognition for negative relative to neutral stimuli but show no difference for the recognition performance of positive and neutral stimuli. In ERP responses, however, the girls elicited larger LPP during encoding and recognition of both, negative and positive, stimuli relative to neutral ones. Unfortunately, these studies did not compare the children groups with adults, providing a partial insight into the developmental neural changes associated with the EEM.

Therefore, in an attempt to further address the emotional modulation of episodic memory across development, the present study investigated this phenomenon in 8- to 11-year-old children and young adults, with both behavioral and neurophysiological measures using ERPs. This age limit was chosen for children in regards to a previous ERP study that have shown more consistency between behavioral and ERP responses for the EEM from the age of 8 years (Leventon & Bauer, 2016). However, sometimes a discrepancy between behavioral and physiological responses concerning EEM in children remains. Moreover, to identify the stage of development during which the interaction between emotional and memory processes takes place, multiple measures should assess more systematically the EEM in children. It also seems important to provide some indications on the development of the cognitive factors involved in the cognitive mediation hypothesis during encoding. Therefore, the study of LPP in children provides a promising opportunity to examine the relevance of this hypothesis in individuals who are still in a period of development. For that

reason, in our study, children and young adults participated in pictures' intentional encoding tasks while ERPs were recorded, followed by immediate free recall tasks. The inclusion of an adult group allowed us to directly compare the EEM across age groups and to find potential changes throughout the development on both, behavioral and physiological level, with the evaluation of recall performances, and ERPs and their scalp topography. Concerning the recall performances, we hypothesized that negative and positive pictures would be better recalled than neutral ones in children and adults. Moreover, based on the idea that additional attention during the encoding of emotional stimuli is the main determinant of the EEM, we hypothesized that the LPP described above would be enhanced during the encoding of emotional, negative and positive, pictures relative to neutral ones (*emotion effect*) in both groups. In addition, as a *negativity* effect has often been demonstrated in children and adults for both behavioral and physiological responses, we also expect negative pictures to elicit greater free recall performances and LPP amplitudes relative to positive ones. An additional analysis of the LPP during the successful encoding of pictures would allow us to measure the *Dm effect* in both children and adults, and obtain a closer link between recall performance and ERPs. For this, we also expect larger *Dm effect* for negative and positive pictures compared to neutral ones in both groups. Finally, some uncertainties remain regarding the scalp distribution of the ERPs in children, as 8- to 11-year-old children are still in a period of emotional development (Kujawa, Klein, & Hajcak, 2012; Kujawa, Klein, & Proudfit, 2013). Thus, the evaluation of the ERP topography in children in relation to their recall performances will provide further knowledge about the development of the neural correlates underlying EEM.

4. Method

Participants

Twenty-six typically developing children (10 girls and 16 boys, 8-11 years of age, $M = 9.83$, $SD = 1.45$) and 30 young adults (16 women and 14 men, 18-28 years of age, $M = 21.47$, $SD = 2.47$) participated in this study. Our target sample size was determined using an *a priori* power analysis (Faul, Erdfelder, Lang & Buchner, 2007) via G*Power, using η^2_p from previous studies investigating effects of emotion on memory in children with recall task. For example, previous studies by Van Bergen et al., 2015 and Massol et al., 2020 found respectively η^2_p of .36 and .23. Using the lowest $\eta^2_p = .23$, our study design with one between-participants factor (children and adults group) and one repeated factor – valence (negative, positive, neutral), could achieve with

$\alpha = .05$, 80% power with 15 participants per group. We also calculated, with the same criteria, the sample size needed to obtain significant effect of valence on LPP using η^2_p from previous studies examining this effect (Solomon et al., 2012 and Leventon et al., 2016) that varied from .125 to .285. Using the lowest $\eta^2_p = .125$ our study design could achieve with $\alpha = .05$, 80% power with 30 participants per group. Thus we have planned to include 30 participants per group but we succeed in doing so only for the adults group. All participants were right-handed as assessed by the Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971). Participants' characteristics are presented in Table 6. Children were recruited from advertising and local elementary schools, and young adults were undergraduate students recruited at the university. All the participants were healthy, French speakers, and reported no history of psychiatric, neurodevelopmental, neurological or learning disorders. They were not taking any somatic medications and did not have any uncorrected visual problems. Prior to testing, children's parents and young adults signed informed consent, and children gave verbal assent in accordance with the Helsinki declaration. The children received a €20 voucher and the adults were paid €20 for their participation in the study. The research was approved by the Ethical Review Board (Comité de Protection des Personnes Nord-Ouest IV, Lille, France, Nr. 2017 A03321 52).

Stimuli and Material

180 color photographs (567 x 425 pixels) depicting various types of scenes with common living and non-living elements (e.g., landscapes, animals, accidents, weapons etc.) were used for each group, children and adults. The two pools of 180 pictures were not exactly the same for children and adults to better control valence, arousal and complexity parameters for each group. Thus, 60 positive, 60 negative and 60 neutral pictures were selected for children and for adults from the Developmental Affective Photo System (DAPS: Cordon et al., 2013), which provides emotional valence, arousal and complexity ratings for pictures from children and adults. Among those pictures, 41 positive, 44 negative and 43 neutral pictures were identical between children and adults.

For children, the positive, negative and neutral pictures differed significantly in terms of valence (all t-test comparisons were significant, $p < .0001$) and the emotional pictures (negative and positive) were significantly more arousing than the neutral pictures (both $p < .0001$). The negative and positive pictures did not differ in terms of arousal ($p = .66$). The positive, negative and neutral

pictures were also matched on visual complexity (all $p > .12$). For adults, the positive, negative and neutral pictures differed significantly in terms of valence (all t-test comparisons were significant, $p < .0001$) and the emotional pictures (negative and positive) were significantly more arousing than the neutral pictures (both $p < .0001$). The negative and positive pictures did not differ in terms of arousal ($p = .05$). The positive and negative, and the positive and neutral pictures were also matched on visual complexity (all $p > .13$) but the negative pictures were significantly more complex than the neutral pictures ($p < .002$) due to the incapacity to control this parameter for these pictures. For both groups, the negative and positive pictures did not overlap with the neutral pictures in terms of normative valence and arousal ratings. See Appendix – Table 12 for means pictures ratings and standard deviations for children and adults.

The 180 pictures in each pool were split into six sets of 30 pictures (10 positive, 10 negative and 10 neutral) which were assigned to six study-test blocks for both groups. Within each set, the positive, negative and neutral pictures significantly differed in terms of valence (all $p < .0001$) and the emotional pictures (negative and positive) were significantly more arousing than the neutral pictures (both $p < .0001$). The negative and positive pictures did not differ in terms of arousal (all $p > .66$). The positive, negative and neutral pictures were also matched on visual complexity (all $p > .28$), for both children and adults.

Mood and Neuropsychological assessments

The Face Mood Assessment Test for Children (FMATC – Christodoulou & Burke, 2016) and the French version of the Brief Mood Introspection Scale (BMIS – Mayer & Gaschke, 1988) were administered to self-report children's and adults' emotional states. For the FMATC, children had to select one of the six faces illustrating emotional expressions on a scale from 1 (sad) to 6 (happy). The BMIS is a mood adjective scale consisting of 16 mood-adjectives which can identify, among other things, a pleasant-unpleasant mood. The BMIS was shortened to 12 mood-adjectives for children by removing all the not commonly used adjectives that could have impeded understanding. Thus, the results ranged from 16 (very unpleasant mood) to 64 (very pleasant mood) for adults and from 12 (very unpleasant mood) to 48 (very pleasant mood) for children. In order to ensure that all children presented cognitive functioning within normal range, the Wechsler Intelligence Scale for Children (WISC-V – Wechsler, 2014) was also administered to children to

assess the verbal comprehension (similarities subtest) and the fluid reasoning (matrix reasoning subtest).

Procedure

Before starting the experiment, the participants completed the FMATC and BMIS to self-report their emotional state. Then, they were explained that they would see six blocks of pictures. Six different block orders were employed, and pictures within each block were presented successively in a pseudorandom order in such a way that no more than two pictures of the same valence occurred in succession for each participant. During the encoding phase (or study phase) of each block, the participants were asked to remember the pictures for the subsequent recall test, and to respond to the question ‘Do you see a human face or part of a human face in the picture?’ for each picture by pressing one of two keys corresponding to ‘yes’ or ‘no’, respectively, and labeled with colored stickers. This was done to focus the participants’ attention on the pictures. The proportion of pictures that contained a human face or not was equivalent for each category of valence. Each picture was presented for a total of 5000ms on a computer screen with the picture alone for the first 3000ms and for an additional 2000ms with the two options ‘yes’ or ‘no’ that appeared underneath the picture with the same colors as the corresponding computer responses. The participants were instructed to pay attention to the pictures and to wait until the two options appeared on the screen before making a keypress response to indicate if the picture contained a human face. The 2-computer responses were counterbalanced across participants. A jittered 1500-2000ms inter-stimulus interval (ISI) was employed to prevent habituation and development of picture onset expectations. During this interval, a central fixation cross was presented to ensure that the participants fixated the center of the screen before picture onset (see Figure 16). After the study phase of each block, the participants completed a 1-min arithmetic task before starting the recall of pictures (test phase). Two simple sums were presented on the screen and the participants had to compute the sums mentally and identify the highest value sum by pressing one of two keys. For each test phase, the participants were asked to orally recall as many pictures as they could remember from the study phase (out of the 30) regardless of the order in which they had appeared, during 5 minutes. The participants were instructed to give as many details about the pictures as possible so that anyone could recognize them. If the experimenter felt that the description of the pictures was not precise enough, she asked the participant for clarification. The experimenter wrote down the

participants' answers. If there was any doubt about the identity of the picture during scoring, double-scoring was performed.

EEG was recorded during encoding of the pictures but not during free recall. The participants were told to remain still, stare at the center of the screen and withhold blinks as much as possible while the stimuli were displayed. The experimenter was looking at the continuous EEG data during recording and feedback was given to the participants if they were not conforming to the instructions. All the participants followed the instructions well.

Practice trials with 15 neutral pictures for the encoding phase were presented at the beginning to make sure that the participants understood how to complete the task with the EEG instructions. This was repeated if necessary until it was clear that the participants understood and performed as instructed. The experiment was programmed and run with the E-Prime software (2.0) on a Dell PC computer.

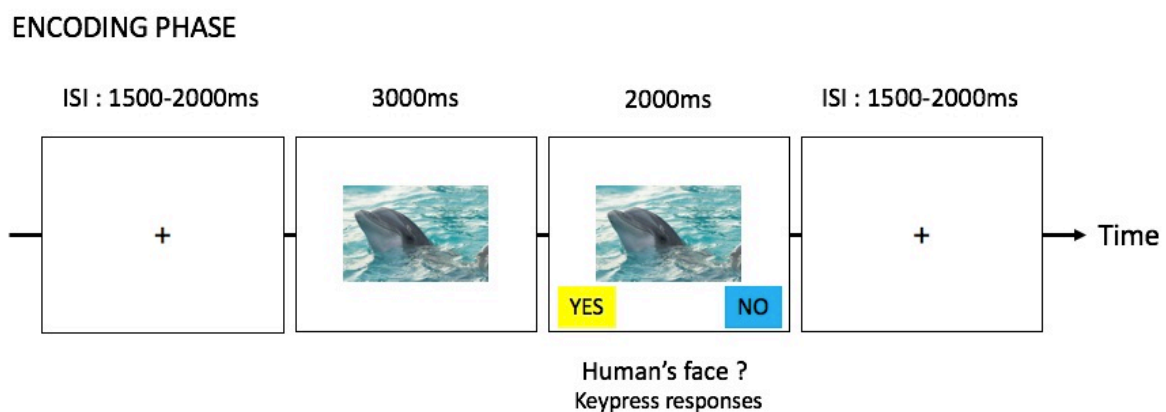


Figure 16. Procedure for encoding phase.⁴

At the end of the experiment, we administered two neuropsychological tests (described above) to the children, in order to characterize this population and to ensure that they all presented cognitive

⁴ The picture is not from the DAPS and is used for illustrative purposes only. It has been downloaded from the photography sharing website unsplash.com and is used in accordance with the Terms and Conditions of the website that do not require further permission.

functioning within normal range. All the children performed within normal range. The raw and standard means performances for all the tests are presented in Table 6.

Function	Test	Children N = 26	Adults N = 30
	Mean Age	9.83 (1.45)	21.47 (2.47)
	Female / Male	10 girls and 16 boys	16 females and 14 males
Mood	FMATC	5.38 (0.57)	/
	BMIS	41.12 (3.48)	52.17 (4.40)
Handedness	Edinburgh Inventory	80.54 (21.40)	80.10 (20.05)
Cognitive functioning	WISC-V Similarities	0.70 (0.21)	/
	WISC-V Matrix Reasoning	0.73 (0.18)	/

Table 6. Mood, Handedness and Cognitive functioning assessments for children and adults.

Note: Raw mean scores are presented for FMATC, BMIS and Edinburgh Inventory. Mean percentile ranks are presented for subtests of WISC-V. Standard deviations are in parentheses.

ERP data recording and reduction

EEG was recorded from 128 Ag/AgCl electrode elements embedded in a cap (WaveGuard, ANT, The Netherlands), conforming to the 10-20 international electrode placement system. The EEG signal was recorded using ASAlab 4.7 software. Impedances were under 5 k Ω and the sampling rate was set at 1024 Hz. Data were preprocessed using EEGLab v14.1.2 operating in Matlab R2018b. Data were rereferenced offline to the combined P9 and P10 electrodes, which are closest to the mastoids and thought to optimize LPP effects (Hajcak, Weinberg, MacNamara, & Foti, 2012), filtered using a bandpass filter between 0.1 and 30 Hz, downsampled to 256 Hz, segmented into 2200ms epochs (from 200ms before to 2000ms after picture onset) and baseline-corrected (200ms prior to picture onset). Trials that were contaminated by positive or negative deflections that exceeded 50 μ V were excluded from the analysis, using the 200ms moving window peak-to-peak threshold for the automatic artifact detection. Data from six children and four adults were excluded due to poor quality EEG recording (n = 3 children and 1 adult) or due to more than 20 outliers in the data, seen through box plots in the descriptive statistics (n = 3 children and 3 adults). Thus, the

final sample for the ERP data analysis included 20 children (8 girls and 12 boys, 8-11 years of age, $M = 10.13$, $SD = 1.22$) and 26 young adults (15 women and 11 men, 18-28 years of age, $M = 21.75$, $SD = 2.46$). To investigate the *emotion effect*, artifact-free epochs were averaged in 3 conditions: negative, positive and neutral. This was done separately for children and adults. The mean number of epochs included in the ERP averages was: for children, $M = 52.85$ (5.69) epochs for negative, $M = 51.40$ (6.57) epochs for positive and $M = 51.45$ (6.08) epochs for neutral conditions, and for adults, $M = 58.00$ (2.00) epochs for negative, $M = 57.92$ (1.67) epochs for positive and $M = 56.42$ (2.34) epochs for neutral conditions. Additional analyses of the *successful encoding effect* (i.e. pictures that were later remembered) and the Difference Wave (DW) scores (i.e. pictures that were later remembered minus pictures that were later forgotten, called *Dm effect*) in each condition were conducted on a subsample of participants who had more than 10 artifact-free epochs in each condition: 16 children (7 girls and 9 boys, 8-11 years of age, $M = 10.20$, $SD = 1.29$) and the same group of 26 young adults as above). The mean number of epochs included in the ERP averages for the successful encoding of pictures and the *Dm effect* is presented in Table 7 for children and adults.

Pictures	Children (N = 16)		Adults (N = 26)	
	Remembered	Forgotten	Remembered	Forgotten
Negative	26.44 (7.81)	27.19 (7.07)	34.35 (7.83)	23.65 (8.00)
Positive	18.06 (5.05)	34.63 (7.68)	32.50 (6.89)	25.35 (6.58)
Neutral	13.75 (8.87)	38.69 (9.69)	22.00 (6.84)	34.42 (6.95)

Table 7. Mean number of epochs included in ERP averages for the *Dm effect* for children and adults. Standard deviations are in parentheses.

ERP data analysis

Averaged data were examined in the light of previous studies (Dolcos & Cabeza, 2002; Leventon et al. 2014, 2016; Hajcak & Dennis, 2009 and Solomon et al., 2012) and, in particular, the shape of the encoding ERP waveforms revealed a sustained positive slow-wave consistent with the LPP over all electrodes. The LPP is interpreted for deflections toward positive amplitude regardless of value. That is, only positive deflection is interpreted even if effects at frontal and central sites are negative. This is consistent with the approach taken in Leventon et al. (2014, 2016), Hajcak & Dennis (2009) and Solomon et al. (2012) studies. For the six encoding blocks, mean amplitude of the LPP was examined over five time windows (W1: 400-600ms, W2: 600-800ms, W3: 800-

1200ms, W4: 1200-1600ms and W5: 1600-2000ms) and four clusters of electrodes divided into right and left hemispheres (Frontal: AF3, AF4, F1, F2, F3, F4; Fronto-Central: FC1, FC2, FC3, FC4, C1, C2, C3, C4; Centro-Parietal: CP1, CP2, CP3, CP4, P1, P2, P3, P4; Occipital: O1, O2, POO3h, POO4h, POO9h, POO10h; clusters are depicted in Figure 17). These locations and time windows were selected based on previous researches on both the *emotion* and *Dm effect* (Dolcos & Cabeza, 2002; Leventon et al. 2014, 2016; Hajcak & Dennis, 2009 and Solomon et al., 2012) and a careful visual inspection of our own data in order to investigate the duration, the timing and the topography of emotional and memory responses.

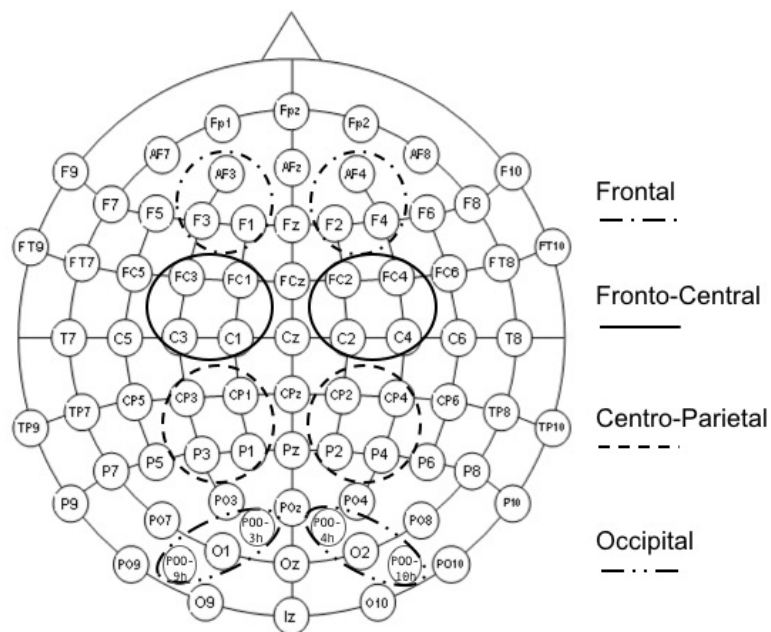


Figure 17. Electrode layout conforming to the 10-20 international system. The four clusters, separated into right and left hemisphere, are circled with different continuous or broken lines.

Behavioral statistical analysis

The scores for correct free recall for the positive, negative and neutral pictures were used for the statistical analysis. Preliminary analyses were performed to check for sphericity (Mauchly's test) and homogeneity of variance (Levene's test), with no violations being found for any of the data. A mixed-measures ANOVA was performed on the scores with Valence (negative vs. positive vs. neutral) as within-subject factor and Group (children vs. adults) as between-subject factor. We also included the within-subject factor Block to check the recall performances according to the blocks.

These analyses were followed by post-hoc comparisons with Bonferroni corrections. All the results in the text and figures are expressed in percentages.

ERP statistical analysis

In order to investigate the *emotion effect*, mean amplitude of the averaged LPP waveforms were analyzed using mixed-measures ANOVAs. Preliminary analyses were performed to check for sphericity (Mauchly's test). When violations were found, the Greenhouse-Geisser sphericity correction was applied to the data. First we performed a global analysis using a mixed-measures ANOVA with Valence (negative vs. positive vs. neutral), Window (W1 vs. W2 vs. W3 vs. W4 vs. W5), Cluster (frontal vs. fronto-central vs. centro-parietal vs. occipital) and Hemisphere (right vs. left) as within-subject factors and Group (children vs. adults) as between-subject factor. Moreover, in order to investigate the *successful encoding effect*, we performed the same analysis as above but with the inclusion of the within-subject factor Recall (recalled pictures vs. forgotten pictures). Then, to identify more precisely these effects, we performed separate mixed-measures ANOVAs with the same factors as the first analyses but separately for children and adults. All these analyses were followed by post-hoc comparisons with Bonferroni corrections.

In order to investigate the *Dm effect*, mean amplitude of the averaged DW (i.e. pictures that were later remembered minus pictures that were later forgotten) was analyzed using mixed-measures ANOVAs. Preliminary analyses were performed to check for sphericity (Mauchly's test) and homogeneity of variance (Levene's test). When violations were found, the Greenhouse-Geisser sphericity correction was applied to the data. Thus, a mixed-measures ANOVA with Memory Valence (negative recalled minus negative forgotten vs. positive recalled minus positive forgotten vs. neutral recalled minus neutral forgotten), Window (W1 vs. W2 vs. W3 vs. W4 vs. W5), Cluster (frontal vs. fronto-central vs. centro-parietal vs. occipital) and Hemisphere (right vs. left) as within-subject factors, and Group (children vs. adults) as between-subject factor, was performed. This analysis was followed by post-hoc comparisons with Bonferroni corrections.

5. Results

Behavioral results

The ANOVA yielded a significant Valence x Group interaction, $F(2,108) = 3.66$, $p < .03$, partial $\eta^2 = .07$. Post-hoc comparisons showed that adults had better recall for negative (Mean = 59.8, SE = 2.5, $t(108) = 8.6$, $p_{\text{bonf}} < .001$), and positive (M = 58.0, SE = 2.5, $t(108) = 7.8$, $p_{\text{bonf}} < .001$) than for neutral pictures (M = 41.7, SE = 2.5). The difference between negative and positive pictures was not significant, $t(108) = 0.8$, $p_{\text{bonf}} = 1.0$. Children had better recall for negative pictures (M = 40.2, SE = 2.5) than for positive (M = 30.7, SD = 2.5, $t(108) = 4.2$, $p_{\text{bonf}} < .001$), and neutral pictures (M = 20.9, SD = 2.5, $t(108) = 8.5$, $p_{\text{bonf}} < .001$). Positive pictures were also recalled better than neutral ones, $t(108) = 4.3$, $p_{\text{bonf}} < .001$ (see Figure 18). A significant main effect of Group also emerged, $F(1,54) = 56.25$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .51$, with adults (M = 53.2, SE = 2.1) performing better than children (M = 30.6, SE = 2.1). The interaction Block x Group was also significant, $F(5,270) = 3.27$, $p < .007$, partial $\eta^2 = .06$. Post-hoc comparisons showed that adults had similar performances across all blocks (all $p_{\text{bonf}} > .54$) and children had significantly better performances for the first two blocks than the sixth block (all $p_{\text{bonf}} < .001$). The interactions of Block with other factors were not significant (Valence x Block $F(10,540) = .99$, $p = .45$, partial $\eta^2 = .02$, and Valence x Block x Group $F(10,540) = .59$, $p = .82$, partial $\eta^2 = .01$).

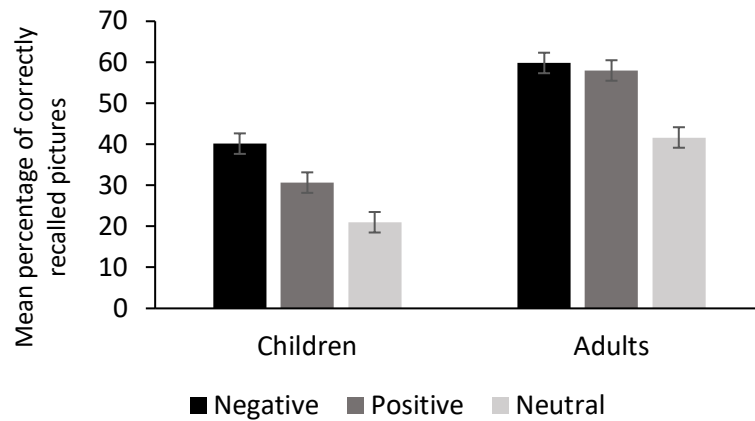


Figure 18. Mean percentage of correct responses for free recall of pictures as a function of group (children vs. adults) and emotional valence (negative vs. positive vs. neutral). Error bars represent standard errors.

ERP results

ERP results are divided into three sections: *emotion effect*, *successful encoding effect* and *Dm effect*. For each section, the global analysis for children and adults is presented first, followed by separate analyses for each group, where appropriate. For clarity of presentation of the results, only the main effects and interactions that inform the research question are reported. All the ERP results in the text and figures are expressed in microvolts (μV).

Emotion effect

The global ANOVA, using Greenhouse-Geisser sphericity correction, yielded a significant main effect of Valence, $F(2,88) = 7.94$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .15$. Post-hoc comparisons showed that ERPs for negative (Mean = -2.38 , SE = $.39$), $t(88) = 3.74$, $p_{\text{bonf}} < .001$, and positive pictures (Mean = -2.49 , SE = $.39$), $t(88) = 3.05$, $p_{\text{bonf}} < .009$, were more positive-going than ERPs for neutral pictures (M = -2.98 , SE = $.39$). The difference between negative and positive pictures was not significant, $t(88) = 0.69$, $p_{\text{bonf}} = 1.00$. The Window x Group and Cluster x Group interactions were also significant, $F(1.22,53.70) = 21.14$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .33$ and $F(1.20,52.89) = 14.68$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .25$, respectively. Post-hoc comparisons showed that ERPs were more positive-going for adults than children during the W1 (400-600ms) (children: M = -7.26 , SE = $.60$; adults: M = -3.06 , SE = $.58$), $t(65.4) = 5.01$, $p_{\text{bonf}} < .001$, the W2 (600-800ms) (children: M = -5.94 , SE = $.60$;

adults: $M = -1.63$, $SE = .58$), $t(65.4) = 5.13$, $p_{\text{bonf}} < .001$, and the W3 (800-1200ms) (children: $M = -3.43$, $SE = .60$; adults: $M = -0.44$, $SE = .58$), $t(65.4) = 3.56$, $p_{\text{bonf}} < .04$, time windows. The difference in ERPs between children and adults during the W4 (1200-1600ms) (children: $M = -1.60$, $SE = .60$; adults: $M = -0.70$, $SE = .58$) and W5 (1600-2000ms) (children: $M = -1.21$, $SE = .60$; adults: $M = -0.90$, $SE = .58$) time windows were not significant, all $p_{\text{bonf}} = 1.00$. The ERPs were also more positive-going for adults than children at the frontal (children: $M = -7.61$, $SE = .70$; adults: $M = -2.63$, $SE = .67$), $t(105) = 5.12$, $p_{\text{bonf}} < .001$, and fronto-central (children: $M = -6.38$, $SE = .70$; adults: $M = -2.05$, $SE = .67$), $t(105) = 4.45$, $p_{\text{bonf}} < .001$, clusters. The difference in ERPs between children and adults at the centro-parietal (children: $M = -2.45$, $SE = .70$; adults: $M = -0.65$, $SE = .67$) and occipital (children: $M = 0.89$, $SE = .70$; adults: $M = -0.05$, $SE = .67$) clusters were not significant, all $p_{\text{bonf}} = 1.00$. Moreover, a significant Valence x Window x Group interaction, $F(3.08, 135.63) = 4.88$, $p < .003$, partial $\eta^2 = .10$, and a trend for Valence x Window x Cluster x Group interaction, $F(4.26, 187.66) = 2.12$, $p = .08$, partial $\eta^2 = .05$, emerged. To better understand these interactions, we performed the analyses for each group separately (see below).

The ANOVA realized separately for children yielded a significant main effect of Valence, $F(2, 38) = 4.06$, $p < .03$, partial $\eta^2 = .18$. Post-hoc comparisons showed that ERPs for negative pictures (Mean = -3.61 , $SE = .85$) were more positive-going than ERPs for neutral pictures ($M = -4.57$, $SE = .85$), $t(38) = 2.83$, $p_{\text{bonf}} < .03$. The difference between negative and positive pictures ($M = -3.99$, $SE = .85$), and between positive and neutral pictures were not significant, $t(38) = 1.13$, $p_{\text{bonf}} = .80$, and $t(38) = 1.70$, $p_{\text{bonf}} = .29$, respectively. More precisely, a significant Valence x Window interaction, $F(8, 152) = 4.28$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .18$, a trend for Valence x Cluster interaction, $F(6, 114) = 2.11$, $p = .057$, partial $\eta^2 = .10$, and a significant Valence x Window x Cluster interaction, $F(24, 456) = 2.36$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .11$, also emerged. Overall, the post-hoc comparisons, showed that ERPs for negative pictures were more positive-going than for neutral pictures only at the frontal cluster during the W4 (1200-1600ms), $t(456) = 4.62$, $p_{\text{bonf}} < .02$, and the W5 (1600-2000ms) time windows, $t(456) = 5.96$, $p_{\text{bonf}} < .001$, and at the fronto-central cluster during the W5 time window, $t(456) = 4.43$, $p_{\text{bonf}} < .03$. Waveforms at frontal, fronto-central, centro-parietal and occipital clusters are plotted in Figure 19. Descriptive statistics are reported in Table 8.

Variables	Mean difference (SE)	$p_{\text{bonferroni}}$	Effect size (Cohen's d) ^b	CI lower ^a	CI upper ^a
Valence					
Negative vs. Positive	0.383 (.340)	.799	0.252	-0.467	1.234
Negative vs. Neutral	0.961 (.340)	.022*	0.633	0.110	1.812
Positive vs. Neutral	0.578 (.340)	.291	0.380	-0.273	1.428
Valence x Window x Cluster					
F W4: Neg vs. Neu	2.474 (.535)	.012*	/	0.177	4.771
F W5: Neg vs. Neu	3.189 (.535)	<.001*	/	0.892	5.486
FC W5: Neg vs. Neu	2.373 (.535)	.028*	/	0.076	4.670

Table 8. Children – Waveforms – *Emotion effect*.

^a 95% CI for Mean Difference, ^b Cohen's d does not correct for multiple comparisons. The significant comparisons are indicated by *. F: Frontal; FC: Fronto-Central; W: Window. For interactions, only significant or trend data are reported.

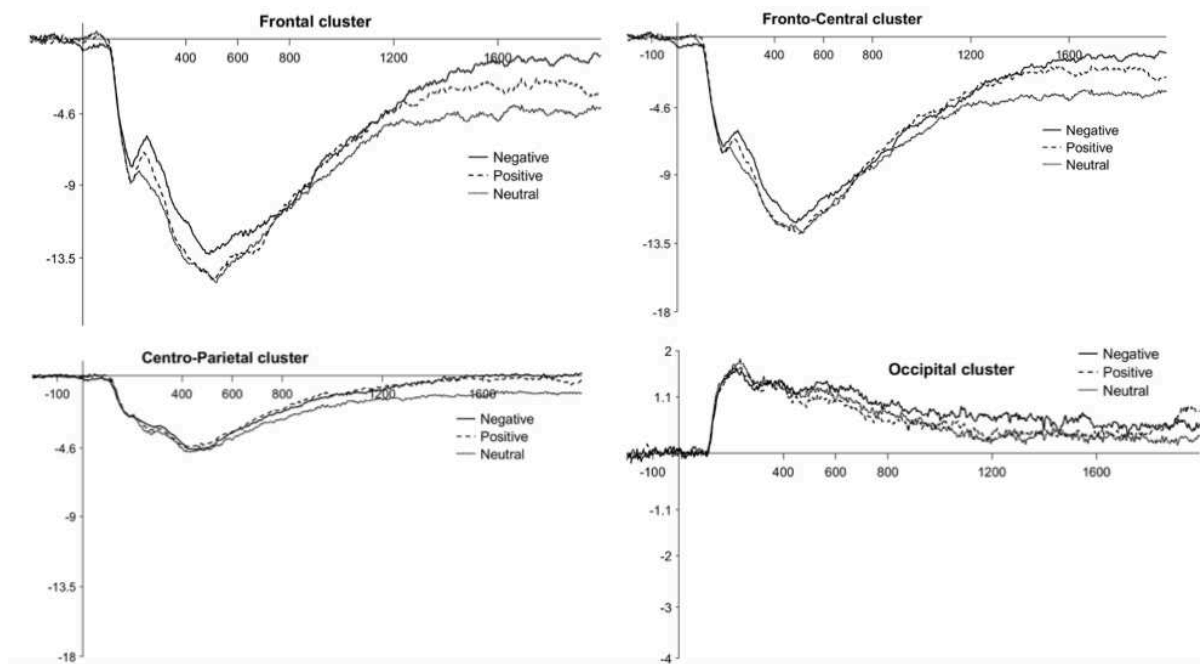


Figure 19. Children's LPP waveforms for the *emotion effect* at frontal, fronto-central, centro-parietal and occipital clusters. Negative, positive and neutral conditions are plotted with different continuous or broken lines.

The ANOVA realized separately for adults yielded, after application of the Greenhouse-Geisser sphericity correction, a significant main effect of Valence, $F(1.53, 38.37) = 6.93$, $p < .005$, partial $\eta^2 = .22$. Post-hoc comparisons showed that ERPs for positive pictures (Mean = -1.32, SE = .21) were more positive-going than ERPs for neutral pictures (M = -1.73, SE = .21), $t(50) = 3.70$, $p_{\text{bonf}} < .002$. A trend toward ERPs being more positive-going for negative pictures (M = -1.48, SE = .21) than for neutral pictures also emerged, $t(50) = 2.24$, $p_{\text{bonf}} = .09$. The difference between positive and negative pictures was not significant, $t(50) = 1.46$, $p_{\text{bonf}} = 0.45$. More precisely, significant Valence x Cluster interaction, $F(3.10, 77.59) = 4.80$, $p < .004$, partial $\eta^2 = .16$, and Valence x Hemisphere interaction, $F(1.92, 48) = 3.45$, $p < .04$, partial $\eta^2 = .12$, emerged. Post-hoc comparisons for Valence x Cluster interaction showed that ERPs were more positive-going for positive pictures than for neutral pictures at the frontal, $t(136.8) = 3.80$, $p_{\text{bonf}} < .02$, and fronto-central clusters, $t(136.8) = 4.48$, $p_{\text{bonf}} < .002$, with a trend at the centro-parietal cluster, $t(136.8) = 3.41$, $p_{\text{bonf}} = .057$. Moreover, post-hoc comparisons for Valence x Hemisphere interaction showed that ERPs for positive pictures were more positive-going than for neutral pictures in the left hemisphere only, $t(62.1) = 4.35$, $p_{\text{bonf}} < .001$. The Valence x Cluster x Hemisphere interaction was not significant, $F(1.74, 43.62) = 1.85$, $p = .17$, partial $\eta^2 = .069$. Waveforms at frontal, fronto-central, centro-parietal and occipital clusters are plotted in Figure 20. Descriptive statistics are reported in Table 9.

Variables	Mean difference (SE)	$p_{\text{bonferroni}}$	Effect size (Cohen's d) ^b	CI lower ^a	CI upper ^a
Valence					
Negative vs. Positive	0.161 (.110)	.452	0.286	-0.434	0.112
Negative vs. Neutral	0.246 (.110)	.090	0.439	-0.027	0.519
Positive vs. Neutral	0.407 (.110)	.002*	0.725	0.134	0.680
Valence x Cluster					
F: Pos vs. Neu	0.568 (.149)	.014*	/	0.053	1.083
FC: Pos vs. Neu	0.669 (.149)	.001*	/	0.155	1.184
CP: Pos vs. Neu	0.509 (.149)	.057	/	-0.006	1.023
Valence x Hemisphere					
LH: Pos vs. Neu	0.508 (.117)	< .001*	/	0.151	0.864

Table 9. Adults – Waveforms – *Emotion effect*.

^a 95% CI for Mean Difference, ^b Cohen's d does not correct for multiple comparisons. The significant comparisons are indicated by *. F: Frontal; FC: Fronto-Central; CP: Centro-Parietal; LH: Left Hemisphere. For interactions, only significant or trend data are reported.

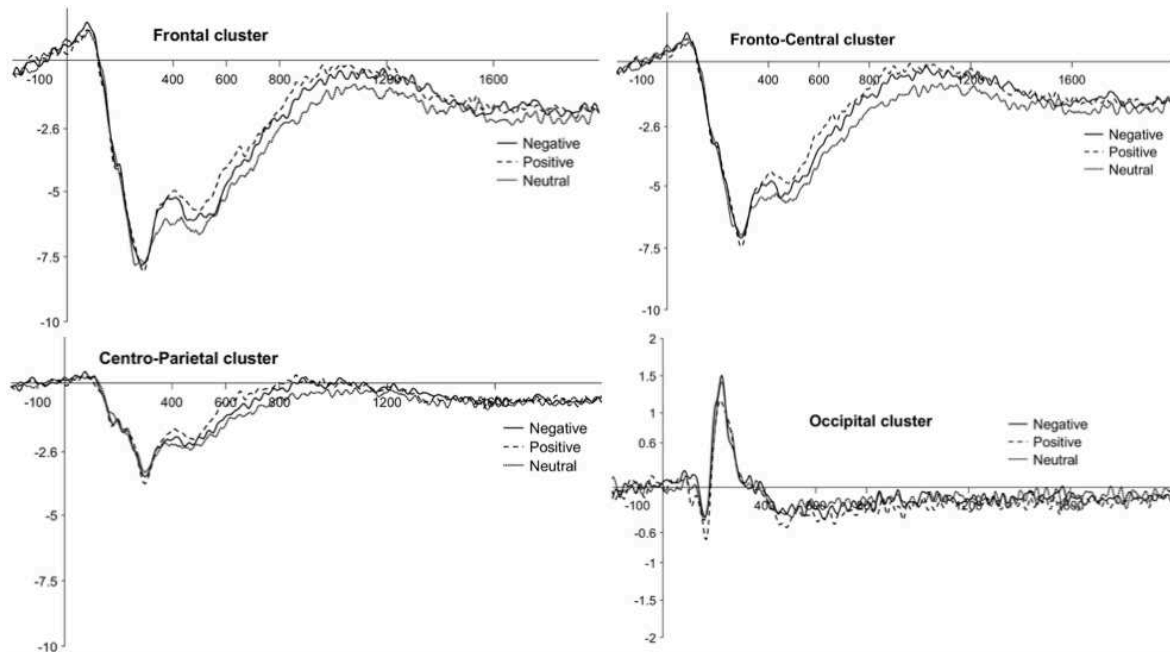


Figure 20. Adults' LPP waveforms for the *emotion effect* at frontal, fronto-central, centro-parietal and occipital clusters. Negative, positive and neutral conditions are plotted with different continuous or broken lines.

Successful encoding effect

The global ANOVA, using Greenhouse-Geisser sphericity correction, yielded a significant main effect of Recall, $F(2,40) = 7.11$, $p < .01$, partial $\eta^2 = .15$, with ERPs being more positive-going for recalled pictures ($M = -2.30$, $SE = .36$) than for forgotten pictures ($M = -2.58$, $SE = .36$). The Recall x Cluster interaction was also significant, $F(1.39,55.51) = 8.11$, $p < .003$, partial $\eta^2 = .17$. Post-hoc comparisons showed that ERPs were more positive-going for recalled than for forgotten pictures at the frontal (Recalled: $M = -4.71$, $SE = .47$; Forgotten: $M = -5.18$, $SE = .47$), $t(96.7) = 3.51$, $p_{\text{bonf}} < .02$, and fronto-central clusters (Recalled: $M = -3.70$, $SE = .47$; Forgotten: $M = -4.20$, $SE = .47$), $t(96.7) = 3.71$, $p_{\text{bonf}} < .01$. Moreover, a significant Valence x Recall x Window x Cluster x Group interaction, $F(5.87,234.79) = 2.92$, $p < .01$, partial $\eta^2 = .07$, emerged. To better understand this interaction, we performed the analysis for each group separately (see below).

The ANOVA realized separately for children showed that the main effect of Recall and the Valence x Recall interaction were not significant, $F(1,15) = 2.82$, $p = .11$, partial $\eta^2 = .16$ and $F(2,30) = .69$, $p = .51$, partial $\eta^2 = .04$, respectively. All the interactions including both the factors

Valence and Recall were not significant (all $p > .05$), except for the Valence x Recall x Window x Cluster interaction, $F(24,360) = 2.42$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .14$. Post-hoc comparisons showed that ERPs were more positive-going for negative recalled than neutral recalled pictures during the W5 time window at frontal cluster (Negative: $M = -0.69$, $SE = 1.34$; Neutral: $M = -5.09$, $SE = 1.34$), $t(213.2) = 5.60$, $p_{\text{bonf}} < .001$. Moreover, during the same time window and at the same cluster, a trend toward more positive-going ERPs for positive recalled ($M = -1.60$, $SE = 1.34$) than neutral recalled pictures was also observed, $t(213.2) = 4.44$, $p_{\text{bonf}} = .09$. Waveforms at frontal, fronto-central, centro-parietal and occipital clusters are plotted in Figure 21. Descriptive statistics are reported in Table 10.

Variables	Mean difference (SE)	$p_{\text{bonferroni}}$	Effect size (Cohen's d) ^b	CI lower ^a	CI upper ^a
Valence x Recall x Window x Cluster					
F W5 Rec: Neg vs. Neu	4.400 (.79)	<.001*	/	0.782	8.017
F W5 Rec: Pos vs. Neu	3.487 (.79)	.09	/	-0.130	7.105

Table 10. Children – Waveforms – *Successful encoding effect*.

^a 95% CI for Mean Difference, ^b Cohen's d does not correct for multiple comparisons. The significant comparisons are indicated by *. F: Frontal; W: Window; Rec: Recalled. For interactions, only significant or trend data are reported.

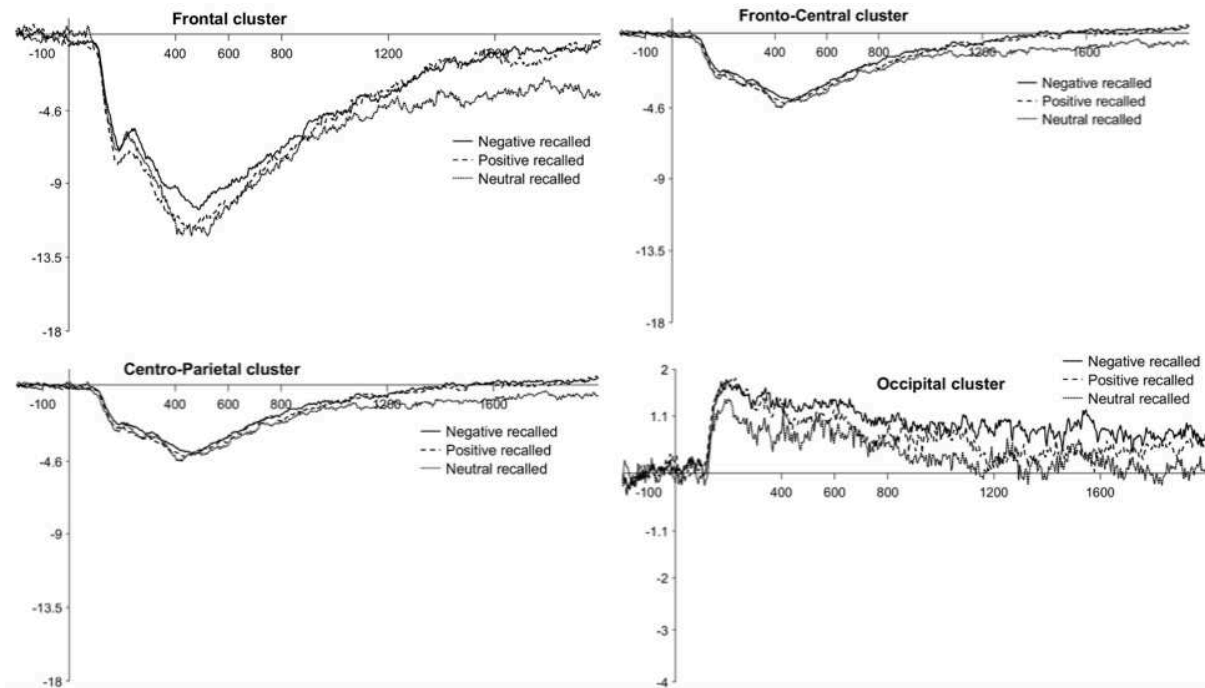


Figure 21. Children's LPP waveforms for the *successful encoding effect* at frontal, fronto-central, centro-parietal and occipital clusters. Negative, positive and neutral conditions are plotted with different continuous or broken lines.

The ANOVA realized separately for adults yielded, after application of the Greenhouse-Geisser sphericity correction, a significant main effect of Recall, $F(1, 25) = 4.24$, $p < .05$, partial $\eta^2 = .15$, with ERPs being more positive-going for recalled pictures ($M = -1.48$, $SE = .21$) than for forgotten pictures ($M = -1.65$, $SE = .21$). However, the Valence \times Recall interaction was not significant, $F(2, 49.88) = 1.59$, $p = .21$, partial $\eta^2 = .06$. All the other interactions including both the factors Valence and Recall were also not significant (all $p > .05$), but a trend emerged for the Valence \times Recall \times Cluster interaction, $F(2.63, 65.69) = 2.33$, $p = .09$, partial $\eta^2 = .09$. Post-hoc comparisons showed that ERPs were more positive-going for positive recalled than for neutral recalled pictures at frontal (Positive: $M = -2.39$, $SE = .29$; Neutral: $M = -3.13$, $SE = .29$), $t(258) = 4.42$, $p_{\text{bonf}} < .004$, and fronto-central (Positive: $M = -1.75$, $SE = .29$; Neutral: $M = -2.61$, $SE = .29$) clusters, $t(258) = 5.13$, $p_{\text{bonf}} < .001$. Waveforms at frontal, fronto-central, centro-parietal and occipital clusters are plotted in Figure 22. Descriptive statistics are reported in Table 11.

Variables	Mean difference (SE)	$p_{\text{bonferroni}}$	Effect size (Cohen's d) ^b	CI lower ^a	CI upper ^a
Recall					
Recalled vs. Forgotten	0.162 (.08)	0.05*	0.404	0.000	0.324
Valence x Recall x Cluster					
F Rec: Pos vs. Neu	0.738 (.17)	.004*	/	0.104	1.373
FC Rec: Pos vs. Neu	0.857 (.17)	<.001*	/	0.222	1.491

Table 11. Adults – Waveforms – *Successful encoding effect*.

^a 95% CI for Mean Difference, ^b Cohen's d does not correct for multiple comparisons. The significant comparisons are indicated by *. F: Frontal; FC: Fronto-Central; Rec: Recalled. For interactions, only significant or trend data are reported.

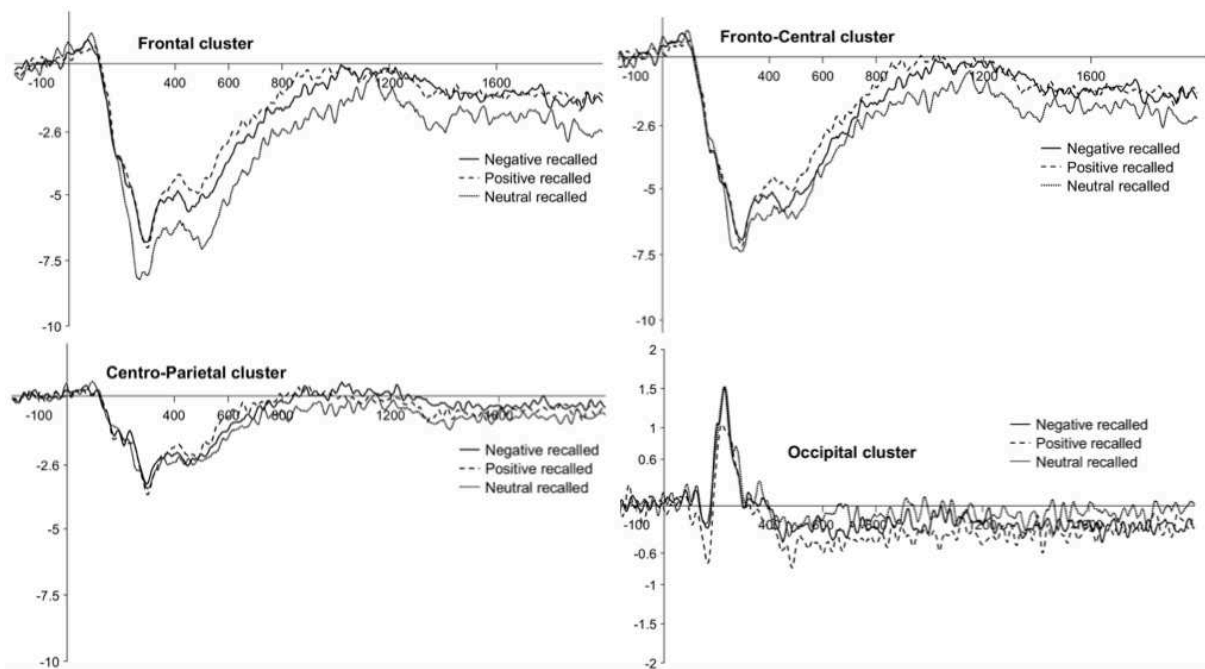


Figure 22. Adults' LPP waveforms for the *successful encoding effect* at frontal, fronto-central, centro-parietal and occipital clusters. Negative, positive and neutral conditions are plotted with different continuous or broken lines.

Dm effect

The global ANOVA showed that the main effect of Group, $F(1, 40) = 1.01$, $p = .32$, partial $\eta^2 = .025$, and the Memory Valence x Group interaction, $F(1.75, 70.07) = .84$, $p = .42$, partial $\eta^2 = .021$, were not significant. All the others interactions were also not significant (all $p > .05$).

6. Discussion

In the present study, we conducted an experiment to investigate the effect of emotions on episodic memory in 8- to 11-year-old children and young adults, using behavioral and ERP measures. To do this, both groups participated in pictures' intentional encoding tasks while ERPs were recorded, followed by immediate free recall tasks.

Behavioral results

First of all, we evaluated behavioral performances in free recall to observe the emergence of a potential EEM in children and adults. According to our prediction, we observed an EEM in both groups with better recall of negative and positive pictures relative to neutral ones. Moreover, a *negativity effect* occurred in children, but not in adults, with negative pictures being recalled even better than positive ones. These results are consistent with other studies that have shown that the emotional content of information enhances episodic memory in children (for a review, see Hamann & Stevens, 2013) and adults (for a review, see Dolcos et al., 2017). The *negativity effect* observed in children is also in line with other studies who showed better memory for negative and positive stimuli with an advantage for negative ones in 5- to 6-year-old (Van Bergen, Wall, & Salmon, 2015) and 8- to 11-year-old children (Massol, Vantaggio, & Chainay, 2020). However, we did not observe a *negativity effect* in recall performances for adults. Nevertheless, this effect is not systematic in the adult literature as it may vary, at least in part, on factors such as the type of stimuli used and/or how relevant they are to one's goals (Kensinger & Schacter, 2008a). Overall, our results also showed better recall performances in adults compared to children, suggesting that episodic memory processes in school-age children are still developing (Ghetti & Lee, 2011). Better performances for the first two blocks compared to the sixth block have also emerged in children. As the blocks were

balanced between the participants, this difference cannot be related to the pictures within the blocks but may be due to the fatigue of children over time, which affects memory performance.

ERP results - emotion effect

We also investigated whether the behavioral performances could be associated with modulations of neural responses during encoding in children and adults. Thus, with regard to the ERP responses, the global analysis showed an *emotion effect* characterized by a greater modulation of the LPP during the encoding of emotional pictures, negative and positive, relative to neutral ones in both groups. Separate analyses of the mean amplitude of the LPP waveforms for children and adults showed that children were particularly sensitive to negative pictures, with a larger LPP for these pictures compared to neutral ones, and adults were sensitive to both positive and negative pictures. Additional analyses showed that children exhibited an *emotion effect* with a more positive amplitude of the LPP especially for negative pictures compared to neutral ones during the W4 and W5 time windows, which is 1200 until 2000ms after the stimulus onset, at the frontal and fronto-central clusters. In adults, however, a greater amplitude of the LPP was observed across all time windows especially for positive pictures relative to neutral ones at the frontal and fronto-central clusters and a tendency was observed at the centro-parietal cluster. Moreover, this *positivity effect* was lateralized in the left hemisphere only. These results are only partly consistent with our predictions that both positive and negative pictures would elicit greater LPP amplitude compared to neutral ones in children and adults.

Concerning the *emotion effect* observed for negative pictures in our study in children, it was also found by Leventon et al. (2014). Notably, the authors highlighted larger LPP responses in 7.5- to 9-year-old children during the encoding of negative than neutral pictures from 800 to 2000ms after stimulus onset, at the posterior cluster. In the same time window but at the frontal and central clusters, children presented larger LPP responses during the encoding of positive pictures compared to neutral ones. Although the timing of the *emotion effect* is consistent between their study and ours, we did not observe this negative/posterior and positive/fronto-central dissociation in our study since only negative pictures elicited larger LPP at anterior clusters in our study. These discrepancies could be due in part to developmental changes that occur at the neural level for emotion processes, as children in our study were in average older than the children in Leventon's et al. study. Indeed, some other ERP studies that have investigated the development of emotion

processes, albeit without memory task (Kujawa et al., 2012, 2013; Pegg et al., 2019), bring some evidences of a shift in the scalp distribution of the LPP from posterior sites in middle childhood to more centro-parietal regions in adolescence (Kujawa et al. 2012, 2013; Pegg et al., 2019). In these studies, both negative and positive pictures were associated with a larger LPP compared to neutral pictures, and negative pictures also elicited larger LPP compared to positive pictures, for all groups of age from 8- to 15-year-old children. However, neither of these studies analyzed frontal sites, although we know that the LPP may be sustained by frontal networks in adulthood (Moratti, Saugar, & Strange, 2011). Therefore, in our study, it is likely that the *emotion effect* observed at frontal sites in 8- to 11-year-old was due to a relatively more advanced development of negative emotions processing. It is noteworthy that this finding cannot be related to the arousal of the pictures which were identical between the negative and positive ones according to normative children ratings of arousal. However, it could be partly due to the greater attentional bias toward negative pictures reported in school-age children (Waters, Lipp, & Spence, 2004 but for a review, see Morales, Fu, & Perez-Edgar, 2016), which can lead to these stimuli being processed more thoroughly during encoding and this, in turn, would enhance their neural responses and their subsequent memorability (for a review, see LaBar & Cabeza, 2006). Another explanation for this *negativity effect* could be that positive stimuli may be less consistent as for the emotion they generate in the participants, which means that some positive pictures may not be perceived as such or less strongly for some participants. Inter-individual differences may account for this lack of effect for positive pictures in ERP responses in our study.

Concerning adults, our results showed a general EEM in free recall performances which was associated with a main effect of valence in ERP results. Thus, greater LPP during the encoding of positive pictures and a trend toward greater LPP during the encoding of negative pictures were observed compared to neutral ones, even though only a *positivity effect* appeared at anterior clusters and in the left hemisphere after more detailed analysis. These ERP results are consistent with an ERP study in which general EEM was observed in free recall in adults associated with a larger LPP during the encoding of positive pictures compared to negative and neutral ones at frontal site, albeit with a general *emotion effect* over parietal site (Dolcos & Cabeza, 2002). Moreover, the authors have also observed a larger LPP for positive pictures in the frontal left hemisphere during the 500-800ms epoch as compared with the right hemisphere. Together with our findings, these results support the lateralized valence discrimination effect (Cunningham, Espinet, DeYoung, & Zelazo, 2005).

From a developmental perspective, our study revealed some discrepancies between children and adults concerning the lateralization and the occurrence of the *emotion effect*. Indeed, this effect was lateralized in the left hemisphere for adults while there was no difference between the hemispheres for the children, and occurred throughout the presentation of the stimulus for adults and only during the late time windows, from 1200 to 2000ms after stimulus onset, for children. These differences between children and adults suggest that emotion processes are still developing in school-age children (Casey, Heller, Gee, & Cohen, 2019). Moreover, direct comparisons between children and adults showed different neural responses to pictures (emotional and neutral) between the two groups for the first time windows (from 400 to 1200ms) and at the anterior clusters, but not for the last time windows (from 1200 to 2000ms) and at the posterior clusters. These findings may be related to the immaturity of some cognitive processes in children, such as the speed and/or efficiency of encoding (Luna et al., 2004), as well as the progressive development of the frontal cortex into adulthood that partly supports these processes (e.g., Gogtay, Giedd, Lusk et al., 2004).

ERP results – Successful encoding and Dm effects

In order to investigate the neural correlates underlying emotional memory in children and adults, we analyzed the ERP responses during the successful encoding of pictures (i.e. pictures that were later recalled). The global analysis showed that both groups had a more positive amplitude of the LPP for subsequently recalled than for forgotten pictures overall, mostly at the frontal and fronto-central clusters. These findings are consistent with some studies that showed that the amount of activity in the prefrontal cortex (PFC) during encoding relates to the likelihood that information is later remembered, in relation to controlled encoding processes (for a review, see Paller & Wagner, 2002). Specifically, separate analyses for both groups showed that children exhibited greater LPP for negative recalled than for neutral recalled pictures, and a trend toward greater LPP for positive recalled than for neutral recalled pictures, during the W5 time window at frontal cluster. These ERP responses are consistent with the subsequent EEM obtained in free recall performances in children, suggesting that neural responses during encoding can predict behavioral outcomes. Therefore, the later-emerging attentional processes at anterior sites might be most closely implicated in the interaction between emotion processes and episodic memory in children as seen with the late emergence of the LPP for successful encoding of emotional pictures. These findings

suggest that the involvement of cognitive factors during encoding, such as attentional processes, may support the EEM in children in the same way as in adults. This provides preliminary evidence for the relevance of the cognitive mediation hypothesis in individuals still in a period of development.

The group of adults, however, had a greater LPP for positive recalled than neutral recalled pictures at frontal and fronto-central clusters, across all time windows, although a general EEM was observed in their free recall performances. These results are consistent with a study that showed greater engagement of the PFC in the encoding of information with positive rather than negative valence in adults (Ritchey, LaBar, & Cabeza, 2011).

Although the ERP responses for the successful encoding of pictures were modulated by emotions in children and adults, the *Dm effect*, however, was not significantly different between all the conditions (negative, positive, neutral) and between the two groups of participants. Therefore, these findings do not allow us to validate our hypothesis that children and adults would experience a larger *Dm effect* for emotional compared to neutral pictures. Yet, this effect has been already investigated with emotional pictures in adults (Dolcos & Cabeza, 2002) and the authors have shown larger *Dm effect* for negative and positive pictures compared to neutral ones during the 400-600ms time window, and maximal at midline central electrode. Unfortunately, to our knowledge, this effect has never been investigated with emotional pictures in children. Nevertheless, some ERP studies of memory without emotional stimuli have investigated this effect in both adults and children to identify potential developmental differences in the ERP responses associated with memory processes. Specifically, Rollins & Riggins (2018) have shown that the *Dm effect* was comparable among 6- to 8-year-old children, 12- to 13-year-old adolescents and young adults, during the 700-900ms time window at frontal, central and parietal sites. Therefore, this study shows that not only can the *Dm effect* be measured in children, but that the neural responses related to memory encoding are already well developed in children, as they are similar to those of adults. Hence, further studies are needed to investigate the *Dm effect* with emotional stimuli in children, in order to learn more about the changes in the neural correlates supporting emotional memory in this population.

Conclusion and Limitations

The present study compared, for the first time, the emotional enhancement of memory between school-age children and adults, on both behavioral and physiological level, and brought out some similarities between the two groups. Indeed, both groups had better episodic memory for negative and positive pictures compared to neutral ones, with an advantage for negative over positive pictures for children only. The ERP responses, recorded during the encoding of pictures, showed that the *emotion effect* was localized mainly at the frontal and fronto-central clusters in children and adults, although it was more of a *negativity effect* for children and a *positivity effect* for adults. Moreover, the *emotion effect* occurred throughout the presentation of the stimulus for adults and only during the late time windows, from 1200 to 2000ms after stimulus onset, for children. Further analyses showed that these *negativity effect* in children and *positivity effect* in adults were especially apparent during the successful encoding of pictures. Indeed, larger neural responses were observed for the successful encoding of negative pictures in children and positive pictures in adults, compared to neutral ones, at anterior sites. Moreover, this effect was also delayed in children, as it appeared only during the late time window, from 1600 to 2000ms, compared with adults for whom the effect was present for all time windows. Taken together, these findings suggest that the interaction between emotional and memory systems has already been established in 8- to 11-year-old children, as observed in free recall performances and ERP responses, although some discrepancies between the two groups in ERP responses indicate that the neural correlates underlying EEM in children don't seem mature at this stage of development. Moreover, these findings provide a direct connection between the effect of emotions on memory observed in behavioral performance, and the greater attentional engagement toward emotional stimuli during encoding reflected by the modulation of the LPP, both in children and adults. Therefore, this study brings first evidence of the relevance of the cognitive mediation hypothesis in children, and deserves to be further explored in future research. Unfortunately, since the analysis of the *Dm effect* was not significant, further research are necessary to address the issue, perhaps by increasing the number of participants, the number of stimuli presented and/or by making groups with a smaller age range.

Our study presents some limitations. One of them was the reduced amplitude of the EEG signal observed at posterior electrodes (parietal and occipital) in some of the participants. This may be responsible for a lack of effect on the posterior clusters in children and adults. In addition, participants were asked to indicate whether they saw a human face in the pictures during encoding.

Although some studies have shown greater LPP for emotional faces compared to neutrals in children (Bunford, Kujawa, Fitzgerald, et al., 2018) and adults (Hajcak et al., 2012), it is possible that this task may have changed how participants process the emotional content of the pictures and hence, their neural responses to emotions. Moreover, there was a gender imbalance in our participant groups. As one study showed that gender could potentially affect the neural processing of emotions in children (Solomon et al. 2012), future research should consider the role that gender can play in the neural responses associated with the EEM in children. Finally, more studies are needed to further investigate the EEM using multiple measures and different age groups of children in order to better understand the effect of emotions on episodic memory throughout the development, and make a stronger connection with the real-world experiences of emotion.

Acknowledgements:

We warmly thank the children and their family, as well as the young adults for their participations in this research. We also thank the researchers I. Cordon, A. Melinder, G. Goodman and R. Edelstein for sharing their DAPS database. We also gratefully thank Joel Brogniart for his help in implementing the experiment, Laura Bon for her help in setting up the EEG working environment and her guidance within the Psychosocial rehabilitation center, as well as Dr. Anne Caclin for her advice on ERP data analysis.

This study received funding from a partnership between the Centre Hospitalier Le Vinatier and the University of Lyon 2.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Appendix:

DAPS database	Children			Adults		
	Valence ^a	Arousal ^a	Complexity ^b	Valence ^a	Arousal ^a	Complexity ^b
Pictures						
Negative	3.21 (.34)	6.12 (.90)	2.53 (.53)	3.21 (.28)	5.92 (.43)	2.57 (.52)
Positive	7.41 (.42)	6.19 (.71)	2.47 (.52)	7.04 (.34)	5.77 (.41)	2.41 (.63)
Neutral	5.93 (.42)	3.86 (.52)	2.38 (.47)	5.62 (.39)	3.61 (.55)	2.28 (.47)

Table 12. Mean ratings of emotional valence, arousal and visual complexity of pictures from the DAPS database, for children and adults. Standard deviations are in parentheses.

^aValence and arousal are rated on a scale from 1 (very negative/not arousing at all) to 9 (very positive/highly arousing)

^bVisual complexity is rated on a scale from 1 (very simple) to 4 (very complex)

7. Conclusion

Nous avons présenté, ci-dessus, l'Étude 2 de ce travail de thèse qui s'est intéressée aux corrélats neuronaux associés à l'EEM chez un groupe d'enfants âgés de 8 à 11 ans, en comparaison avec un groupe de jeunes adultes. Pour cela, les réponses neuronales associées au traitement des émotions et à l'EEM durant l'encodage d'images ont été analysées grâce à la technique des PE (mesures du LPP et de l'effet Dm). L'EEM était mesuré au niveau comportemental par les performances en rappel libre des images dans les deux groupes. L'objectif de cette étude était d'apporter des connaissances supplémentaires sur les mécanismes cognitifs mis en jeu lors de l'encodage, notamment les processus attentionnels, pouvant sous-tendre l'émergence d'un EEM chez les enfants. Tout d'abord, cette deuxième étude a confirmé les résultats comportementaux obtenus dans l'Étude 1, c'est-à-dire la présence d'un EEM chez des enfants âgés de 8 à 11 ans pour des tâches de rappel libre d'images. En revanche, dans cette étude, les résultats variaient selon le groupe de participants puisque les enfants et les jeunes adultes présentaient un EEM général en mémoire, associé à un effet de *négativité* uniquement pour le groupe d'enfants. De plus, le LPP était modulé par les émotions dans les deux groupes de participants, et également lors de l'encodage efficace des images émotionnelles, en accord avec l'EEM observé au niveau comportemental dans les tâches de rappel en mémoire. Ces résultats ont donc apporté des premiers indices concernant le rôle potentiel de l'attention (reflété par la modulation du LPP) dans l'encodage de stimuli émotionnels, sous-tendant l'émergence de l'EEM au niveau comportemental chez l'enfant. Pour finir, il semblerait que l'interaction entre les systèmes mnésique et émotionnel soit déjà établie chez les enfants à partir de 8 ans, comme observé au niveau comportemental et neuronal dans cette étude. En revanche, certaines différences observées entre les deux groupes au niveau des réponses neuronales associées aux images émotionnelles et à l'encodage efficace de ces images, suggèrent que les bases cérébrales sous-tendant l'EEM ne sont pas encore matures chez les enfants de cet âge.

Chapitre 3.

Discussion de la première partie.

Les deux études réalisées dans la première partie de ce travail de thèse ont permis de valider chez une population en cours de développement certaines observations présentes dans la littérature sur l'EEM chez l'adulte. Les résultats de ces études ayant été interprétés et discutés de façon détaillée dans l'Article 1 (Partie 1, Chapitre 2, sous-chapitre I) et l'Article 2 (Partie 1, Chapitre 2, sous-chapitre II), nous ne reviendrons pas sur les aspects déjà évoqués afin d'éviter des redondances. Nous allons, par conséquent, majoritairement nous concentrer sur les interprétations communes aux deux études, les apports théoriques de ces études à la lumière de la littérature existante chez l'adulte et chez l'enfant ainsi que les questionnements encore en suspens. De ces questionnements va notamment émerger le deuxième objectif de ce travail de thèse qui abordera l'EEM avec une approche neuropsychologique, auprès d'enfants et d'adolescents présentant un trouble neuro-développemental appelé syndrome de Williams-Beuren.

La première étude de ce travail de thèse a démontré que les émotions avaient un effet bénéfique sur les deux composants de la mémoire épisodique qui sont la mémoire de l'item et la mémoire associative, chez des enfants âgés entre 8 et 11 ans, et ceci de façon similaire à des jeunes adultes. Ces résultats ont ainsi confirmé des observations déjà présentes dans la littérature chez l'enfant, à savoir la présence d'un EEM en mémoire de l'item (pour une revue, voir Hamann & Stevens, 2013), mais ont aussi apporté, pour la première fois, des connaissances sur l'émergence de l'EEM en mémoire associative chez l'enfant. En effet, nos résultats montrent que l'effet des émotions observé en mémoire de l'item peut s'étendre également à la mémoire associative et engendrer ainsi une meilleure mémorisation de l'ensemble de l'événement épisodique, comprenant l'élément central émotionnel et les détails contextuels qui lui sont associés. L'effet des émotions sur la mémoire associative avait déjà été observé dans la littérature chez les jeunes adultes (pour des revues, voir Mather, 2007 et Kensinger, 2009), mais n'avait encore jamais fait l'objet d'étude de laboratoire chez des individus en cours de développement. Cette étude a donc permis de renforcer davantage

les liens entre la littérature existante sur l'EEM chez l'adulte et les observations chez l'enfant, et également d'étendre les connaissances sur les mécanismes sous-tendant l'EEM et son développement. Par ailleurs, l'utilisation d'une méthodologie variée avec la présentation de deux types de stimuli (images et mots) associés à diverses informations contextuelles (visuelles, auditivo-verbales et visuo-spatiales) a permis d'avoir une représentation plus globale des spécificités de l'EEM, ce qui est primordial pour accroître les connaissances sur ce phénomène chez l'enfant. En effet, la littérature sur l'EEM chez l'enfant est limitée et l'émergence et les spécificités de ce phénomène peuvent notamment être sensibles aux conditions méthodologiques (pour des études n'ayant pas démontré la présence d'un EEM chez les enfants, voir Howe et al., 2010 ; Leventon et al., 2014 et Peterson et al., 1996).

Outre les preuves de l'émergence d'un EEM révélées au niveau comportemental chez les enfants dans la première étude de ce travail de thèse, la deuxième étude a permis de mettre en évidence l'existence de modulations neuronales lors de l'encodage d'images chez l'enfant, pouvant prédire les résultats comportementaux dans les tâches de rappel en mémoire. Ceci a pu être réalisé grâce à la technique de l'EEG, et plus précisément par la mesure de la modulation du potentiel LPP durant l'encodage d'images. L'efficacité de cette mesure avait déjà été soulignée dans des études réalisées chez l'adulte, qui avaient démontré une augmentation de l'effet Dm pour les stimuli émotionnels comparativement aux stimuli neutres, reflétant une amplitude du LPP plus importante lors de l'encodage efficace des stimuli émotionnels (e.g., Dolcos & Cabeza, 2002). Notre étude offre, pour la première fois, une évaluation des corrélats neuronaux sous-tendant l'EEM durant le processus d'encodage chez l'enfant, et souligne ainsi la pertinence de l'utilisation de mesures neurophysiologiques pour évaluer l'EEM au cours du développement. Par ailleurs, cette étude apporte également des premiers indices sur les mécanismes cognitifs sous-tendant l'EEM chez l'enfant. En effet, à ce jour, les seuls modèles théoriques développés dans la littérature sur l'EEM se sont concentrés sur la population adulte et ne donnent, par conséquent, aucune connaissance concernant les individus en cours de développement. Notamment, le modèle de la médiation cognitive décrit par Talmi (2013) souligne que plusieurs facteurs cognitifs, dont l'attention, faciliteraient les processus d'encodage des informations émotionnelles. Ainsi, les stimuli émotionnels captureraient davantage les ressources attentionnelles durant l'encodage, entraînant une priorisation de leur traitement comparativement à des stimuli neutres (pour des revues, voir Okon-Singer et al., 2013 et Pourtois et al., 2013), facilitant finalement l'émergence d'un EEM.

Cette capture attentionnelle par les stimuli émotionnels lors de l'encodage peut être mesurée physiologiquement par la modulation du potentiel LPP qui a été décrit dans la littérature comme un marqueur neuronal de l'engagement attentionnel (pour des revues, voir Schupp et al., 2006 ; Olofsson et al., 2008 et Hajcak et al., 2010). Par conséquent, pour cette deuxième étude, le choix que nous avons fait d'analyser le potentiel LPP durant l'encodage d'images émotionnelles et neutres chez les enfants, conjointement à l'évaluation de l'EEM au niveau comportemental, nous permettait d'avoir des preuves physiologiques du rôle de l'attention dans l'émergence d'un EEM chez l'enfant. Il est, ainsi, apparu que la présentation des images négatives entraînait une augmentation de l'amplitude du LPP lors de la phase d'encodage comparativement aux images neutres chez les enfants âgés de 8 à 11 ans, et en particulier, que le LPP était augmenté lors de l'encodage efficace des images négatives et positives, comparativement aux neutres. Ces modulations neuronales étaient visibles au niveau antérieur du cerveau, majoritairement frontal, et durant les fenêtres temporelles tardives d'apparition de l'image, à partir de 1200ms. Par ailleurs, ces modulations neuronales étaient associées à un meilleur rappel ultérieur des images négatives et positives comparativement aux neutres chez les enfants, avec également un avantage des images négatives par rapport aux images positives. Il semblerait donc que, dans notre étude, la modulation du LPP durant la phase d'encodage était prédictive de l'EEM comportemental chez les enfants. Si nous extrapolons ces résultats dans la perspective du modèle de la médiation cognitive, il se pourrait que l'attention dirigée vers les stimuli émotionnels durant l'encodage, joue un rôle dans l'émergence de l'EEM chez l'enfant, au même titre que chez l'adulte. D'autres études sont nécessaires pour confirmer ces observations, avec notamment l'utilisation de paradigmes expérimentaux similaires à ceux utilisés dans la littérature chez l'adulte (paradigmes d'attention pleine ou divisée, utilisation de listes « pures » de stimuli qui ne présentent qu'une catégorie de valence etc.), afin de pouvoir prouver l'applicabilité de ce modèle pour des individus en cours de développement. En outre, si nous nous plaçons à présent dans une perspective neuro-anatomique, bien que la technique d'EEG ne nous permette pas d'identifier avec précision les structures cérébrales impliquées dans l'EEM, cette étude indique qu'il pourrait être en partie sous-tendu par la région frontale, à la fois chez l'enfant et chez l'adulte. Ceci est en accord avec les études ayant souligné le rôle important de la région frontale chez l'adulte dans la mise en place de traitements cognitifs de haut niveau (modulation *top-down* de l'attention, élaboration de liens sémantiques inter-stimuli etc.), censés renforcer les processus d'encodage (Friedman & Johnson, 2000 ; Paller & Wagner, 2002 ; Dolcos, Jordan, & Dolcos, 2011). En revanche, l'apparition plus tardive de la modulation du LPP au niveau

des régions antérieures chez les enfants comparativement au groupe d'adultes pour lequel la modulation était observée pour toutes les fenêtres temporelles, pourrait soit refléter la manipulation et le maintien de l'information en mémoire de travail comme cela peut être le cas chez l'adulte dans certaines études (Mangels, Picton, & Craik, 2001), soit refléter une immaturité de certains processus cognitifs qui entraînent un encodage plus lent et/ou moins efficient chez les enfants (Luna, Garver, Urban, Lazar, & Sweeney, 2004). Cette dernière hypothèse est en accord avec le développement lent et progressif que connaît la région frontale jusqu'à la fin de l'adolescence (Gogtay, Giedd, Lusk, et al., 2004), pouvant indiquer une différence de maturité cérébrale au niveau frontal entre les deux groupes. Pour finir, ce que nous pouvons retenir de cette étude, c'est qu'il semblerait que les enfants se soient appuyés sur des facteurs cognitifs, sous-tendus par la région frontale, similaires à la population adulte pour encoder des informations en mémoire et favoriser l'apparition de l'EEM.

Dans l'ensemble, ces deux études ont permis d'apporter des connaissances supplémentaires sur les spécificités de l'EEM chez les enfants, à la fois au niveau comportemental et neurophysiologique. En particulier, ces deux études soulignent l'influence différentielle de la valence émotionnelle sur la mémoire épisodique chez les enfants. En effet, à travers les différentes expériences de ces études, les stimuli négatifs et positifs étaient majoritairement mieux mémorisés que les stimuli neutres (EEM général), néanmoins, l'influence des stimuli négatifs sur la mémoire était plus importante que celle des stimuli positifs dans la plupart des tâches (effet de *négativité*). Cet effet de *négativité* associé à un EEM général était également observé dans le groupe des jeunes adultes mais de façon moins systématique. Si l'effet de *négativité* en mémoire a déjà été largement investigué chez l'adulte (pour des revues voir, Baumeister et al., 2001 ; Norris, 2019), peu d'études chez l'enfant ont inclus les deux catégories de stimuli émotionnels (négatifs et positifs) dans des tâches de mémoire, rendant difficile l'observation d'un biais potentiel en mémoire. L'apparition quasiment systématique d'un effet de *négativité* en mémoire dans nos études avec l'utilisation de plusieurs types de stimuli (images et mots) et paradigmes expérimentaux ainsi que l'inclusion de trois groupes d'enfants différents, nous permet d'envisager raisonnablement la présence d'un biais de *négativité* en mémoire chez les enfants. Il est important de noter que ce biais ne pouvait pas être dû à des différences de niveau d'arousal entre les deux catégories de stimuli émotionnels dans notre étude puisque nous nous étions assurées statistiquement de l'équivalence du niveau d'arousal entre les stimuli négatifs et positifs, dont les évaluations provenaient de banques de données pré-testées chez les enfants. Cet

effet de *négativité* en mémoire peut provenir d'un biais attentionnel envers les stimuli négatifs ou menaçants observé relativement tôt au cours du développement (pour une revue, voir Morales et al., 2016). Ces auteurs ont créé un modèle développemental qui stipule qu'un biais attentionnel vers les stimuli menaçants émergerait précocement chez les enfants et serait modulé par des différences interindividuelles associées à des facteurs culturels et environnementaux. Avec l'âge et le développement, les enfants seraient ensuite capables de réguler ce biais attentionnel précoce en lien avec leur environnement, notamment le rôle parental, les relations interpersonnelles (e.g., les relations avec leurs pairs) et l'environnement non familial (e.g., l'école). Pour la plupart des enfants, ces biais précoces favoriseraient des comportements d'approche et d'évitement qui sont nécessaires à un développement socio-émotionnel normal. En revanche, pour une partie des enfants à risque de développer des psychopathologies, ces biais pourraient entraîner une mauvaise adaptation dès l'enfance et jusqu'à l'âge adulte, qui concourrait finalement à renforcer ce risque. Nos résultats pourraient, ainsi, être expliqués par un biais attentionnel envers les stimuli négatifs présent chez les enfants qui, à cet âge, n'auraient pas les capacités de réguler efficacement leurs émotions dû au développement lent et progressif jusqu'à la fin de l'adolescence des régions cérébrales sous-tendant cette régulation (pour une revue, voir Casey et al., 2019). Ce biais attentionnel se traduirait par un meilleur encodage de ces stimuli (pour une revue, voir Hamann, 2001), résultant finalement en un effet de *négativité* en mémoire. La deuxième étude de ce travail de thèse apporte des arguments supplémentaires à ce biais attentionnel envers les stimuli négatifs chez les enfants puisque l'analyse des réponses neuronales associées à l'effet des émotions (*emotion effect*) indique une augmentation du LPP lors de la présentation des images négatives, et non positives, comparativement aux images neutres dans cette population. Or, nous avons vu que le LPP pouvait être considéré comme un marqueur physiologique de l'engagement attentionnel. Il convient, néanmoins, de souligner que même si un effet de *négativité* était fréquemment observé dans les différentes tâches de mémoire chez les enfants, les stimuli positifs étaient également mieux mémorisés que les stimuli neutres, suggérant en outre un impact de la valence positive sur la mémoire épisodique des enfants.

Si nous interprétons désormais nos résultats dans une perspective mnésique, à la lumière du modèle *Dual-Process Signal Detection* (Yonelinas, 1994), nos études donnent des premiers indices concernant le rôle du processus de recollection et de familiarité dans l'émergence de l'EEM chez l'enfant. Pour rappel, le processus de recollection reflète le souvenir conscient et vivace d'un événement, composé de détails contextuels de l'épisode d'encodage, tandis que le processus de

familiarité fait référence à un sentiment de « déjà-vu », sans détails contextuels associés au souvenir. Les tâches proposées aux participants dans nos études, à savoir les tâches de rappel libre et de mémoire associative, engageaient principalement le processus de recollection afin de pouvoir récupérer efficacement l'information en mémoire, ainsi que le contexte qui lui été associé dans le cas de la mémoire associative. Il apparaît ainsi que les stimuli émotionnels, négatifs et positifs, aient une influence sur ce processus de recollection à la fois chez les adultes et chez les enfants. Ceci est en accord avec des études réalisées en neuro-imagerie chez l'adulte, qui ont démontré une plus grande activité de l'amygdale lors de la récupération des stimuli émotionnels basée sur le processus de recollection (Dolcos, LaBar, & Cabeza, 2005), ainsi que la modulation émotionnelle d'un composant électro-physiologique au niveau de la région pariétale gauche associé au processus de recollection lors d'une tâche de reconnaissance (Weymar et al., 2011). De nombreuses études ont souligné le rôle majeur de l'hippocampe et des régions corticales telles que le CPF et le CPP dans le processus de recollection (pour une revue, voir Ekstrom & Yonelinas, 2020). L'hippocampe aurait un rôle spécifique dans l'association de l'item avec les informations liées à son contexte de présentation et permettrait, ainsi, d'avoir une représentation mnésique de l'événement dans sa globalité (Diana et al., 2007 ; Yonelinas et al., 2019). Bien que la récupération du souvenir basée sur le processus de recollection ne soit pas pleinement mature chez les enfants (pour une revue démontrant le développement lent et progressif de ce processus jusqu'à l'âge adulte, voir Alibran et al. 2018), il semblerait néanmoins que ce processus soit déjà modulé par les émotions chez les enfants âgés entre 8 et 11 ans. Nos observations pourraient ainsi refléter une interaction relativement précoce au cours du développement entre les régions cérébrales sous-tendant le processus de recollection, notamment l'hippocampe, le CPF et le CPP, et les régions sous-tendant le traitement émotionnel, particulièrement l'amygdale. Si certaines études en neuro-imagerie tendent à montrer que les adolescents sollicitent des régions cérébrales similaires à celles des adultes lors de l'encodage efficace de stimuli émotionnels, principalement la région para-hippocampique et l'amygdale (Krauel et al., 2007 ; Vasa et al., 2011), de futures études sont, cependant, nécessaires pour évaluer les bases et mécanismes neurobiologiques de l'EEM chez les enfants, afin de confirmer nos hypothèses. En revanche, les résultats obtenus dans nos études ne donnent aucune indication concernant l'effet des émotions sur le processus de familiarité chez les enfants. Le processus de familiarité peut notamment être impliqué dans des tâches de reconnaissance de stimuli. Or, dans l'Étude 1, les enfants et les adultes n'ont pas présenté d'EEM pour les tâches de reconnaissance d'images et de mots, principalement dû à des performances trop importantes dans les deux groupes.

De futures recherches sont donc nécessaires pour analyser de façon plus approfondie l'effet des émotions sur le processus de familiarité au cours du développement.

Les études présentées dans la première partie de ce travail de thèse ont donc permis d'acquérir des connaissances supplémentaires sur l'EEM durant le développement typique, en lien avec les études déjà réalisées chez l'adulte qui constituent une littérature importante. Des premiers indices concernant les mécanismes cognitifs sous-tendant l'EEM chez les enfants ont ainsi pu être exposés, notamment le rôle potentiel des processus attentionnels lors de l'encodage, mais également le rôle du processus de recollection par lequel l'EEM peut émerger. De futures études sont néanmoins nécessaires pour confirmer les rôles de ces processus dans l'EEM chez l'enfant et également pour investiguer l'implication d'autres mécanismes cognitifs et neurobiologiques, à la lumière des modèles théoriques déjà existants. En effet, l'implication des facteurs cognitifs relatifs à l'organisation sémantique et à la *distinctivité*, acteurs dans le modèle de la médiation cognitive, restent encore à établir dans le développement. Notamment, est-ce que le fait que les stimuli émotionnels soient plus distinctifs et partagent des liens sémantiques qui entraînent leur meilleure organisation conceptuelle, joue un rôle dans l'apparition de l'EEM chez l'enfant ? De même, si des premières études tendent à identifier le rôle de l'amygdale et de l'hippocampe lors de l'encodage de stimuli émotionnels chez les adolescents (Krauel et al., 2007 ; Vasa et al., 2011), les bases neurobiologiques sous-tendant l'EEM dans le développement restent encore à investiguer.

Pour finir, certaines études soulignent l'importance d'étudier les différences interindividuelles dans l'émergence de l'EEM. En effet, suivant les individus, les mécanismes cognitifs et neuronaux impliqués dans l'EEM peuvent varier, à la fois au sein de la population normotypique mais également chez des individus présentant des troubles émotionnels (anxiété, dépression, stress post-traumatique etc.). Ainsi, l'étude des facteurs responsables de cette variation dispose d'un statut privilégié pour mieux comprendre les mécanismes sous-jacents à l'EEM, à la fois chez les adultes et chez les enfants. Par exemple, des études réalisées chez l'adulte montrent que les traits de personnalité tels que l'extraversion, le neuroticisme et l'anxiété, seraient responsables de la modulation de processus liés à la perception, l'attention, la réponse émotionnelle et la mémoire (pour une revue, voir Dolcos et al., 2017). En effet, l'extraversion serait plutôt associée à un biais de *positivité* en mémoire (Haas & Canli, 2008) tandis que le neuroticisme et l'anxiété seraient associés à une meilleure récupération en mémoire de stimuli négatifs (Bradley et Mogg, 1994 ;

Russo, Whittuck, Roberson et al., 2006). Par ailleurs, il semblerait que les biais émotionnels associés à ces traits de personnalité soient liés à la réactivité spécifique de l'amygdale pour les stimuli positifs ou négatifs durant l'encodage (pour une revue, voir Haas & Canli, 2008). En outre, les individus présentant des troubles émotionnels tels que les troubles anxieux ou dépressifs présenteraient également des biais dans le traitement et la mémorisation de stimuli négatifs (pour des revues, voir Mathews & MacLeod, 2005 et Gotlib & Joormann, 2010). Chez l'enfant, des premières preuves semblent également montrer une modulation de l'EEM relative aux traits de personnalités et à la présence de troubles émotionnels, mais très peu d'études sont disponibles à ce jour. Notamment, il apparaît qu'il y aurait chez les enfants une modulation possible des processus mnésiques liée à l'humeur (Christodoulou & Burke, 2016), aux symptômes dépressifs (Bishop, Dalgleish, & Yule, 2004) et aux symptômes associés à un stress post-traumatique (Moradi, Taghavi, Neshat-Doost, Yule, & Dalgleish, 2000). Une étude approfondie des altérations des mécanismes émotionnels et mnésiques présentes dans certaines conditions cliniques semble donc importante pour mieux appréhender les mécanismes sous-jacents à l'EEM au cours du développement. Ainsi, la deuxième partie de ce travail de thèse s'est penchée sur l'étude de l'EEM chez des enfants et adolescents porteurs d'un trouble neuro-développemental appelé syndrome de Williams-Beuren. Les dysfonctionnements émotionnels et mnésiques observés dans le syndrome font de cette pathologie un sujet d'étude privilégié afin d'avoir une meilleure compréhension du développement des mécanismes cognitifs sous-tendant l'EEM, et de leur éventuelle modulation lors du développement atypique. La deuxième partie de ce travail de thèse s'attachera donc, dans un premier temps, à décrire le phénotype clinique du syndrome de Williams-Beuren et les anomalies neuro-anatomiques qui lui sont associées, ainsi que les études réalisées dans le domaine de la mémoire et du traitement des émotions dans cette population. La description de ces études permettra ainsi de mettre en exergue les spécificités et déficits relatifs à ces domaines dans le syndrome. Jusqu'à présent, aucune étude n'avait été réalisée, à notre connaissance, sur l'effet des émotions sur la mémoire dans cette population. Les aspects théoriques et résultats expérimentaux concernant l'EEM que nous avons décrits dans la première partie de ce travail de recherche ainsi que les spécificités relatives au syndrome, nous permettront de faire des prédictions concernant l'apparition éventuelle d'un EEM dans cette population. Nous décrivons par la suite les trois expériences réalisées dans ce travail de thèse afin de tester ces prédictions, puis nous finirons par discuter des résultats obtenus et des apports théoriques qui auront été dégagés dans le développement typique et atypique. Outre les connaissances que peut nous apporter cette étude concernant les mécanismes sous-jacents à l'EEM,

nous espérons que les résultats obtenus dans la deuxième partie de ce travail de thèse puissent permettre de mieux déterminer les mécanismes cognitifs et neuronaux qui sont altérés ou préservés dans le syndrome de Williams-Beuren, afin d'identifier des nouvelles pistes thérapeutiques.

Partie 2.

L'effet des émotions sur la
mémoire épisodique dans le
syndrome de Williams-Beuren.

Chapitre 1.

Cadre théorique.

I. Généralités et phénotype clinique du syndrome

Le syndrome de Williams-Beuren (SWB) est un trouble neuro-développemental décrit initialement et indépendamment par deux cardiologues, Dr. Williams (Williams, Barratt-Boyes, & Lowe, 1961) et Dr. Beuren (Beuren, Apitz, & Harmjanz, 1962). Cette affection est causée par la délétion sporadique de 26 à 28 gènes, dont le mieux connu est celui codant pour l'élastine, dans la région 7q11.23 du chromosome 7 (Ewart, Morris, Atkinson, et al., 1993). Le diagnostic est confirmé biologiquement grâce à l'analyse FISH (*fluorescent in situ hybridization*) ou par des techniques de cytogénétique moléculaire, telle que l'hybridation génomique comparative en haute résolution par puces à ADN (CGH-array). Le SWB est considérée comme une maladie rare puisque sa prévalence est estimée entre une naissance sur 7500 et une naissance sur 20000, indépendamment du sexe et des origines géographiques. Il est caractérisé par une atteinte multi-systémique associant des anomalies cardiovasculaires, endocriniennes et au niveau du tissu conjonctif, un retard de croissance, une dysmorphie faciale avec des traits du visage caractéristiques (voir Figure 23) ainsi qu'une déficience intellectuelle de légère à modérée. Au niveau comportemental, les personnes atteintes du SWB sont souvent présentées comme très empathiques avec une forte appétence sociale, les rendant très amicales. Paradoxalement, elles présentent également de nombreuses difficultés interpersonnelles et sociales, notamment dans la création et le maintien de liens sociaux durables. Leur profil neuropsychologique unique, caractérisé par un développement atypique dans les domaines cognitif, émotionnel et social, a suscité l'intérêt des chercheurs depuis les vingt-cinq dernières années. En particulier, ce syndrome dispose d'un profil cognitif hétérogène avec de bonnes capacités relatives à la production du langage (malgré une acquisition tardive) et à la reconnaissance des visages, et des faiblesses plus importantes retrouvées au niveau des compétences visuo-spatiales, du traitement sensorimoteur et des fonctions exécutives. Par ailleurs, sur le plan

psychiatrique, le SWB est souvent associé à des déficits attentionnels, de l'hyperactivité, de l'anxiété, des phobies spécifiques et des syndromes anxio-dépressifs. Des traits qualifiés d'autistiques peuvent également apparaître tels que des intérêts restreints et des comportements répétitifs (pour des revues, voir Lacroix, Pezet, Capel, et al., 2009 ; Royston, Waite, & Howlin, 2019 et Monin, Sanlaville, Rossi, 2019).



Figure 23. Photographie présentant les caractéristiques faciales d'un enfant porteur du SWB créée grâce à la composition graphique de 12 photographies d'enfants.

Tirée de Frigerio, Burt, Gagliardi, Cioffi, Martelli, Perrett, & Borgatti, 2006.

II. Anomalies neuro-anatomiques générales

Depuis plusieurs années, de nombreux chercheurs se sont intéressés au profil neuro-anatomique du SWB, associé à ses caractéristiques cognitives et comportementales. En effet, il est de plus en plus connu que les personnes atteintes du SWB présentent des changements neuro-anatomiques au niveau global et régional par rapport à la population typique. En particulier, elles présenteraient une réduction du volume du cerveau entier, avec une réduction plus importante de la matière blanche par rapport à la matière grise. De plus, la réduction du volume toucherait surtout les régions postérieures du cerveau comparativement aux régions frontales (Reiss, Eliez, Schmitt, et al., 2000 ; Reiss, Eckert, Rose, et al., 2004). De façon plus précise, Fan, Brown, Bartsch, et al. (2017) ont notamment relevé des anomalies structurales au niveau des cortex orbitofrontal et pariétal supérieur, du sillon latéral (ou scissure de Sylvius) ainsi que des réductions disproportionnées des ganglions de la base (noyaux putamen et accumbens), à la fois dans des groupes d'enfants et d'adultes. La variabilité structurale de ces régions était notamment liée à la taille de la micro-délétion constitutive du SWB, sous-tendant l'atteinte cognitive globale ainsi que les aspects comportementaux associés à l'hyper-sociabilité. D'autres études indiquent un volume relativement préservé de la région frontale, temporale et du cortex cérébelleux, ainsi qu'une altération du volume du cortex pariétal et occipital et des ganglions de la base, dans le SWB (Chiang, Reiss, Lee, et al., 2007 ; Faria, Landau, O'Hearn, et al., 2012). Par ailleurs, une récente étude de Gagliardi, Arrigoni, Nordio, et al. (2018) s'est intéressée aux anomalies structurales et fonctionnelles conjointes dans un groupe de jeunes adultes porteurs du SWB. Un déficit fonctionnel a été retrouvé au niveau de la région pariéto-occipitale, associé à une augmentation de sa connectivité structurale avec la région frontale. Il y avait également une hyper-connectivité locale au niveau de la région temporale et du cervelet. Au repos, les individus porteurs du SWB avaient une baisse de connectivité de plusieurs réseaux neuronaux, pouvant être à l'origine d'une capacité réduite à intégrer des informations provenant de régions cérébrales distantes dans des réseaux neuronaux distribués et cohérents. Dans l'ensemble, cette étude souligne des anomalies au niveau de la connectivité structurale et fonctionnelle chez les individus porteurs du SWB, au niveau des régions possédant une forte intégration multi-sensorielle (réseaux pariéto-occipitaux), des régions responsables du traitement socio-émotionnel (réseaux temporaux), ainsi que des régions liées au contrôle cognitif et à

l'attention (réseaux frontaux). Il y aurait donc une connectivité atypique et moins efficace dans le SWB, avec certaines régions présentant une augmentation de connectivité structurale conjointement à un déficit de connectivité fonctionnelle.

Afin de comprendre toutes les spécificités du cerveau atypique, des auteurs ont souligné l'importance de ne pas se focaliser uniquement sur l'évaluation du cerveau mature adulte mais également d'étudier les changements qui peuvent émerger très tôt dans l'ontogénèse. De fait, quelques études ont évalué les anomalies neuro-anatomiques chez des personnes atteintes du SWB avec une perspective développementale. Une étude de Boddaert, Mochel, Meresse, et al. (2006) a indiqué un volume réduit de matière grise dans les régions pariéto-occipitales du cerveau chez des enfants et adolescents avec SWB âgés entre 5 et 15 ans, comparativement aux individus contrôles, malgré un volume global de matière grise et de matière blanche similaire entre les deux groupes. Ces anomalies au niveau de la région pariéto-occipitale ont également été relevées dans la population adulte, suggérant que les différences au niveau postérieur du cerveau sont une caractéristique phénotypique importante du SWB. En outre, une étude de Campbell, Daly, Toal, et al. (2009) montre que, comparativement aux individus contrôles, les enfants et adolescents porteurs du SWB âgés entre 8 et 16 ans présentent une réduction de matière grise au niveau des régions pariéto-occipitales, des ganglions de la base et du thalamus et une réduction de matière blanche au niveau des ganglions de la base et du gyrus cingulaire postérieur droit. En revanche, il y avait une augmentation de la matière grise au niveau des lobes frontaux, du gyrus cingulaire antérieur, du lobe temporal gauche, et de la matière blanche au niveau du gyrus cingulaire antérieur. Les auteurs ont mis en relation ces changements neuro-anatomiques avec les changements comportementaux observés chez les individus avec SWB, à savoir les déficits attentionnels, l'hyperactivité et les problèmes sociaux avec leurs pairs. Il apparaît, ainsi, que les déficits attentionnels soient corrélés avec les différences de volume au niveau des lobes frontaux, du noyau caudé et du cervelet et que l'hyperactivité soit liée à des différences au niveau de la région temporale gauche, des lobes pariétaux et du cervelet. Finalement, l'étendue des problèmes sociaux était liée à des différences au niveau des lobes temporaux, des ganglions de la base au niveau de l'hémisphère droit et du lobe frontal. Dans l'ensemble, ces études montrent une neuro-anatomie atypique dans le SWB, visible par ses anomalies structurales et fonctionnelles. Ceci suggère que, dès les premières années de vie, le cerveau des personnes atteintes de SWB suit une trajectoire développementale différente de celle observée dans le développement typique (DT) (Karmiloff-Smith, 2012).

III. Performances mnésiques dans le syndrome

L'hétérogénéité présente dans les habiletés cognitives des individus porteurs du SWB est également révélatrice de leurs compétences mnésiques. En effet, des dissociations au niveau des performances mnésiques peuvent apparaître selon le type de mémoire évalué : verbal, visuel ou visuo-spatial. Une revue détaillée des études concernant les performances mnésiques dans le SWB peut être retrouvée dans l'introduction de l'Article 3 (Massol, Caron, Franck, Demily, & Chainay, soumis ; Partie 2, Chapitre 2, sous-chapitre I). Afin d'éviter des redondances, seul un résumé des principales études relatives aux performances mnésiques chez l'adulte et les individus plus jeunes, ainsi que des anomalies neurobiologiques sous-tendant les déficits en mémoire dans le SWB, est exposé dans cette partie. L'intérêt principal de ce travail de thèse étant l'effet des émotions sur la mémoire épisodique, nous nous pencherons particulièrement sur la description des études ayant évalué les performances en mémoire épisodique dans le SWB. En revanche, la littérature concernant les performances mnésiques, et plus généralement sur le SWB, n'étant pas très dense, nous évoquerons également dans ce sous-chapitre les performances en mémoire à court terme (maintien d'une petite quantité d'informations durant quelques secondes à une minute) et en mémoire de travail, lorsqu'aucune étude concernant la mémoire épisodique n'est disponible, notamment pour les enfants et adolescents porteurs du SWB.

1. Performances mnésiques : études comportementales

De façon générale, lorsqu'on compare les individus porteurs du SWB avec des individus contrôles appariés selon l'âge chronologique, la mémoire épisodique apparaît déficitaire (Jarrold, Baddeley, & Phillips, 2007 ; Greer, Hamilton, Riby, & Riby, 2014). En revanche, si l'on s'intéresse aux aptitudes mnésiques des individus porteurs du SWB relatives à leur niveau de développement, c'est-à-dire en comparaison avec des individus contrôles appariés selon l'âge mental et/ou à des individus présentant une déficience intellectuelle, la mémoire épisodique présente des dissociations suivant les mécanismes cognitifs mis en jeu. En effet, il apparaît que certains types de mémoire épisodique sont moins déficitaires, comme la mémoire visuelle ou verbale, et d'autres sont plus sévèrement

altérés comme la mémoire visuo-spatiale (Vicari, Bellucci, & Carlesimo, 2005 ; Jarrold et al., 2007 ; Edgin, Pennington, & Mervis, 2010 ; Costanzo, Varuzza, Menghini, et al., 2013 ; pour des revues, voir Souchay, Guillery-Girard, Pauly-Takacs, et al., 2013 et Vicari, Costanzo, & Menghini, 2016). Par ailleurs, certaines études se sont spécifiquement intéressées aux différents composants de la mémoire épisodique, à savoir la mémoire de l'item et la mémoire associative, dans le SWB (Jarrold, Phillips, & Baddeley, 2007 ; Edgin et al., 2010 ; Costanzo, Vicari, & Carlesimo, 2013 ; Mastrogiuseppe, Bertelsen, Bedeschi, & Lee, 2019). Elles ont notamment montré que les individus porteurs du SWB présentaient moins de difficultés en mémoire de l'item, c'est-à-dire la capacité de se souvenir qu'un item a été présenté, comparativement à la mémoire associative qui était plus déficitaire, c'est-à-dire la capacité de se souvenir qu'un item a été présenté avec ses détails contextuels associés. En effet, les individus avec SWB présentaient des difficultés à la fois pour se souvenir des détails contextuels intrinsèques et extrinsèques à l'item, et pour tous les types de mémoire, visuelle, visuo-spatiale et verbale, comparativement à des individus contrôles appariés en âge mental ou chronologique.

Nous avons vu dans la Partie 1 de ce travail de thèse (Chapitre 1, sous-chapitre I), que plusieurs processus cognitifs, à savoir les processus de recollection et de familiarité, pouvaient contribuer à la récupération d'informations en mémoire (voir le modèle *Dual-Process Signal Detection* de Yonelinas, 1994). Selon ce modèle, la capacité de se souvenir à la fois de l'item et des détails contextuels associés engagerait le processus de recollection, faisant référence à un vrai souvenir épisodique, tandis que le fait de se souvenir de l'item sans les détails contextuels associés engagerait le processus de familiarité. Ces deux processus reposeraient, par ailleurs, sur des bases neuronales distinctes. Dans leur étude, Costanzo, Vicari, & Carlesimo (2013) ont notamment montré que les individus porteurs du SWB avaient des performances identiques aux individus contrôles appariés en âge mental dans des tâches de reconnaissance d'items, en revanche, ils avaient des capacités réduites dans des tâches de mémoire associative (i.e. rappel de la modalité dans laquelle les items ont été encodés et rappel de l'item associé à un item cible préalablement encodé). Ces auteurs interprètent ces résultats comme la préservation du processus de familiarité et la contribution réduite du processus de recollection dans le SWB. Cette étude ne va donc pas dans le sens d'un retard général de maturation des capacités mnésiques dans le SWB, mais souligne plutôt la maturation hétérogène des processus de recollection et de familiarité, qui suivent une trajectoire développementale propre à chacun. Il se pourrait donc que les bases neuronales supportant le

processus de recollection soient plus affectées par les modifications neuro-anatomiques présentes dans le SWB. Par ailleurs, si l'on prend en considération le rôle des habiletés cognitives, il se pourrait que les capacités réduites des individus porteurs du SWB retrouvées au niveau attentionnel et exécutif (Costanzo, Varuzza, Menghini, et al., 2013) ne permettent pas la mise en œuvre d'un encodage profond et de stratégies de récupération efficaces des informations contextuelles. Dans le même sens vont les résultats de la récente étude de Mastrogiuseppe et al. (2019), qui soulignent également la contribution déficitaire du processus de recollection et la préservation du processus de familiarité chez les individus porteurs du SWB. Dans leur étude, les participants avec SWB avaient des performances similaires aux groupes contrôles appariés en âge mental et chronologique pour des tâches de reconnaissance d'objets et de localisations spatiales seules, en revanche, le groupe avec SWB avait de moins bonnes performances pour associer les objets avec leur localisation spatiale ainsi qu'avec leur ordre temporel d'apparition, comparativement aux deux groupes contrôles. De façon intéressante, cette étude montre que les difficultés pour associer les différents éléments d'un épisode (« Quoi », « Où », « Quand ») observées chez les individus avec SWB ne seraient pas uniquement liées à leurs habiletés visuo-spatiales déficitaires, puisqu'ils seraient parfaitement capables de se souvenir de localisations spatiales seules. Par ailleurs, Greer et al. (2014) ont démontré que les individus porteurs du SWB tendent à adopter des stratégies inefficaces lors de l'encodage de nouvelles informations puisque lorsqu'ils sont encouragés à créer des représentations riches en mémoire grâce à des stratégies d'encodage sémantique, leurs performances en mémoire pour des tâches de reconnaissance sont améliorées. Néanmoins, dans leur étude les participants avec SWB avaient des performances similaires aux groupes contrôles appariés en âge mental et chronologique lorsque la tâche réalisée en encodage entraînait un encodage superficiel des informations (perceptif), en revanche, ils étaient déficitaires par rapport aux deux groupes contrôles lorsque l'encodage était profond (sémantique). La réalisation d'un encodage profond n'a donc pas permis aux individus avec SWB d'atteindre un niveau de recollection des informations équivalent aux groupes contrôles, suggérant un potentiel déficit dans l'utilisation de stratégies sémantiques qui pourrait entraver la mise en place du processus de recollection.

2. Performances mnésiques durant le développement

Les études évoquées ci-dessus se sont majoritairement focalisées sur une population adulte, ou ont inclus des participants enfants et adultes de façon indifférenciée, ne permettant pas d'investiguer les différences développementales pouvant émerger entre plusieurs groupes d'âges dans le SWB. Quelques études se sont, en revanche, intéressées aux performances mnésiques durant le développement, notamment chez des enfants et adolescents porteurs du SWB âgés entre 5 et 19 ans, bien qu'elles concernent uniquement la mémoire à court terme et la mémoire de travail (Vicari, Brizzolara, Carlesimo, Pezzini, & Volterra, 1996 ; Vicari, Bellucci, & Carlesimo, 2003 ; Carney, Brown, & Henry, 2013). Dans l'ensemble, les résultats indiquent un profil mnésique similaire à celui observé pour la mémoire épisodique chez l'adulte, c'est-à-dire des déficits moins importants en mémoire visuelle et verbale comparativement à la mémoire visuo-spatiale. Il est important de noter que ce profil mnésique pour la mémoire à court terme et la mémoire de travail est également observé chez l'adulte (Vicari, Bellucci, & Carlesimo, 2006 ; pour des revues, voir, Vicari & Carlesimo, 2006 et Vicari, Costanzo, & Menghini, 2016). Dans l'ensemble, ces études suggèrent une atteinte similaire des différents systèmes de mémoire (mémoire à court terme, mémoire de travail et mémoire épisodique) dans le SWB et qui serait déjà présente chez les enfants porteurs du syndrome. Par ailleurs, Carney, Henry, Messer, et al. (2013) ont apporté des preuves supplémentaires sur la trajectoire développementale empruntée par la mémoire verbale et visuo-spatiale à court terme chez des individus avec SWB âgés de 8 à 21 ans. Il semblerait que les performances pour les deux types de mémoire augmentent de façon similaire et conjointement au développement cognitif, bien que les performances en mémoire visuo-spatiale soient toujours plus déficitaires que celles observées en mémoire verbale. Néanmoins, des études récentes suggèrent une préservation relative des performances en mémoire de travail visuo-spatiale lors de la petite enfance, notamment chez des enfants âgés entre 27 et 75 mois (Fanning, Hocking, Dissanayake, & Vivanti, 2018), ainsi que chez des enfants et adolescents âgés entre 6 et 19 ans lorsque les informations sont présentées de façon séquentielle mais pas simultanée (Lanfranchi, De Mori, Mammarella, Carretti, & Vianello, 2015 et Carretti, Lanfranchi, De Mori, Mammarella, & Vianello, 2015).

3. Anomalies neuro-anatomiques et déficits de mémoire

Le profil mnésique atypique observé chez les individus porteurs du SWB pourrait être en partie expliqué par des anomalies neuro-anatomiques (pour des revues, voir Meyer-Lindenberg, Mervis, & Berman, 2006 et Martens, Wilson, & Reutens, 2008). En effet, des déficits au niveau de la matière grise de la région pariéto-occipitale et du sillon intra-pariétal, ainsi qu'une baisse de l'activation de la voie visuelle dorsale, ont été reportés chez les individus porteurs du SWB et seraient à l'origine de l'altération du traitement visuo-spatial. En revanche, la voie visuelle ventrale, responsable du traitement visuel des objets, semblerait préservée. Les voies visuelles ventrale et dorsale sont largement connectées à plusieurs régions cérébrales ayant un rôle majeur dans les processus mnésiques, dont le cortex préfrontal (CPF) (Takahashi, Ohki, & Kim, 2013) et le lobe temporal médian (LTM) (Diana, Yonelinas, & Ranganath, 2007). Il est donc possible qu'un déficit de l'intégration sensorielle des informations visuo-spatiales puisse altérer leur mémorisation subséquente. En outre, Meyer-Lindenberg, Mervis, Sarpal, et al. (2005) ont relevé des altérations au niveau de la forme de l'hippocampe malgré un volume préservé, ainsi que des déficits au niveau de l'activité synaptique et du métabolisme au repos pouvant s'étendre jusqu'au cortex entorhinal, suggérant surtout un déficit fonctionnel de cette région dans le SWB. Nous avons vu dans la Partie 1 de ce travail de thèse (Chapitre 1, sous-chapitre I) que l'hippocampe aurait un rôle fondamental dans l'association de l'item et de son contexte, permettant la création d'un souvenir épisodique complexe et cohérent (Diana, Yonelinas, & Ranganath, 2007). Le déficit fonctionnel retrouvé au niveau de l'hippocampe dans le SWB pourrait donc être à l'origine des difficultés observées en mémoire épisodique, plus particulièrement lors de tâches en mémoire associative.

IV. Traitement des émotions dans le syndrome

Le traitement des émotions est également caractérisé par un profil atypique dans le SWB, avec des résultats inverses selon si l'information émotionnelle à traiter est de nature sociale ou non sociale. Comme pour les performances mnésiques, une revue détaillée des études concernant le traitement émotionnel dans le SWB peut être retrouvée dans l'introduction de l'Article 3 (Massol, Caron, Franck, Demily, & Chainay, soumis ; Partie 2, Chapitre 2, sous-chapitre I). Afin d'éviter des redondances, seul un résumé des principales connaissances relatives au traitement des émotions selon leur nature sociale ou non sociale chez l'adulte et les individus plus jeunes, ainsi que des anomalies neurobiologiques sous-tendant leur traitement atypique dans le SWB, est exposé dans cette partie.

1. Traitement des émotions : études comportementales et en neuro-imagerie

Sur le plan social, c'est-à-dire pour des études incluant des stimuli représentant des humains ou des expressions faciales émotionnelles, les individus porteurs du SWB présentent un biais attentionnel envers les stimuli positifs comparativement aux stimuli négatifs (Dodd & Porter, 2010 ; Goldman, Shulman, Bar-Haim, Abend, & Burack, 2017 ; Boulton & Porter, 2020). Des études en électrophysiologie et neuro-imagerie rapportent, en outre, une augmentation de l'activité du système nerveux autonome, de l'amygdale et de l'amplitude des potentiels évoqués (PE) en réponse à des expressions faciales de joie et une diminution de ces activités pour des stimuli sociaux négatifs chez des individus porteurs du SWB, comparativement à des groupes contrôles appariés en âge mental ou chronologique (Haas, Mills, Yam, et al., 2009 ; Skwerer, Ammerman, André, et al., 2011; Mimura, Hoeft, Kato, et al., 2010 ; Binelli, Muniz, Subira, et al., 2016). De plus, les individus avec SWB auraient des difficultés spécifiques pour identifier les expressions faciales négatives (tristesse, peur, colère) par rapport aux expressions faciales positives (joie) (Plesa-Skwerer, Faja, Schofield, et al., 2006). Ces résultats sont en accord avec la faible anxiété sociale souvent

observée dans le SWB et en partie liée à leur comportement hyper-sociable et leur forte propension à approcher et interagir avec des personnes inconnues (Dodd & Porter, 2011b).

Des résultats inverses sont retrouvés dans des études incluant des informations non sociales, c'est-à-dire des stimuli de l'environnement ne mettant pas en scène d'humains ou d'interactions sociales. En effet, comparativement aux individus contrôles, les personnes atteintes du SWB ont une augmentation de l'activité de l'amygdale (Meyer-Lindenberg, Hariri, Munoz, et al., 2005 ; Munoz, Meyer-Lindenberg, Hariri, et al., 2010 ; Thornton-Wells, Avery, & Blackford, 2011), de l'amplitude du potentiel LPP (Key & Dykens, 2016) ainsi qu'un biais attentionnel (Dodd & Porter, 2011a) pour les stimuli non sociaux négatifs, comparativement aux stimuli non sociaux positifs et neutres. En outre, les individus porteurs du SWB semblent être enclins à une forte anxiété qui est principalement de nature non sociale (Dodd & Porter, 2011b). Pour aller plus loin, Thornton-Wells et al. (2011) ont notamment évalué si la plus grande réactivité émotionnelle pour les stimuli non sociaux négatifs observée chez les individus porteurs du SWB dans certaines études était liée à leur développement atypique ou reposait sur des caractéristiques comportementales. Pour cela, ils ont évalué l'activité de l'amygdale en réponse à des images non sociales négatives, positives et neutres chez des individus avec SWB, comparativement à un groupe contrôle d'individus au DT présentant un niveau de peur non sociale similaire aux individus avec SWB, mesuré par des tests et questionnaires neuropsychologiques. Les résultats ont montré que les individus avec SWB présentaient une plus grande activité de l'amygdale gauche en réponse aux images négatives comparativement au groupe contrôle, en revanche, l'activité de l'amygdale était similaire entre les deux groupes pour les images positives et neutres. De plus, les images négatives entraînaient une augmentation de l'activité du cortex visuel bilatéral et du CPF médian et dorsolatéral droits, comparativement au groupe contrôle. Ces résultats suggèrent que les réponses cérébrales associées au traitement des images négatives non sociales sembleraient être une caractéristique spécifique aux individus avec SWB et ne seraient pas uniquement liées à leur comportement anxieux de nature non sociale. De plus, l'hyperactivité de l'amygdale en réponse aux images négatives dans le SWB n'était pas observée lors du traitement des images positives et neutres, indiquant une perturbation spécifique pour les stimuli non sociaux négatifs et non une anomalie fonctionnelle générale de l'amygdale.

2. Traitement des émotions durant le développement

Bien que la majorité des études sur le traitement des émotions dans le SWB se soit principalement focalisée sur une population adulte, quelques études se sont intéressées au traitement des émotions au cours du développement et montrent des résultats similaires à ceux obtenus chez l'adulte (Gagliardi, Frigerio, Burt, et al., 2003 ; Doyle, Bellugi, Korenberg, & Graham, 2004 ; Lacroix, Guidetti, Rogé, & Reilly, 2009 ; Capitaio, Sampaio, Fernandez, et al., 2011 ; Van Herwegen, Aznar, & Tenenbaum, 2014 ; Järvinen, Ng, Crivelli, et al., 2015).

Sur le plan social, les individus porteurs du SWB expriment très tôt un comportement d'approche sociale et un comportement émotionnel social accrus, ce qui les distingue des autres personnes atteintes de troubles incluant une déficience intellectuelle (Doyle et al., 2004). En revanche, il apparaît que les enfants atteints du SWB présentent plus de difficultés pour reconnaître les expressions faciales émotionnelles que des enfants au DT appariés en âge chronologique, ou que des enfants atteints de trouble du spectre autistique (TSA) (Gagliardi et al., 2003 ; Lacroix et al., 2009). Une autre étude de Capitaio et al. (2011) tend à montrer que les individus SWB âgés de 9 à 21 ans présenteraient une altération spécifique de la reconnaissance des expressions faciales négatives, notamment des expressions de peur et de tristesse, comparativement aux individus contrôles appariés en âge mental et chronologique.

Järvinen et al. (2015) ont analysé l'activité du système nerveux autonome, via des mesures de la réponse électrodermale et de la fréquence cardiaque, lors de la présentation de stimuli émotionnels sociaux et non sociaux chez des enfants porteurs du SWB âgés de 9 à 13 ans, des enfants atteints de TSA âgés de 7 à 13 ans et des enfants au DT appariés en âge chronologique. Les résultats ont montré que, comparativement aux enfants au DT, les enfants avec SWB présentaient une augmentation sélective de l'éveil physiologique en réponse aux images positives (comprenant à la fois des images sociales et non sociales) par rapport aux images négatives et neutres. Les auteurs ont également montré que les enfants avec SWB disposaient initialement d'un plus faible éveil physiologique en réponse aux images sociales négatives, qui s'ajustait progressivement au niveau des groupes TSA et DT au fur et à mesure des essais. De plus, avec la présentation répétée des stimuli non sociaux, il n'y avait pas de diminution de l'éveil physiologique chez les enfants avec SWB comparativement aux deux autres groupes, révélant une absence d'habituation aux images non

sociales chez ces enfants. Cette réactivité émotionnelle persistante pour les images non sociales peut refléter la grande anxiété de nature non sociale présente dès l'enfance chez les individus porteurs du SWB, qui ne semblent pas pouvoir réguler efficacement leurs émotions. Par ailleurs, Van Herwegen et al. (2014) ont demandé à des enfants et adolescents avec SWB de 7 à 18 ans et des individus contrôles appariés en âge chronologique de raconter une histoire basée sur un livre composé d'images. Ils ont, par la suite, évalué le taux de mots émotionnels, positifs (joie) et négatifs (peur et tristesse), utilisés par les participants lors de leur narration. Les deux groupes utilisaient un nombre similaire de mots émotionnels quel que soit leur âge et leur niveau de vocabulaire. En revanche, les individus SWB utilisaient plus de mots en rapport avec la tristesse. Les auteurs expliquent ces résultats en partie par le caractère anxieux et empathique des enfants SWB, tout en évoquant la possibilité que ces enfants présentent des difficultés pour reconnaître les causes externes de certaines émotions.

3. Anomalies neuro-anatomiques et traitement atypique des émotions

Certaines régions cérébrales jouant un rôle dans le traitement des émotions semblent présenter des anomalies dans le SWB. Une augmentation du volume de l'amygdale a notamment été reportée chez les individus porteurs du SWB comparativement aux individus contrôles (Reiss, Eckert, Rose, et al., 2004 ; Martens, Wilson, Dudgeon, & Reutens, 2009). Néanmoins, une étude de Campbell et al. (2009) s'est spécifiquement intéressée aux enfants et adolescents avec SWB âgés entre 8 et 16 ans, et n'a pas relevé de différence de volume de l'amygdale avec le groupe contrôle apparié en âge chronologique. Par ailleurs, des déficits au niveau des réseaux de matière blanche liant le CPF à l'amygdale ont été relevés chez les individus porteurs du SWB avec un âge moyen de 22 ans comparativement aux individus contrôles (Avery, Thornton-Wells, Anderson, & Blackford, 2012). Le CPF ayant été décrit dans la littérature comme jouant un rôle important dans la régulation de l'amygdale, ces auteurs suggèrent que les déficits observés dans leur étude au niveau de la matière blanche entre le CPF et l'amygdale pourraient être en partie responsables de l'hyperactivité de l'amygdale en réponse aux stimuli négatifs non sociaux ainsi que de la plus grande anxiété non sociale dans le SWB. Dans le même sens vont les travaux de Meyer-Lindenberg, Hariri, Munoz, et al. (2005) qui indiquent une altération de la régulation de l'amygdale par le cortex orbitofrontal (COF) dans le SWB. Dans l'ensemble, ces anomalies pourraient être liées au profil atypique observé

chez les individus porteurs du SWB dans le traitement des émotions, notamment une mauvaise régulation et donc une plus grande réactivité émotionnelle lors du traitement des stimuli sociaux positifs et non sociaux négatifs.

V. EEM dans le développement atypique

Comme nous l'avons vu dans la première partie de ce travail de thèse, l'effet des émotions sur la mémoire (ou EEM) est un phénomène robuste et largement démontré dans la littérature chez les adultes normotypiques. Ce phénomène commence également à être mieux appréhendé chez les enfants au DT, notamment avec l'appui des études réalisées au cours de ce travail de recherche et reportées dans la première partie. En revanche, malgré les spécificités observées au niveau des processus mnésiques et émotionnels chez les individus porteurs du SWB, aucune étude, à notre connaissance, ne s'est intéressée à l'impact que pourraient avoir les émotions sur leur mémoire. Or, nous avons vu dans la première partie que de nombreux facteurs et processus cognitifs pouvaient moduler l'EEM chez les individus normotypiques, dont la régulation émotionnelle. Il est donc probable que les individus atteints de troubles neuro-développementaux entraînant des modifications du traitement émotionnel, comme le SWB, présentent une modulation de l'EEM.

Des preuves de cette modulation pour d'autres groupes d'enfants présentant des troubles développementaux comme le syndrome de dysfonctions non-verbales (SDNV ou *nonverbal learning disabilities* – NLD) ou le TSA, ont été rapportées dans la littérature (Mirandola, Losito, Ghetti, & Cornoldi, 2014 ; Kurz, Conzelmann, Barth, et al., 2019). Mirandola et al. (2014) ont notamment étudié les vraies et fausses reconnaissances pour des scénarios négatifs et neutres simulant des faits de la vie réelle chez des enfants atteints de SDNV. Bien que le taux de vraie reconnaissance était équivalent pour les enfants SDNV et les enfants contrôles appariés en âge chronologique, les enfants SDNV présentaient plus de fausses reconnaissances des scénarios négatifs par rapport aux contrôles, suggérant une certaine vulnérabilité aux émotions négatives dans cette population. Par ailleurs, Kurz et al. (2019) se sont intéressés à l'EEM chez des enfants ayant un TSA, qui est un autre trouble neuro-développemental associé à un traitement émotionnel atypique et des troubles cognitifs. Les enfants TSA et les enfants typiques présentaient une meilleure reconnaissance des images négatives par rapport aux images neutres, mais l'EEM était plus important pour les enfants TSA comparativement aux enfants typiques. Bien que les enfants atteints de SDNV et de TSA présentent une étiologie et un phénotype clinique différents du SWB,

ces études donnent des indices concernant l'interaction entre mémoire et émotions chez des enfants présentant une déficience intellectuelle et/ou un traitement atypique des stimuli émotionnels. Ainsi, compte tenu des spécificités neuro-développementales et du profil comportemental des individus porteurs du SWB, il est possible que l'EEM soit également modifié dans cette population.

VI. Objectifs de la deuxième partie

La première partie de ce travail de thèse a permis d'approfondir les connaissances concernant l'EEM chez les enfants au développement typique. Afin d'élargir ces connaissances, la deuxième partie de ce travail s'est focalisée sur la nature de l'EEM chez les enfants ayant un développement atypique. En effet, des dysfonctionnements cognitifs et neuronaux connus dans certains troubles neuro-développementaux peuvent donner des indices supplémentaires sur le fonctionnement des mécanismes cognitifs et neuronaux mis en œuvre au cours du développement typique. Par ailleurs, les spécificités observées au niveau des processus mnésiques et émotionnels chez les enfants porteurs du SWB, en lien avec les connaissances actuelles sur les facteurs cognitifs pouvant moduler l'EEM chez les individus normotypiques, font de cette population un sujet d'étude privilégié pour évaluer l'éventuelle modulation de l'EEM au cours du développement atypique.

L'objectif principal de la deuxième partie de ce travail de thèse était donc d'analyser l'effet des émotions sur la mémoire épisodique chez des enfants et adolescents porteurs du SWB âgés de 8 à 18 ans, en comparaison avec un groupe d'enfants au DT âgés de 5 à 9 ans, ayant un âge chronologique équivalent à l'âge mental des individus avec SWB. Pour cela, les trois expériences réalisées avec les enfants au DT et les jeunes adultes présentées dans la première partie ont été adaptées et proposées aux participants dans cette deuxième partie. Elles incluaient des stimuli majoritairement non sociaux afin de rendre compte des spécificités de l'EEM dans un contexte plus général, non lié aux relations sociales. De plus, cela nous permettait d'apporter des connaissances supplémentaires sur le traitement des émotions au niveau non social dans le SWB, moins exploré dans la littérature. Ainsi, les deux premières expériences comportementales visaient à évaluer la mémoire de l'item et la mémoire associative chez les enfants porteurs du SWB. En outre, comme il est connu que certains types de mémoire sont plus affectés que d'autres dans le SWB, les mémoires verbale, visuelle et visuo-spatiale ont été évaluées, afin d'analyser si les émotions pouvaient influencer différemment la mémoire selon son type. Par ailleurs, la troisième expérience s'est intéressée à l'évaluation des réponses neuronales associées au traitement des émotions et à l'EEM durant l'encodage et la reconnaissance d'images, grâce à la technique des PE (mesures du LPP et de

l'effet ancien/nouveau). En effet, nous avons vu que les individus porteurs du SWB présentaient certaines anomalies neuro-anatomiques pouvant affecter leurs performances mnésiques et leur traitement émotionnel. Il est donc essentiel de s'intéresser aux corrélats neuronaux qui sous-tendent le traitement des émotions et l'EEM dans le syndrome afin d'évaluer s'ils peuvent être modulés par une trajectoire développementale atypique. De plus, un avantage particulier de l'étude de l'activité cérébrale chez les individus au développement atypique est qu'elle peut permettre d'identifier des anomalies dans l'activité neuronale sous-jacente malgré la présence de performances comportementales apparemment normales dues à l'utilisation de processus compensatoires.

Chapitre 2.

Étude expérimentale.

I. Étude 3 (Expériences 1, 2 et 3) - EEM chez l'enfant et l'adolescent porteurs du syndrome de Williams-Beuren : étude comportementale et en électro-encéphalographie (EEG)

Article 3 : Massol, S., Caron, C., Franck, N., Demily, C., & Chainay, H. (soumis) Emotional modulation of episodic memory in children and adolescents with Williams-Beuren syndrome. *Child Neuropsychology*.

1. Préambule

Dans l'Étude 3, trois expériences ont été conçues et adaptées des Études 1 et 2 réalisées avec la population typique (Partie 1, Chapitre 2, sous-chapitres I et II), afin d'évaluer l'EEM chez les enfants et adolescents porteurs du SWB d'un point de vue comportemental et neurophysiologique. Les deux premières expériences comportementales visaient à analyser l'influence des émotions sur les deux composants principaux de la mémoire épisodique : mémoire de l'item et mémoire associative. Pour cela, deux types de stimuli (images et mots) avec une valence émotionnelle négative, positive ou neutre, ainsi que plusieurs contextes de présentation des stimuli (visuel, auditivo-verbal, visuo-spatial) ont été utilisés. Compte tenu du fait que les performances mnésiques peuvent être dissociées dans le SWB, avec certains types de mémoire moins altérés, comme la mémoire visuelle et verbale, et d'autres plus déficitaires comme la mémoire visuo-spatiale, l'objectif de cette étude était d'évaluer si l'EEM pouvait varier selon le type de mémoire testé. De plus, l'aspect intrinsèque et extrinsèque des informations contextuelles associées aux stimuli avait été pris en compte dans cette étude afin de révéler d'éventuelles différences au niveau de l'EEM en mémoire associative selon cet aspect, comme cela peut être le cas dans la population typique. Ainsi,

l'information contextuelle à associer avec les stimuli était le genre de la voix (féminin ou masculin) avec laquelle les mots étaient prononcés (contexte auditivo-verbal intrinsèque) et la forme du cadre (fenêtre ou tableau) dans lequel les images étaient présentées (contexte visuel extrinsèque) dans l'Expérience 1, et la localisation spatiale (matrice de 10 cases) des images (contexte visuo-spatial intrinsèque) dans l'Expérience 2. Dans le but d'étendre nos connaissances sur les mécanismes sous-tendant l'EEM chez les individus porteurs du SWB, l'Expérience 3 s'est intéressée aux corrélats neuronaux associés à l'EEM durant l'encodage et la reconnaissance d'images. Cette expérience nous permettait de révéler d'éventuelles différences développementales au niveau neuronal pour l'EEM, entre les individus SWB et les enfants contrôles, qui peuvent ne pas être observées au niveau comportemental dû à l'utilisation potentielle de mécanismes compensatoires. Pour finir, toutes les expériences incluaient des stimuli majoritairement non sociaux afin de rendre compte des spécificités de l'EEM dans un contexte plus général, non lié aux relations sociales.

Un groupe de 16 enfants et adolescents porteurs du SWB âgés de 8 à 18 ans a participé à l'Expérience 1 et 2, et a été comparé à un groupe de 16 enfants contrôles au DT âgés de 5 à 9 ans, avec un âge chronologique équivalent à l'âge mental des individus porteurs du SWB. Pour chaque expérience, les participants ont réalisé une tâche d'encodage intentionnel de stimuli suivie par une phase de récupération immédiate des stimuli et de leurs contextes de présentation. Pour cela, ils ont été soumis à une tâche de reconnaissance des stimuli (mémoire de l'item), une tâche de rappel des informations contextuelles associées aux stimuli (mémoire associative) et enfin une tâche de rappel libre des stimuli (mémoire de l'item). En outre, parmi les participants ayant pris part à l'Expérience 1 et 2, des sous-groupes de 12 individus SWB et de 12 enfants contrôles au DT ont participé à l'Expérience 3. Lors de cette expérience, les participants ont réalisé une tâche d'encodage intentionnel d'images négatives, positives et neutres, suivie par une tâche de reconnaissance d'images. Grâce à la technique de l'EEG, des analyses des réponses neuronales lors de l'encodage et de la reconnaissance des images étaient incluses pour les deux groupes de participants. Les différences d'amplitude moyenne du potentiel évoqué LPP lors de la phase d'encodage entre les conditions émotionnelles, négative et positive, et la condition neutre ont été analysées afin d'évaluer l'effet des émotions (*emotion effect*). De plus, les différences d'amplitude moyenne du LPP lors de la phase de reconnaissance entre les images anciennes (préalablement encodées) et les nouvelles images ont été analysées pour les trois catégories d'images (négatives, positives et neutres) afin d'évaluer l'effet ancien/nouveau (*old/new effect*).

Compte tenu de la forte réactivité émotionnelle pour les stimuli négatifs non sociaux dans le SWB observée dans plusieurs études, nos hypothèses pour cette étude étaient que cette réactivité émotionnelle négative influence les processus mnésiques, entraînant ainsi un effet de *négativité* en mémoire de l'item, c'est-à-dire de meilleures performances mnésiques pour les stimuli négatifs comparativement aux positifs et aux neutres. En revanche, des dissociations au niveau des performances mnésiques ayant été observées dans le SWB selon le type de mémoire évalué, nous nous attendions également à ce que l'EEM se manifeste différemment selon le type de mémoire dans cette étude : il pouvait soit être apparent et réduire les déficits mnésiques, soit être absent dû à des déficits mnésiques trop importants. De plus, nous ne pouvions pas donner une hypothèse claire concernant l'effet des émotions sur la mémoire associative chez les individus porteurs du SWB compte tenu des déficits fréquemment observés en mémoire associative dans cette population. En effet, les émotions pouvaient soit atténuer ces déficits, soit n'avoir aucun effet sur les performances compte tenu du manque de ressources cognitives chez les individus porteurs du SWB qui pourraient présenter des difficultés pour traiter et associer les détails contextuels des stimuli. Pour l'Expérience 3, si l'effet de *négativité* était également observé en mémoire de l'item lors de la tâche de reconnaissance, nous nous attendions à ce qu'au niveau neuronal, la différence d'amplitude moyenne du LPP soit plus ample entre les images négatives et neutres, comparativement à la différence entre les images positives et neutres, lors de la phase d'encodage. De plus, lors de la phase de reconnaissance, la différence d'amplitude moyenne du LPP devait être plus ample entre les images négatives anciennes et les images négatives nouvelles, comparativement aux conditions positives et neutres.

Cette étude a été soumise pour publication dans *Child Neuropsychology* et est présentée sous forme d'article scientifique ci-après. L'article comprend le cadre théorique de notre étude, les méthodologies utilisées dans l'Expérience 1, 2 et 3, les résultats obtenus pour chaque expérience, la discussion des résultats de chaque expérience, ainsi qu'une discussion générale concernant l'ensemble de l'étude.

Emotional modulation of episodic memory in children and adolescents with Williams-Beuren syndrome

Soumis pour publication à *Child Neuropsychology*.

Sarah Massol¹, Cora Caron², Nicolas Franck², Caroline Demily³, & Hanna Chainay¹

¹Laboratoire d'Étude des Mécanismes Cognitifs (EMC), EA3082
Université Lumière Lyon 2, Bron, France

²Pôle Centre rive gauche et Centre Ressource de réhabilitation psychosociale, Centre hospitalier le Vinatier et Institut Marc Jeannerod, UMR 5229 (CNRS et Université Claude Bernard Lyon 1),
Bron, France

³Pôle Hospitalo-Universitaire ADIS, Centre de Référence Maladie Rares GénPsy, Centre Hospitalier Le Vinatier et Institut Marc Jeannerod UMR 5229 (CNRS et Université Claude Bernard Lyon 1), Bron, France

2. Abstract

Children and adolescents with Williams-Beuren syndrome (WBS) have been described as having specific memory abilities and emotional reactivity. Although it is well established in the literature that emotion can enhance memory, no such studies have been undertaken in individuals with WBS. In three experiments, the present study tested whether the negative or positive emotional valence of stimuli can influence verbal, visual and visuo-spatial memory by specifically evaluating two memory components: item and associative memory. Sixteen 8- to 18-year-old individuals with WBS performed the experiments and were compared to 16 typically developing control children. Participants completed intentional-encoding tasks followed by immediate item recognition, associative recall or item recall tasks. Event-related potential measures during encoding and recognition of pictures were also added in the last experiment. Results demonstrated, for the first

time, effects of emotions on all types of memory in individuals with WBS, both for item and associative memory tasks, that were similar to those observed in typically developing children. By combining behavioral and neural measures, our study provides new knowledge of the interaction between emotion and memory in WBS individuals, which seems to be unaffected by their atypical development.

Keywords: Williams-Beuren syndrome, children, emotions, episodic memory, event-related potentials (ERP)

3. Introduction

Williams-Beuren syndrome (WBS) is a rare neurodevelopmental disorder, estimated to affect between 1 in 7,500 and 1 in 20,000 live births, caused by the deletion of 26-28 genes on chromosome band 7q11.23 (Ewart, Morris, Atkinson, et al., 1993). Williams-Beuren syndrome is associated with a mild to moderate intellectual impairment and an atypical development across several cognitive, emotional and social domains. More specifically, individuals with WBS have a unique phenotype characterized by an uneven cognitive profile with relative strengths in domains such as language production and face recognition, and weaknesses in visuo-spatial skills, sensory motor processing and executive function (for a review, see Royston, Waite, & Howlin, 2019).

Memory abilities in WBS

This heterogeneous cognitive profile is also proposed to characterize WBS memory abilities, dissociating short and long-term, as well as verbal, visual and visuo-spatial memory. Specifically, long-term memory is generally impaired in WBS as compared with the typically developing (TD) population matched on chronological age (Jarrold, Baddeley, & Phillips, 2007; Greer, Hamilton, Riby, & Riby, 2014). However, when the comparisons are made with TD individuals matched on mental age and/or with persons presenting intellectual disabilities (e.g., Down syndrome (DS)), certain types of long-term memory (but also short-term memory), such as visual or verbal memory, appear less impaired than others, such as visuo-spatial memory (Vicari, Bellucci, & Carlesimo, 2005, 2006; Jarrold et al., 2007; Edgin, Pennington, & Mervis, 2010; Costanzo, Varuzza,

Menghini, Addona, Giancesini, & Vicari, 2013, but see for reviews Vicari & Carlesimo, 2006 and Vicari, Costanzo, & Menghini, 2016). More precisely, Vicari et al.'s studies have shown specific impairment of working and long-term memory for visuo-spatial information and their relative preservation for visual-object information (Vicari et al., 2005, 2006). Concerning short-term memory, performances in the verbal domain have been shown to be relatively more preserved than those in the visuo-spatial domain (Edgin et al., 2010 and Costanzo et al., 2013, but for a review, see Vicari & Carlesimo, 2006). In addition, concerning the auditory-verbal domain, Nichols, Jones, Roman, et al. (2004) found that individuals with WBS presented greater impairment in long-term than in short-term memory. However, other studies have not observed such differences in impairment between the verbal and visuo-spatial domains, either in short-term or long-term memory, as all types of memory were equally impaired (Menghini, Addona, Costanzo, & Vicari, 2010 and Sampaio, Sousa, Fernández, Henriques, & Gonçalves, 2008).

This atypical memory profile (i.e., greater deficit in visuo-spatial than visual and verbal memory) may be related to anomalies in the structure and connectivity of some brain regions (see for reviews, Meyer-Lindenberg, Mervis, & Berman, 2006 and Martens, Wilson, & Reutens, 2008). In particular, Meyer-Lindenberg, Kohn, Mervis, et al. (2004) have shown a significant reduction of gray matter in the parieto-occipital and intraparietal sulcus, as well as a hypoactivation of the dorsal visual stream, leading to impaired visuospatial processing. However, the activity of the ventral stream, which is responsible for visual object processing, was intact. Neurobiologically, the information provided from the dorsal and ventral visual streams converges through different brain regions underlying memory processes, such as the prefrontal cortex (PFC) (Takahashi, Ohki, & Kim, 2013) and the hippocampus (Diana, Yonelinas, & Ranganath, 2007). Therefore, an impaired perceptual integration network for visuo-spatial information can potentially affect subsequent short- and long-term memory processes for this type of information. Moreover, Meyer-Lindenberg, Mervis, Sarpal et al. (2005) have reported structural and functional abnormalities along the anterior-posterior axis of the hippocampus, indicating abnormal functioning of the hippocampus and providing a further neurobiological correlate for the difficulties observed in long-term memory in WBS.

In line with these neuroanatomical studies, there is evidence that individuals with WBS have difficulties binding items both with one another and with their context of presentation, resulting in impaired associative memory (Jarrold, Phillips, & Baddeley, 2007; Edgin et al., 2010; Costanzo, Vicari, & Carlesimo, 2013; Mastrogiuseppe, Bertelsen, Bedeschi, & Lee, 2019). In

particular, Jarrold et al. (2007) found that individuals with WBS had difficulty binding visual items with their spatial location, thus resulting in poor visuo-spatial associative memory performances, although their visual and spatial short-term memories tended to be spared. In addition, Costanzo et al. (2013) have reported spared performances in individuals with WBS on single-image recognition tasks but impaired performances on associative and source memory tasks compared with children matched on mental age. In their study, the participants performed a between-item association task in which they were required to select the image that had been associated with a previously studied image target and a source memory task in which they had to remember the modality (visual or auditory) in which stimuli were presented. Similarly, Mastrogiuseppe et al. (2019) found that the performances of individuals with WBS were as good as those of two groups of individuals matched on chronological and mental age in object identity and spatial locations tasks, but that their ability to bind these elements both with one another and with their temporal order was impaired. Finally, Edgin et al. (2010) have also shown a deficit in associative memory in individuals with WBS, in both the verbal and spatial domains, compared to individuals with DS. As the hippocampus has been shown to be critical for binding items with their spatiotemporal context in neurotypical individuals (Diana, Yonelinas, & Ranganath, 2007), these findings suggest that the impairment of associative memory in WBS may be related to hippocampal dysfunction (Meyer-Lindenberg, Mervis, Sarpal, et al., 2005).

Interestingly, from a developmental perspective, a study by Vicari, Bates, Caselli, et al. (2004) suggests that short-term memory abilities vary with age in WBS. The authors compared the performances in verbal and visuo-spatial memory span tasks of individuals with WBS and with DS divided into two groups: younger than 8 years and older than 12 years. Although both groups of WBS participants performed better in the verbal than visuo-spatial memory tasks, a selective advantage compared with the DS individuals appeared only in verbal memory for WBS participants older than 12 years. In addition, several studies have specifically investigated memory performances in children and adolescents (from 5- to 19-year-olds) and have shown a similar memory profile as has already been found in adults, namely relatively better preservation of visual and verbal memory than visuo-spatial memory, especially short-term and working memory (Vicari, Brizzolara, Carlesimo, Pezzini, & Volterra, 1996; Vicari, Bellucci, & Carlesimo, 2003; Brock, Brown, & Boucher, 2006; Carney, Brown, & Henry, 2013). Further, Carney, Henry, Messer, et al. (2013) found similar developmental improvements in verbal and visuo-spatial short-term memory in 8- to 21-year-old individuals with WBS, associated with increasing cognitive development, although at

all ages, the visuo-spatial scores were always lower than the verbal scores in this population. Nevertheless, some recent findings concerning children and adolescents with WBS (aged between 6 and 19 years) provide evidence of preserved visuo-spatial working memory, consistent with their mental age, when spatial information is presented sequentially and not simultaneously (Lanfranchi, De Mori, Mammarella, Carretti, & Vianello, 2015 and Carretti, Lanfranchi, De Mori, Mammarella, & Vianello, 2015). This also seems to be the case during the early developmental period, for example in preschoolers aged 27 to 75 months (Fanning, Hocking, Dissanayake, & Vivanti, 2018). These findings suggest that, in WBS, younger individuals are more likely to have spared visuo-spatial memory abilities than adults. Finally, a study by Devenny, Krinsky-McHale, Kittler, et al. (2004) has investigated age-associated changes in long-term and working memory across adulthood in WBS. They found an early and severe decrease in long-term episodic memory, but not in working memory, with increasing age in adults with WBS, a finding which was not observed in a peer group of adults of similar age and intellectual disabilities.

Emotion processing in WBS

Regarding emotion processing, the presence of an atypical profile in individuals with WBS has been highlighted, with opposite patterns being observed according to whether the information to be processed is social or non-social in nature. Specifically, a perceptual bias toward positive social stimuli is reported in individuals with WBS, who display intact recognition of happy faces but have difficulty recognizing negative facial expressions such as fear or anger (Gagliardi, Frigerio, Burt, et al., 2003; Plesa-Skwerer, Faja, Schofield, et al., 2006), and who also display a greater attentional focus on happy and trustworthy faces than on negative faces (Dodd & Porter, 2010; Goldman, Shulman, Bar-Haim, Abend, & Burack, 2017; Boulton & Porter, 2020). Moreover, physiological and neuroimaging findings have reported increased autonomic arousal and reactivity of the amygdala, a brain structure primarily associated with emotional processes, in response to happy faces, coupled with reduced autonomic arousal and amygdala response to negative social images, in individuals with WBS compared to groups matched on mental and chronological age (Skwerer, Ammerman, André, et al., 2011; Järvinen, Ng, Crivelli, et al., 2015; Mimura, Hoeft, Kato, et al., 2010; Binelli, Muniz, Subira, et al., 2016). The same pattern of exaggerated response for happy faces and attenuated response for fearful faces was reported for neural responses using event-related potential (ERP) measures (Haas, Mills, Yam, et al., 2009). Taken together, these studies suggest

the existence in WBS of an increased bias toward processing positive social information and a reduced detection and reactivity for negative social information, reflecting general low rates of social anxiety (Dodd & Porter, 2011b).

A reverse pattern of emotional reactivity is observed for non-social information. Notably, compared to neurotypical individuals, people with WBS show increased amygdala activity (Meyer-Lindenberg, Hariri, Munoz, et al., 2005; Munoz, Meyer-Lindenberg, Hariri, et al., 2010; Thornton-Wells, Avery, & Blackford, 2011), larger ERPs (Key & Dykens, 2016), as well as an attentional bias (Dodd & Porter, 2011a) for non-social fearful stimuli than for positive or neutral non-social stimuli. Moreover, unusually high rates of non-social anxiety are also reported in WBS (Dodd & Porter, 2011b).

In addition, some studies have compared the ability to process emotional social compared to non-social information in WBS, but have revealed inconsistent findings (Järvinen, Dering, Neumann, et al., 2012 and Key & Dykens, 2016). Notably, Järvinen et al. (2012) found that, compared to neurotypical individuals, a WBS group presented greater emotional reactivity to social than to non-social visual stimuli and exhibited greater difficulties in identifying valence in non-social than social stimuli, and this in both the visual and auditory modalities. In contrast, Key & Dykens (2016) observed that WBS participants demonstrated reduced attention and arousal in response to emotional faces compared with non-social images, as assessed by ERP measures. These findings provide further evidence in support of the atypical processing of emotional information in WBS according to its social or non-social nature.

This specific profile of emotion processing may be related to structural and functional brain abnormalities. Indeed, an increased volume of the amygdala (Reiss, Eckert, Rose, et al., 2004; Martens, Wilson, Dudgeon, & Reutens, 2009) as well as a decrease in the structural integrity of prefrontal-amygdala white matter pathways (Avery, Thornton-Wells, Anderson, & Blackford, 2012) have been reported in adults with WBS compared to age-matched controls. Specifically, the normal inhibition of the amygdala by the orbitofrontal cortex (OFC) seems disrupted in individuals with WBS (Meyer-Lindenberg, Hariri, Munoz, et al., 2005). These disruptions might underlie the hyperactivity of the amygdala observed in WBS in the context of non-social fear processing. However, because of the paucity of studies involving children with WBS or differentiating children from adults in their participant groups, it is not known when changes in amygdala structure and function emerge and what consequence these changes have on other cognitive processes and behavioral features. One study by Campbell, Daly, Toal, et al. (2009), however, did investigate

brain structures in 8- to 16-year-old individuals with WBS and failed to show any difference in amygdala volumes relative to chronological age-matched controls.

Emotion and memory interaction

Emotions have a major influence on various cognitive mechanisms, including memory. In particular, it is widely established in the literature that emotional events, whether negative or positive, are better remembered than neutral events. This phenomenon has been called the emotional enhancement of memory (EEM) and has been amply demonstrated in neurotypical adults using various paradigms with different types of information (pictures, words, stories etc.) or memory task (for reviews, see Hamann, 2001 and Dolcos, Katsumi, Weymar, et al., 2017). Enhancing effects of emotion are notably attributed to two dimensions of emotional information: arousal, ranging from calm to exciting, and valence, ranging from unpleasant to pleasant (Russel, 1980; Kensinger & Corkin, 2004). Although much less investigated, the EEM has also been characterized in TD school-age children and findings similar to those reported in adults have been observed. That is, children displayed better memory for positive and negative than for neutral information (for a review, see Hamann & Stevens, 2013), with some studies also indicating a memory advantage for negative over positive information (Davidson, Luo, & Burden, 2001; Van Bergen, Wall, & Salmon, 2015; Massol, Vantaggio, & Chainay, 2020).

To our knowledge, no studies have addressed this phenomenon in WBS. However, given the specificities observed for emotion and memory processes in this population, it is of major interest to understand the interaction between emotion and memory in children and adolescents with WBS, who are in a period of cognitive and neuronal development, since this can have a substantial impact on their well-being and behavior. Nevertheless, few studies have investigated the EEM in other populations of children with developmental disabilities. In particular, one study has evaluated the EEM in children presenting similar cognitive disabilities as in WBS, such as nonverbal learning disabilities (NLD) (Mirandola, Losito, Ghetti, & Cornoldi, 2014). The authors examined true and false recognition for negative and neutral scripted episodes depicting real-life events in NLD children and chronological age-matched controls. Although true recognition was equivalent for NLD children and control children, the NLD children presented more false recognitions of negative scripts than the controls and exhibited more false recognitions for negative than for neutral scripts due to the greater generation of gist connections for negative actions than

neutral ones. Hence, this study suggests that NLD children are particularly vulnerable to emotional content. Moreover, some studies have investigated the EEM in children with autism spectrum disorder (ASD), which is another neurodevelopmental disorder associated with atypical social-emotional functioning and cognitive impairment. Notably, one study has shown better recognition of negative than neutral pictures in 9- to 12-year-old boys with ASD compared to TD boys (Kurz, Conzelmann, Barth, et al., 2019). Although children with ASD and NLD present different etiology and behavioral abnormalities than children with WBS, these results provide some clues regarding the interaction between emotion and memory in children with atypical development and intellectual and/or emotional disabilities. Thus, it is possible that children and adolescents with WBS also present some changes in EEM as compared to their TD counterparts.

The present study

In the present study, we chose to focus on children and adolescents in order to better understand emotional and memory-related brain development in WBS and thus facilitate the design of new intervention techniques making it possible to act as early as possible. Indeed, if emotions improve memory in individuals with WBS, will they help to counteract the deficits often observed in episodic memory? Conversely, if emotional events, especially negative ones, have an impact on memory, can this disrupt the well-being of children and adolescents who are often diagnosed with anxiety disorders? Whatever the case may be, it is vital to better understand the trajectory of brain development in WBS in order to target the optimal time to propose a clinical intervention. Moreover, as children may have some abilities that are less impaired than adults, this can be a period during which clinicians can design intervention approaches that capitalize on relative strengths in order to improve relative deficits. To this end, 8- to 18-year-old individuals with WBS and TD children participated in three experiments, adapted from a previous study with TD children (Massol et al., 2020), to investigate the effect of emotions on episodic long-term memory in this population. Since disparities exist in memory performances according to the type of memory tested (verbal, visual, visuo-spatial) in WBS, it seems essential to evaluate whether emotions might interact differentially with these different type of memory in this population. Therefore, the first two behavioral experiments tested whether the negative or positive emotional valence of words (verbal) and pictures (visual) can influence episodic memory. More specifically, as item memory appeared to be less impaired than associative memory in WBS, these experiments

tested the effect of emotion separately on two components of episodic memory: core information (item memory) and its associated contextual details (associative memory). The third and last experiment was designed to assess the neurophysiological aspects of the effect of emotions on memory by evaluating neural ERPs during the encoding (*emotion effect*) and recognition (*old/new effect*) of emotional pictures. As neurobiological changes that can affect the processing of emotions are described in WBS, it seems important to look also at the neural correlates underlying emotion processing and EEM in this population. The specificities of these neural ERPs were presented in the introduction of Experiment 3. In addition, we also asked our participants to identify the emotional valence of samples of pictures presented during the experiments since the identification of valence may be atypical in WBS (Skwerer et al., 2011). Importantly, as the social domain is beginning to be more widely documented in WBS but less so the non-social context, we chose to use mostly non-social pictures in the present study. This enabled us to assess EEM in a context not related to social relationships.

Eventually, through these three experiments, we aimed to obtain new knowledge of emotion processing and memory functioning in children and adolescents with WBS and to evaluate whether differences could emerge as a function of developmental disability.

Experiment 1

In this experiment, our goal was to examine the effect of emotions on item and associative memory for visual (pictures) and verbal (words) stimuli. For both types of stimuli, item memory was measured using free recall and recognition tasks and associative memory was measured using associative recall tasks. The contextual information used to evaluate associative memory was the shape of the frame (picture, window) in which pictures were presented (context) and the gender of the voice (female, male) in which words were spoken (source). As we have seen, individuals with WBS tend to have a stronger emotional reactivity to negative than positive or neutral non-social stimuli. This strong emotional reactivity could influence memory processes and thus improve memory for these stimuli in particular, meaning that we would expect a *negativity* effect in this population for item memory. Concerning TD children, a similar general EEM might be observed for both visual and verbal memory, although an advantage for negative over positive stimuli might also be observed as has sometimes been described in the literature. In addition, for WBS individuals,

contrary to TD children, a dissociation may possibly appear between visual and verbal memory which, according to some studies, may be affected differently. However, it is not clear whether the WBS group would experience an emotional enhancement of associative memory. Given the deficits observed in associative memory in WBS, emotions could either reduce this associative memory deficit or have no effect on it because of the lack of cognitive resources to process contextual information. The same pattern could be observed in TD children, who may also have a lack of cognitive resources due to age, although one study has demonstrated that an EEM may emerge for associative memory in TD children as of 8 years old (Massol et al., 2020).

4. Exp1: Method

Participants

Sixteen children and adolescents with WBS and 16 TD children participated in the study. Participant characteristics are presented in Table 13. Participants with WBS were recruited through the GéoPsy reference center for rare diseases at Le Vinatier Hospital, as well as through the “Autour des Williams” and “Williams France” associations. The clinical diagnosis of the individuals with WBS was confirmed via genetic testing (CGH-Array or fluorescent in situ hybridization – FISH) which showed the characteristic deletion on the chromosome band 7q11.23. The exclusion criteria for the WBS group included severe or profound intellectual disability (IQ < 40 assessed with the WISC) and comorbid neurodevelopmental disorder. To assess the intellectual abilities of the WBS participants, they were tested with two subtests of the Wechsler Intelligence Scale for Children (WISC-V – Wechsler, 2014). These subtests gave non-verbal (matrix reasoning subtest) and verbal (similarities subtest) scores. TD children were recruited from advertising and local elementary schools. They did not present any known history of psychiatric, neurodevelopmental, neurological or learning disorders. They were recruited so as to be sex-matched with the WBS group and on the basis of the non-verbal scores obtained by the WBS participants because non-verbal abilities are particularly impaired in WBS (Bellugi, Lichtenberger, Jones, & Lai, 2000). To do this, we derived the developmental age of the participants with WBS ($M = 7.03$, $SD = 1.26$) equivalent to their non-verbal raw scores and selected TD children with a chronological age ($M = 7.04$, $SD = 1.23$) as close as possible to the developmental age of the WBS individuals (Mean difference = 0.005, SE difference = 0.44), $t(30) = 0.01$, $p = 0.99$. To check the intellectual level of the TD children, they were tested after inclusion with the same subtests (matrix reasoning and

similarities) as the WBS group. The Student's *t*-test analysis revealed a significant difference for the matrix reasoning raw scores, $t(30) = 3.68$, $p = <.001$, but not for the similarities raw scores, $t(30) = 1.22$, $p = .23$, between the WBS and TD groups. All the participants were native French speakers and did not have any uncorrected visual or hearing problems. Prior to testing, the participants' parents signed informed consent, and the participants gave verbal assent in accordance with the Helsinki declaration. The participants received a €40 voucher for their participation in the study. The research was approved by the Ethical Review Board (Comité de Protection des Personnes Nord-Ouest IV, Lille, France, No. 2017 A03321 52).

Function	Test	WBS group (N = 16)	TD group (N = 16)
	Mean Chronological Age (CA)	13.14 (3.48)	7.04 (1.23)
	Chronological Age range	8-18 years	5-9 years
	Mean Mental Age (MA)	7.03 (1.26)	/
	Female / Male	6 girls and 10 boys	6 girls and 10 boys
	Handedness^a	12 right and 4 left	13 right and 3 left
Cognitive functioning	WISC-V Matrix Reasoning	11.93 (4.59)	17.50 (3.83)
	WISC-V Similarities	16.93 (5.44)	19.81 (7.20)
Mood	FMATC – 1	5.80 (0.42)	5.50 (0.67)
	FMATC – 2	5.53 (0.92)	5.40 (0.63)
	FMATC – 3	5.50 (0.63)	5.27 (0.59)
	BMIS	41.88 (4.16)	40.75 (3.07)
	CBCL (Total problem)	1.80 (1.12)	0.20 (1.02)

Table 13. Age and sex characteristics, cognitive functioning and mood assessments for WBS and TD groups.

Note: Raw mean scores are presented for subtests of WISC-V, FMATC (Face Mood Assessment Test for Children), BMIS (Brief Mood Introspection Scale) and CBCL (Child Behavior Checklist). Standard deviations are in parentheses. ^aHandedness was based on the Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971).

*Stimuli and Material**Pictures*

Forty-eight color pictures (500 x 500 pixels) of common living and non-living elements on a white background were used (equal number of living and non-living elements). Thus, 16 positive, 16 negative and 16 neutral pictures were selected from a set of 947 pictures that had previously been pre-tested for emotional valence and arousal on a scale from 1 (very negative/not arousing at all) to 9 (very positive/highly arousing) by 30 participants aged from 18 to 30 years ($M = 22.47$, $SD = 3.03$)⁵. The positive, negative and neutral pictures differed significantly in terms of valence (all t-test comparisons were significant, $p < .0001$) and the emotional pictures (negative and positive) were significantly more arousing than the neutral pictures (both $p < .0001$). The negative and positive pictures did not differ in terms of arousal ($p = .37$) (see Appendix – Table 21 for means and standard errors). The negative and positive pictures did not overlap with the neutral pictures in terms of normative valence and arousal ratings.

The 48 pictures were split into two lists of 24 pictures (8 positive, 8 negative and 8 neutral) for the encoding and retrieval phases of our experiment in such a way that each list was used equally often for the two phases. All the pictures were presented visually, with half of the pictures framed with an orange picture frame and the other half with a blue window frame (the frame for the two halves was reversed across participants). This was done in equal proportions over the positive, negative and neutral stimuli within each list. For each category of valence, the pictures did not differ in terms of valence and arousal between each list (all t-test comparisons were nonsignificant, $p > .90$).

Words

Forty-eight French concrete and abstract words were used (equal number of concrete and abstract words). Thus, 16 positive, 16 negative and 16 neutral words were selected from a large corpus of French words (FANchild database: Monnier & Syssau, 2017) according to their emotional valence and arousal as evaluated by children aged from 7 to 11 years. The positive, negative and neutral

⁵ We used these pictures because we unfortunately did not find any similar pictures pre-tested in children. However, in order to ensure that these ratings were not different for the children, we had the valence of these pictures rated by our two groups of children, and the results were consistent with those of the adults (see results section).

words differed in terms of valence (all t-test comparisons were significant, $p < .0001$) and the emotional words (negative and positive) were significantly more arousing than the neutral words (both $p < .0001$). The negative and positive words did not differ in terms of arousal ($p = .23$) (see Appendix – Table 21 for means and standard errors). The positive, negative and neutral words were also matched on subjective psycholinguistic index *imageability*, word length and frequency of use by school-age children (all $p > .18$). All the words were presented aurally and were recorded by a Macintosh voice synthesizer with a French female voice (“Audrey”) for half of the words and a male voice (“Thomas”) for the other half (the gender of the voice for the two halves was reversed across participants). This was done in equal proportions over the positive, negative and neutral stimuli. The negative and positive words did not overlap with the neutral words in terms of normative valence and arousal ratings.

The 48 words were split into two lists of 24 words (8 positive, 8 negative and 8 neutral) for the encoding and retrieval phases of our experiment in such a way that each list was used equally often for the two phases. For each category of valence, the words did not differ in terms of valence, arousal, *imageability*, word length and frequency of use between each list (all t-test comparisons were nonsignificant, $p > .21$).

Mood and Neuropsychological assessments

The Face Mood Assessment Test for Children (FMATC – Christodoulou & Burke, 2016) and the French version of the Brief Mood Introspection Scale (BMIS – Mayer & Gaschke, 1988) were administered to self-report the participants’ emotional states. For the FMATC, the participants had to select one of the six faces illustrating emotional expressions on a scale from 1 (sad) to 6 (happy). The BMIS is a mood adjective scale consisting of 16 mood-adjectives which can identify, among other things, a pleasant-unpleasant mood. The BMIS was shortened to 12 mood-adjectives by removing all the not commonly used adjectives, which could have impeded understanding. Thus, the results ranged from 12 (very unpleasant mood) to 48 (very pleasant mood). To assess behavioral/emotional problems and more particularly anxious/depressed behavior, the caregiver report from the Child Behavior Checklist (CBCL – Achenbach & Ruffle, 2000) was used.

Procedure

Before starting the experiment, the participants completed the FMATC and BMIS to self-report their emotional state.

The study consisted of two similar parts (both composed of encoding and retrieval phases), one including pictures and the other including words. These took place successively, with the order being counterbalanced between participants.

During the encoding phase for the pictures, the 24 stimuli were presented successively in a pseudorandom order in such a way that no more than two pictures of the same valence or with the same frame occurred in succession. Each picture was presented on a computer screen for a minimum of 3000ms and until a response was made, and was preceded by a 1-s fixation cross to ensure that the participants fixated the center of the screen. The participants were asked to remember the pictures and the frame in which they were displayed. To focus the participants' attention, they were asked to respond to the question 'Is the represented object rather small in the real world?' for each picture by pressing one of two keys corresponding to 'yes' or 'no' and labeled with colored stickers. The proportion of objects which were 'rather small' or not was equivalent for each category of valence and for each type of frame. After the encoding phase, the participants completed a 2-min filler task (visual processing tasks: maze, similarities between two images, etc.) before completing the retrieval phase. First, they had to complete a recognition task involving an associative recall task. The participants viewed the 24 old pictures from the encoding phase intermixed with 24 new pictures from each category of valence, making a total of 48 pictures. Among the 24 pictures from the encoding phase, half were framed with the same frame as in encoding phase (congruent condition) and the other half were framed with the other frame (incongruent condition). The pictures were presented in a pseudorandom but fixed order, in such a way that no more than two old or new pictures, two pictures from the congruent or incongruent condition or two pictures of the same valence occurred in succession. For each picture, the participants indicated if they thought it was old or not using the same keypress responses as previously. If the participants responded 'old', they had to indicate if they thought the picture was framed with the same frame as in the encoding phase or a different one, again using the same computer responses (associative recall). For each task, the two options appeared underneath the picture with the same colors as the corresponding keypress responses. Each picture was presented on the computer screen for a minimum of 1500ms and until the responses were made, and was preceded by a 1-s fixation cross. The participants were asked to respond as correctly as possible. The keypress responses for the encoding phase and the retrieval phase (recognition and associative recall tasks) were counterbalanced across participants (see Figure 24). Finally, after the recognition

and associative recall tasks, the participants had to complete a free item recall task and were instructed to orally recall as many items as they could remember from the encoding phase (out of the 24), regardless of the order in which they had appeared. This was to prevent potential interference effects in the associative recall task, as reported by D'Argembeau & Van der Linden (2004) when the free recall task was completed first, because participants may have reactivated contextual information during the item recall task which, in turn, could interfere with the later associative recall task. For this task, the participants were instructed to give as many details about the pictures as possible so that anyone could recognize them. If the experimenter felt that the description of the pictures was not precise enough, she asked the participant for clarification. The experimenter wrote down the participants' answers. If there was any doubt about the identity of the picture during scoring, double scoring was performed.

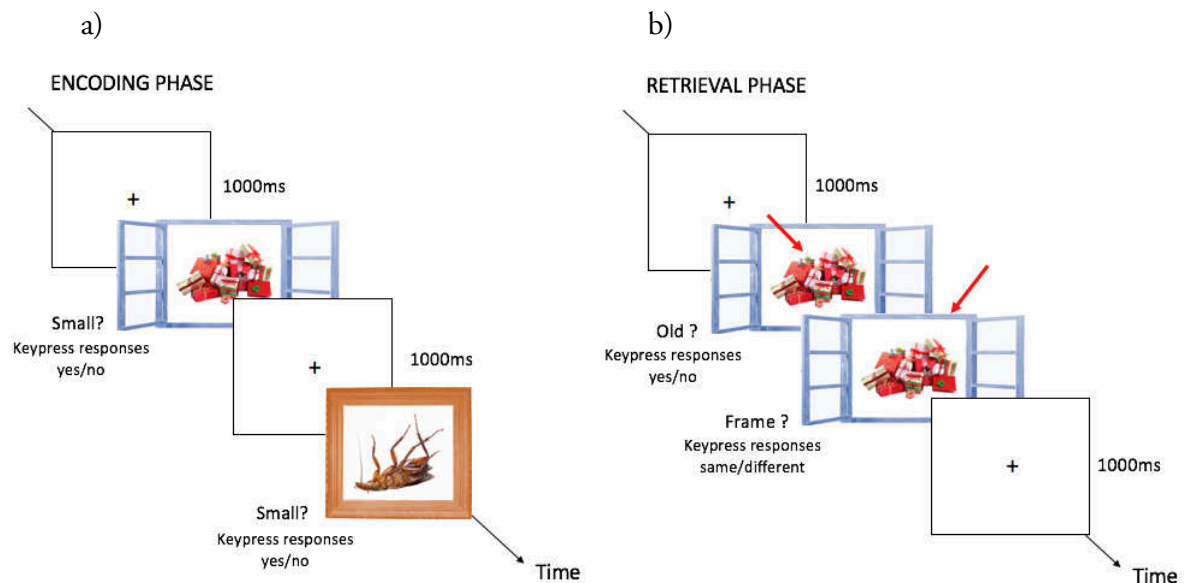


Figure 24. Procedures used in a) encoding phase and b) retrieval phase for pictures are illustrated here.

The procedure used in the encoding and retrieval phases for the words was identical to that for pictures, except that the words were spoken orally with a megaphone icon displayed on the screen and the participants were allowed to make a keypress response from 3000ms after word onset for the encoding phase and from 1500ms after word onset for the retrieval phase. A 1-s blank screen preceded each word onset. For the encoding phase, the participants were asked to respond to the question 'Can you physically touch the object named by the word?' by pressing one of the same two keys as previously. The proportion of 'yes' or 'no' answers was equivalent for each category of

valence and for each voice. For the retrieval phase, half of the words from the encoding phase were spoken with the same voice as the encoding phase (congruent condition) and the other half with the other voice (incongruent condition). The participants indicated if they thought the word was old or not. If the participants thought it was old, they then indicated if the word was spoken with the same or a different voice as previously heard using the same keypress responses.

For both the picture and word parts, practice trials with 4 stimuli for the encoding phase were presented to make sure that the participants understood how to complete the task. This was repeated if necessary until it was clear that the participants understood. Keyboard responses were made by the experimenter for all the participants to ensure consistency between their oral responses and key-responses. The experiment was programmed and run with the E-Prime software (2.0) on an HP PC computer.

At the end of the experiment, all the participants were asked to rate the emotional valence of the 48 pictures that they had seen during the experiment using the Self-Assessment Manikin (Lang, 1980) on a scale from 1 (very negative) to 9 (very positive). Each picture was presented on the computer screen with the valence scale underneath and the participants were instructed to choose the picture of the manikin associated with numbers from 1 to 9 that best described their initial feeling concerning the picture. The pictures were displayed until a keypress was made by the experimenter to indicate the participant's response and were preceded by a 1-s fixation cross.

At the end of the study, we administered several neuropsychological tests (described above) in order to assess the verbal and non-verbal abilities of the individuals with WBS and the TD children and to ensure that the cognitive functioning of the TD children was in the normal range (see Table 13).

Data analysis

The scores for correct free recall (item memory for pictures and words), recognition (corrected recognition scores HITs-FAs for pictures and words), and associative recall (associative memory: context for pictures and source for words) for the positive, negative and neutral stimuli were used

for the statistical analysis⁶. Preliminary analyses were performed to check for sphericity (Mauchly's test) and homogeneity of variance (Levene's test), with no violations being found for any of the data. Mixed-measures ANOVAs with Valence (positive vs. negative vs. neutral) and Stimulus (pictures vs. words) as within-subject factors, and Group (WBS vs. TD) as between-subject factor were performed on the scores for the three tasks separately (i.e., item recall, recognition and associative recall), and were followed by post-hoc comparisons. For associative recall (context or source), the mixed-measures ANOVA was performed on correct responses for correctly recognized items (HITs) only. Moreover, to evaluate if the different non-verbal intellectual abilities could explain performance, we added the non-verbal raw scores obtained in WISC-V matrix reasoning by the individuals with WBS and the TD children as a co-variant in the analyses of the three tasks: no significant main effect or interactions were observed in relation with the co-variant (all $p > .05$). A mixed-measures ANOVA was also performed on the valence rating scores for pictures, with Valence (positive vs. negative vs. neutral) as within-subject factor and Group (WBS vs. TD) as between-subject factor. This was followed by post-hoc comparisons.

5. Exp1: Results

See Appendix – Table 24 for means and standard errors of all the results of Experiment 1.

Item Recall

The ANOVA yielded a significant main effect of Valence, $F(2,60) = 3.50$, $p < .04$, partial $\eta^2 = .10$ and a Stimulus x Valence interaction, $F(2,60) = 6.74$, $p < .002$, partial $\eta^2 = .18$. Post-hoc comparisons showed that negative pictures were better recalled ($M = 2.06$, $SE = .21$) than positive ($M = 1.40$, $SE = .21$), $t(116.4) = 2.29$, $p < .03$, and neutral pictures ($M = 0.91$, $SE = .21$), $t(116.4) = 4.03$, $p < .001$. There was a trend towards better recall of positive than neutral pictures, $t(116.4) = 1.75$, $p = .08$. The significant differences were also observed for words, with positive words ($M = 1.44$, $SE = .21$) being better recalled than negative words ($M = 0.78$, $SE = .21$), $t(116.4) = 2.29$,

⁶ We also calculated the discriminability index d' and ran the statistical analysis on this index for pictures and words in both groups, i.e. WBS and TD. As the results were similar to those obtained for corrected recognition scores (HITs – FAs), we do not report these analyses.

$p < .02$. There were no other significant comparisons of interest. Moreover, a significant main effect of Stimulus emerged, $F(1,30) = 5.72$, $p < .03$, partial $\eta^2 = .16$, with the pictures being recalled better ($M = 1.46$, $SE = .13$) than the words ($M = 1.10$, $SE = .13$). A significant main effect of Group also emerged, $F(1,30) = 5.95$, $p < .02$, partial $\eta^2 = .17$, with WBS individuals ($M = 1.03$, $SE = .15$) performing worse than TD children ($M = 1.53$, $SE = .15$). No other significant main effects or interactions were observed (all $p > .05$) (see Figure 25).

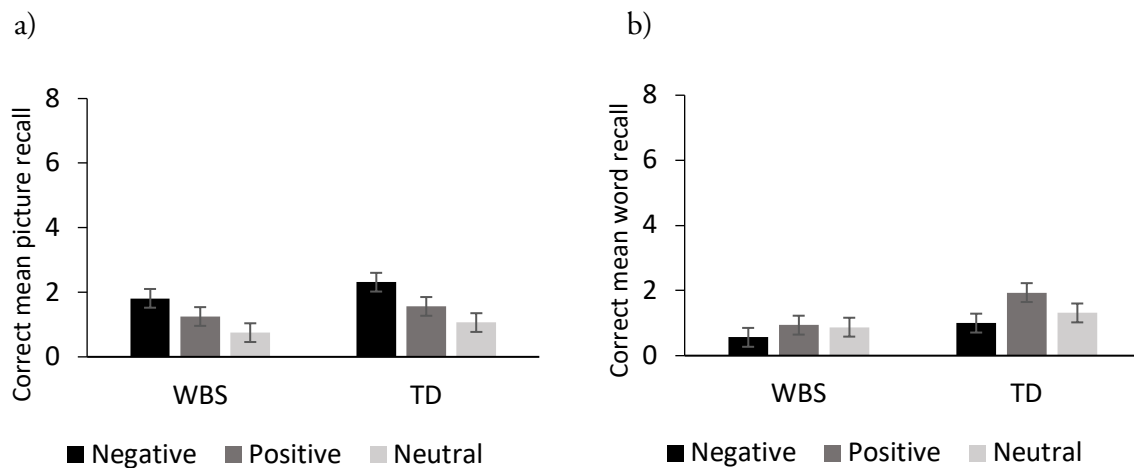


Figure 25. Mean correct responses for a) picture and b) word recall as a function of group (WBS individuals vs. TD children) and emotional valence (negative vs. positive vs. neutral). Maximum score: 8 for each category of valence. Error bars represent standard errors.

Item Recognition

The ANOVA yielded a significant main effect of Stimulus $F(1,30) = 65.90$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .69$, with the pictures being recognized better ($M = 7.36$, $SE = .24$) than the words ($M = 5.68$, $SE = .24$), and a significant main effect of Group $F(1,30) = 4.52$, $p < .05$, partial $\eta^2 = .13$, with WBS individuals ($M = 6.07$, $SE = .30$) performing worse than TD children ($M = 6.97$, $SE = .30$). There was also a trend for the Stimulus \times Group interaction, $F(1,30) = 3.25$, $p = .08$, partial $\eta^2 = .10$, with WBS individuals performing as well as TD children for picture recognition (WBS : $M = 7.10$, $SE = .33$, TD : $M = 7.63$, $SE = .33$), $t(43.8) = 1.11$, $p = .27$, but less well for word recognition (WBS : $M = 5.04$, $SE = .33$, TD : $M = 6.31$, $SE = .33$), $t(43.8) = 2.70$, $p < .01$. No other significant main effects or interactions were observed (all $p > .05$).

Associative Recall

The ANOVA yielded a significant main effect of Stimulus, $F(1,30) = 23.11$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .44$, with the context of pictures being recalled better ($M = 4.15$, $SE = .15$) than the source of words ($M = 3.33$, $SE = .15$) in both groups. A significant main effect of Group also emerged, $F(1,30) = 6.44$, $p < .02$, partial $\eta^2 = .18$, with WBS individuals ($M = 3.42$, $SE = .18$) performing worse than TD children ($M = 4.06$, $SE = .18$). Moreover, a trend for the Stimulus x Valence interaction emerged, $F(2,60) = 2.54$, $p = .08$, partial $\eta^2 = .08$. Post-hoc comparisons showed no difference for the associative recall of negative ($M = 4.09$, $SE = .24$), positive ($M = 4.41$, $SE = .24$) and neutral pictures ($M = 3.94$, $SE = .24$), all $p > .05$. However, the source of negative words ($M = 3.75$, $SE = .24$) was better recalled than that of positive words ($M = 3.06$, $SE = .24$), $t(119.9) = 2.22$, $p < .03$, and there was a trend towards better recall of the source of negative than neutral words ($M = 3.19$, $SE = .24$), $t(119.9) = 1.81$, $p = .07$. The difference between positive and neutral words was not significant, $t(119.9) = .40$, $p = .69$. No other significant main effects or interactions were observed (all $p > .05$) (see Figure 26).

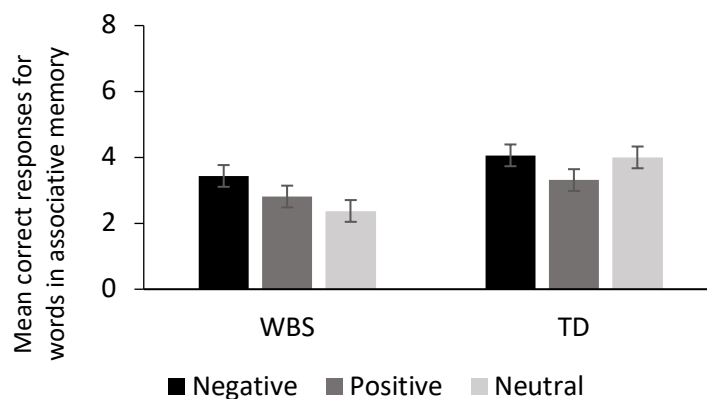


Figure 26. Mean correct responses for the associative recall of words as a function of group (WBS individuals vs. TD children) and emotional valence (negative vs. positive vs. neutral). Maximum score: 8 for each category of valence. Error bars represent standard errors.

Valence Rating

For the valence rating task, the ANOVA yielded a significant main effect of Valence, $F(2,60) = 230.24$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .89$. Post-hoc comparisons showed that negative pictures ($M = 2.75$, $SE = .36$) were rated as less pleasant than neutral ($M = 5.59$, $SE = .36$), $t(60) = 13.17$, $p < .001$, and

positive pictures ($M = 6.99$, $SE = .36$), $t(60) = 21.26$, $p < .001$. Neutral pictures were also rated as less pleasant than positive pictures, $t(60) = 8.09$, $p < .001$. The main effect of Group and the Valence x Group interaction were not significant (all $p > .05$) (see Figure 27).

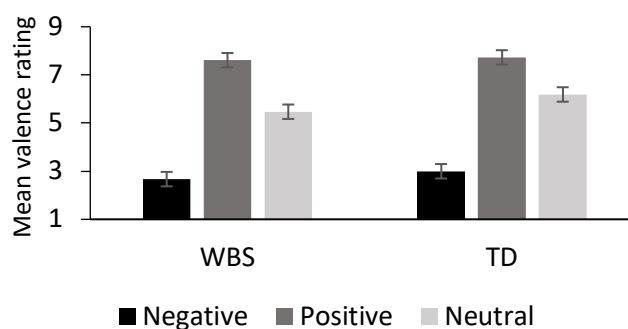


Figure 27. Mean valence rating of pictures as a function of group (WBS individuals vs. TD children) and emotional valence (negative vs. positive vs. neutral). Error bars represent standard errors.

6. Exp1: Discussion

In Experiment 1, our data showed for the first time that children and adolescents with WBS can experience an emotional enhancement of memory, which seems to be similar to that observed in TD children, especially in recall tasks. The item recognition tasks did not lead to an EEM in either group or for either type of stimulus, possibly due to the relatively high overall recognition scores (more than 80% of correct responses), which may have limited our ability to detect an EEM. Concerning the associative recall tasks, a trend towards an EEM was observed in both groups, but only for words.

In particular, a *negativity* effect (i.e., better performance for negative than positive and neutral stimuli) occurred in the item recall task for pictures, with a trend towards a general EEM (i.e., better performance for negative and positive stimuli than for neutral ones) in both groups of participants. These results are partly consistent with our hypothesis that WBS participants would experience a *negativity* effect. Our results for both individuals with WBS and TD children, are consistent with prior studies, which have shown a *negativity* effect as well as a general EEM in TD children (Davidson et al., 2001; Van Bergen et al., 2015; Massol et al., 2020). This demonstrates a similar *negativity* effect of emotions on visual item memory in both populations. Moreover, the

lack of effect of emotion on associative memory (i.e., context information: window or picture frame) may be the consequence of the difficulties observed in this task for the two groups, which performed at around chance level. The participants did not seem to be able to bind the pictures, whether emotional or neutral, effectively with their context of presentation. This could be due to a lack of cognitive resources due to age and/or developmental disabilities, or to the type of contextual information itself, which was extrinsic to the pictures and may not have permitted an emotional enhancement of associative memory (Yonelinas & Ritchey, 2015), as was the case in older children and young adults in the study by Massol et al. (2020), albeit with more complex visual stimuli.

Concerning words, a *positivity* effect emerged, with positive words being recalled better than negative words, but surprisingly there was no significant difference between either negative and positive words and neutral ones. On the contrary, the source (i.e., male or female voice) of negative words tended to be better recalled than that of positive and neutral words. Thus, surprisingly, the effect of emotions was reversed according to the memory component evaluated: a *positivity* effect in item memory (words themselves) and a *negativity* effect in associative memory (source of the words). As the performance in both tasks was very poor, these discrepancies deserve to be further investigated in a new paradigm allowing better performance in both types of tasks in order to verify if these results can be replicated.

Indeed, the results we obtained in Experiment 1 must be taken with caution as the performance in the item and associative recall tasks was quite low overall in both groups. Thus, with regard to memory performance, these results revealed a certain immaturity of free recall and associative memory processes in both groups, as well as a deficit in children and adolescents with WBS compared to TD children. Indeed, the WBS participants performed less well than the TD children for all the tasks except for picture recognition. These findings are in line with studies in TD children that have shown that memory processes, and in particular processes of recollection which reflect episodic remembering, mature slowly throughout childhood and adolescence (Ghetti & Lee, 2011), as well as with studies that have found relatively spared abilities in picture recognition in WBS coupled with deficient performances in recollection and episodic memory overall (Costanzo et al., 2013).

Finally, regarding the valence rating of pictures, on average, the WBS and TD groups rated the pictures in a way similar to the adults in the database used in this experiment. This indicates

that the ability to evaluate the emotional valence of pictures tends to be spared in children and adolescents with WBS.

Experiment 2

In Experiment 1, an EEM was observed in visual and verbal memory tasks, although this effect differed depending on the type of memory, visual or verbal, and on the component being assessed, item or associative memory. Importantly, no difference was reported between the two groups of participants regarding EEM, although the WBS group performed worse than the TD group on all memory tasks apart from picture recognition. In Experiment 2, in order to generalize the evaluation of EEM to multiple types of memory, we decided to evaluate EEM in visuo-spatial memory by using a picture recall task and associative memory task requiring the spatial location of pictures to be memorized. We expected this to enable us to determine whether emotions can compensate for the deficits often observed in this type of memory in WBS. Based on the results of our first experiment, a *negativity* effect was expected in item memory for both groups. Given that the type of contextual details to be associated with pictures was not the same as in Experiment 1, and that the intrinsic or extrinsic aspect of these details relative to the items may have an influence on the effect of emotions in associative memory in adults, it was not clear whether an EEM would emerge in associative memory for both groups in this experiment.

7. Exp2: Method

Participants

The same groups of participants as in Experiment 1 participated in this experiment.

Stimuli and Material

Seventy-two color pictures (original size 551 x 551 pixels) of common living and non-living elements on a white background not already presented to the participants in Experiment 1 were used (equal number of animate and inanimate elements). They were resized to 220 x 220 pixels to be presented in a square grid during the encoding phase of the experiment. Thus, 24 positive, 24 negative and 24 neutral pictures were selected from the same set of pictures as in Experiment 1 on the basis of their emotional valence and arousal on a scale from 1 (very negative/not arousing at all)

to 9 (very positive/highly arousing). The positive, negative and neutral pictures differed significantly in terms of valence (all t-test comparisons were significant, $p < .0001$) and the emotional pictures (negative and positive) were significantly more arousing than the neutral pictures (both $p < .0001$). The negative and positive pictures did not differ in terms of arousal ($p = .56$) (see Appendix – Table 22 for means and standard errors). The negative and positive pictures did not overlap with the neutral pictures in terms of normative valence and arousal ratings.

The 72 pictures were split into 12 lists (4 positive, 4 negative and 4 neutral) of 6 pictures each in such a way that, for each category of valence, the pictures did not differ in terms of valence and arousal between each list (all t-test comparisons were nonsignificant, $p > .70$). The 12 lists were used to construct 12 experimental series of 6 pictures each, all of which belonged to the same valence category (negative, positive or neutral).

Procedure

Before starting the experiment, the participants completed the FMATC (described in Experiment 1) to self-report their emotional state. They then performed the experiment, which consisted of encoding 12 series of pictures followed by immediate retrieval.

Within each series, the 6 pictures were presented sequentially (one after another) in a grid composed of 10 white squares on a black background. For each series, the six pictures were assigned to 6 squares (out of the 10) within the grid in such a way that the pictures appeared equally frequently in each location for the negative, positive and neutral series and for each participant. The series were presented in such a way that each of the valence categories followed one another in a sequence that prevented two series of the same valence appearing in succession. The order of valence presentation of the series was counterbalanced between participants in such a way that each category of valence appeared equally often at the beginning, in the middle and at the end of the presentation of the series.

In the encoding phase, each picture was presented for 3500ms, with an inter-stimulus interval (ISI) of 250ms. The participants were asked to remember the pictures and their locations. After each series of six pictures, the retrieval phase began with the same pictures presented again one after another in a random order and centered on a black background (with the initial size of 551 x 551).

Each picture was displayed for a minimum of 2000ms and until a keypress was made to indicate that the participant was ready to proceed, after which the empty grid of white squares was presented. The participants then had to choose the square in which they thought the picture had been presented in the encoding phase (associative recall). The experimenter clicked on the corresponding square.

Thus, for each of the 12 series, the participants first had to encode and then retrieve the locations of the pictures (see Figure 28). The experiment was split into two parts of 6 series each (Part 1 and 2), with a break between the two to avoid any fatigue. After each part, the participants had to complete a free item recall task and were instructed to orally recall as many items as they could remember (out of the 36), regardless of the order in which they had appeared. The participants were instructed to give as many details about the pictures as possible so that anyone could recognize them. If the experimenter felt that the description of the pictures was not precise enough, she asked the participant for clarifications. The experimenter wrote down the participants' answers. The same criteria as for Experiment 1 were applied for the scoring of the responses.

Practice trials for the encoding phase with 2 neutral series of 6 pictures each were presented at the beginning to establish that the participants understood how to complete the task. This was repeated if necessary until it was clear that the participants understood. The experiment was programmed and run with the OpenSesame software (3.0) (Mathôt, Schreij, & Theeuwes, 2012) on an HP PC computer.

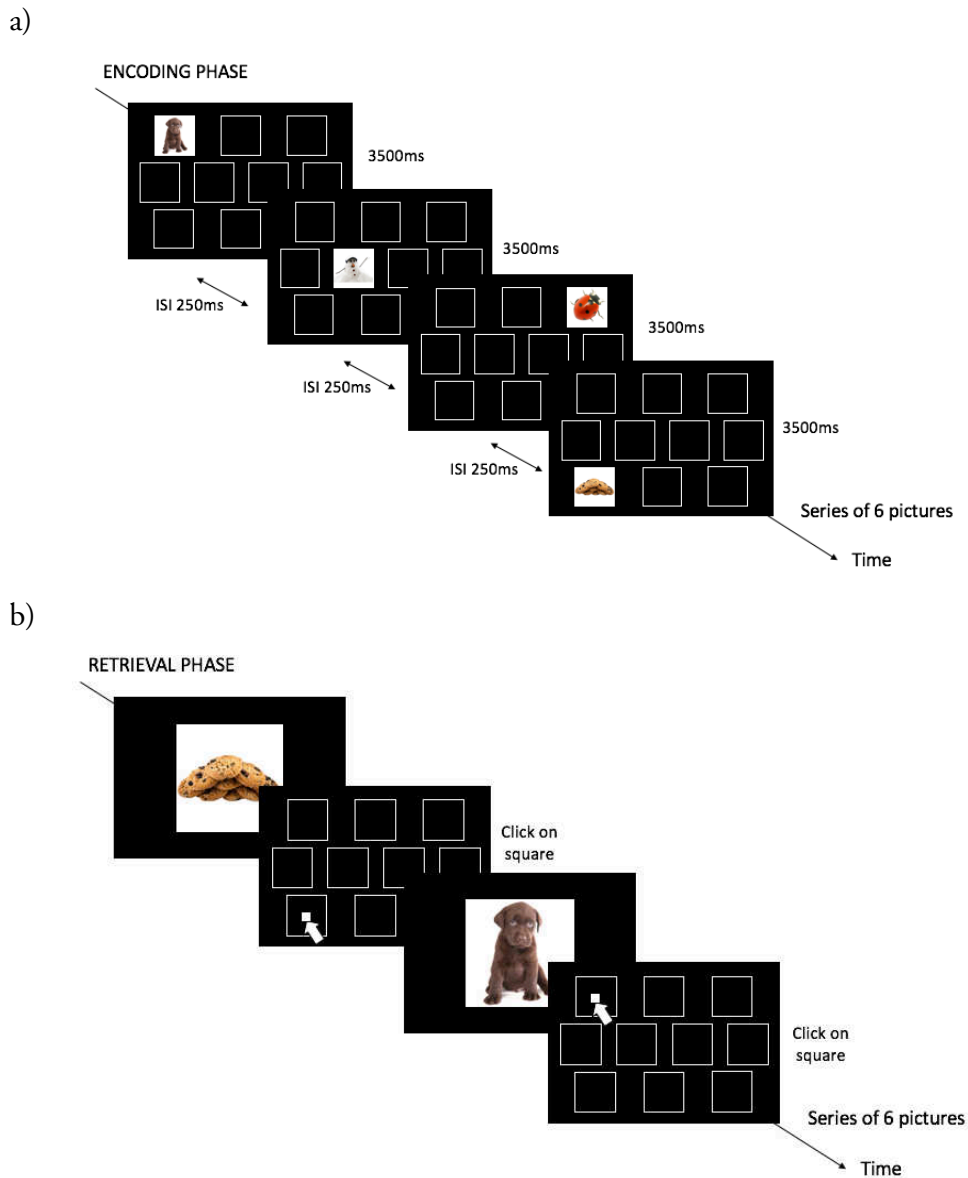


Figure 28. Procedures for a) encoding phase and b) retrieval phase for a series of 6 positive pictures are illustrated here.

Data analysis

The correct free recall and associative recall scores (associative memory: spatial location) for positive, negative and neutral pictures were used for the statistical analysis. Preliminary analyses were performed to check for sphericity (Mauchly's test) and homogeneity of variance (Levene's test), with no violations being observed for any of the data. Mixed-measures ANOVAs with Valence (positive vs. negative vs. neutral) and Part (1 vs. 2) as within-subject factors, and Group (WBS vs. TD) as between-subject factor were performed on the scores for the two tasks separately (i.e., item recall and associative recall), and were followed by post-hoc comparisons. As in Experiment 1, we

added the non-verbal raw scores obtained in WISC-V matrix reasoning by the individuals with WBS and the TD children as a co-variant in the analyses of the two tasks: no significant main effect or interactions were observed in relation with the co-variant (all $p > .05$).

8. Exp2: Results

See Appendix – Table 25 for means and standard errors of all the results of Experiment 2.

Item Recall

For the recall tasks, the ANOVA yielded a significant main effect of Valence, $F(2,60) = 4.63$, $p < .01$, partial $\eta^2 = .13$. Post-hoc comparisons showed that negative pictures were better recalled ($M = 2.31$, $SE = .23$) than positive ($M = 1.55$, $SE = .23$), $t(60) = 2.36$, $p < .02$, and neutral pictures ($M = 1.39$, $SE = .23$), $t(60) = 2.84$, $p < .006$. The difference between positive and neutral pictures was not significant, $t(60) = .48$, $p = .63$. A significant main effect of Group also emerged, $F(1,30) = 4.35$, $p < .05$, partial $\eta^2 = .13$, with WBS individuals ($M = 1.46$, $SE = .20$) performing worse than TD children ($M = 2.04$, $SE = .20$). No other significant main effects or interactions were observed (all $p > .05$) (see Figure 29).

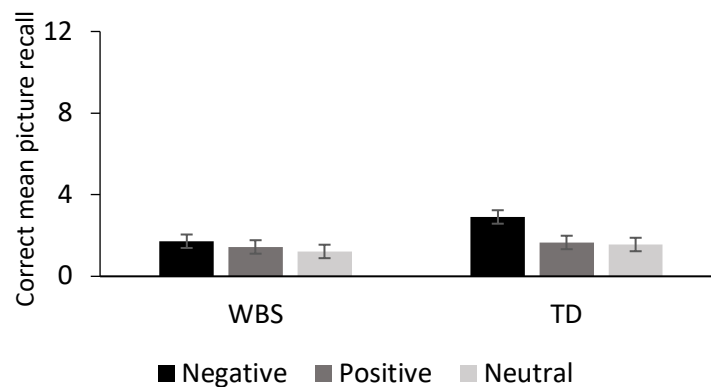


Figure 29. Mean correct responses for picture recall as a function of group (WBS individuals vs. TD children) and emotional valence (negative vs. positive vs. neutral). Maximum score: 12 for each category of valence. Error bars represent standard errors.

Associative Recall

For the associative recall tasks, the ANOVA yielded a significant main effect of Valence, $F(2,60) = 8.93$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .23$. Post-hoc comparisons showed that locations for positive pictures were better recalled ($M = 8.25$, $SE = .37$) than locations for negative ($M = 7.48$, $SE = .37$), $t(60) = 2.75$, $p < .008$, and neutral pictures ($M = 7.09$, $SE = .37$), $t(60) = 4.15$, $p < .001$. The difference between negative and neutral pictures was not significant, $t(60) = 1.40$, $p = .17$. A significant main effect of Group also emerged, $F(1,30) = 41.0$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .58$, with WBS individuals ($M = 5.45$, $SE = .48$) performing worse than TD children ($M = 9.77$, $SE = .48$). No other significant main effects or interactions were observed (all $p > .05$) (see Figure 30).

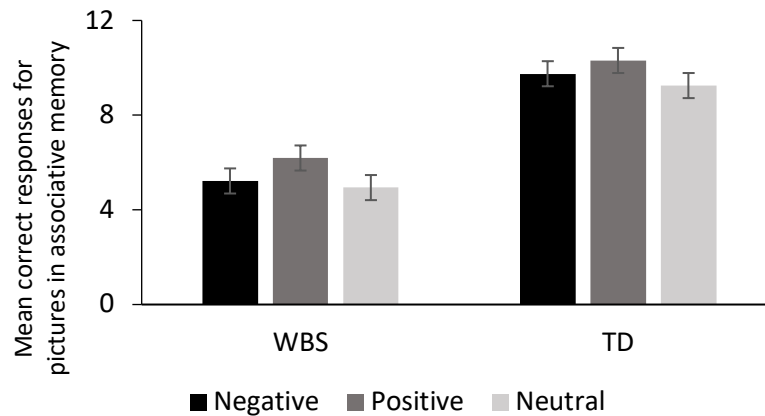


Figure 30. Mean correct responses for the associative recall of pictures as a function of group (WBS individuals vs. TD children) and emotional valence (negative vs. positive vs. neutral). Maximum score: 12 for each category of valence. Error bars represent standard errors.

9. Exp2: Discussion

In Experiment 2, our data showed once again that children and adolescents with WBS can exhibit an EEM similar to that observed in TD children for both item and associative memory. In particular, in both groups, a *negativity* effect occurred in the item recall task, with negative pictures being recalled better than positive and neutral ones, and a *positivity* effect occurred in the associative recall task, with the locations of positive pictures being recalled better than those of negative and neutral pictures.

For the recall task, our results are in line with those obtained in Experiment 1 and also confirm our prediction that participants would exhibit a *negativity* effect in item memory. However, once again, the results must be taken with caution as performance in this task was quite low in both groups. For the associative recall task, the *positivity* effect observed here has already been shown in 8- to 10-year-old TD children and young adults in a previous study by Massol et al. (2020) using the same paradigm but with pictures depicting complex visual scenes. Taken together, the results of these two studies suggest that when the pictures are presented sequentially and are not mixed on the basis of valence within the lists, the binding of the positive pictures with their spatial location seems to be more robust than that of the negative and neutral pictures, irrespective of the type of picture (single item or visual scenes) and the characteristics of the participants (children, adolescents or adults; typical or atypical development). Another explanation could be that the participants may have exhibited avoidance reactions that shifted the attentional focus away from the negative pictures and that they therefore did not correctly bind these pictures with their spatial location. These avoidance reactions for negative pictures would ultimately be of benefit for the positive pictures, which attract more attention than the neutral ones, thereby allowing a better binding of these pictures with their spatial location, which is considered as an intrinsic context (Yonelinas & Ritchey, 2015). It is particularly interesting that the WBS individuals benefited from this same robust binding of positive pictures with their spatial location as the TD children did, even though they performed worse than the TD children in the associative recall task used in this experiment and despite their usual difficulties in visuo-spatial tasks. Finally, it appears that both groups had sufficient cognitive resources to associate the pictures with their spatial context overall, revealing good associative memory skills for this experiment, although the WBS group performed less well than the TD group.

To conclude, an EEM was observed in the item and associative memory tasks, although the nature of the effect differed depending on the task: *negativity* effect in item memory and *positivity* effect in associative memory. Importantly, no EEM difference was observed between children and adolescents with WBS and TD children, although the WBS group performed worse than the TD group on the two memory tasks. Therefore, the EEM observed in associative memory did not make it possible to compensate for the deficits observed in visuo-spatial memory in the WBS participants.

Experiment 3

To further investigate visual item memory, a recognition task with more pictures to be encoded in order to be in line with the cognitive abilities of WBS individuals and to avoid ceiling effects, was used in Experiment 3, as well as subjective confidence judgments. Moreover, in order to obtain some indications regarding the neural correlates underlying emotion processing and EEM in children and adolescents with WBS, which can be subject to neurobiological variations when compared with TD children, ERP measures were included during the encoding and recognition of the pictures in order to assess the *emotion* and the *old/new* neural effects, respectively. More specifically, the *emotion effect* is reflected by an ERP component which is thought to index greater attentional engagement towards emotional stimuli: the late positive potential (LPP). The LPP begins around 200-300ms after stimulus onset, extends for many hundreds of milliseconds, is widely distributed across the scalp with maximal voltage at centro-parietal sites, and has a greater positive deflection during the presentation of negative and positive stimuli than that of neutral ones (Cuthbert, Schupp, Bradley, Birbaumer, & Lang, 2000). Previous studies have shown that using ERP is an appropriate technique for assessing emotion processing, in particular when used with the LPP component because this can be modulated in individuals with developmental disabilities such as WBS (Haas et al., 2009; Key & Dykens, 2016) and ASD (Keifer, Hauschild, Nelson, Hajcak, & Lerner, 2019), as well as in participants with mood disorders (e.g., Holmes, Nielsen, & Green, 2008). The *old/new effect* corresponds to the differential neural activity associated with old vs. new stimuli during a recognition task, and in particular a more positive voltage for old than new stimuli. This effect is thought to be associated with three topographically distinct ERPs in the typical population: an early bilateral frontal effect which begins around 300-500ms post-stimulus, a left parietal effect which onsets around 400-500ms and a late right frontal effect which begins around 500-600ms and persists for a second or more (Rugg & Allan, 2000; Sprondel, Kipp, & Mecklinger, 2011). More importantly, some of these ERPs can be particularly enhanced by emotional stimuli compared to neutral ones during recognition in adults (e.g., Maratos & Rugg, 2001) and TD children (Leventon, Stevens, & Bauer, 2014). However, to our knowledge, no studies have investigated the neural responses underlying memory in individuals with WBS. If the *negativity* effect obtained in item memory for the two previous experiments were also observed in the recognition performance in this experiment, the neural signature could also support the hypothesis of a *negativity* effect in both groups of participants, with larger ERPs for negative than positive and

neutral pictures in both the encoding and recognition phases, thus reflecting better emotional reactivity and better memory for negative pictures.

10. Exp3: Method

Participants

Twelve children and adolescents with WBS (6 girls and 6 boys, 8-18 years of age, $M = 13.47$, $SD = 3.56$) and 12 TD children (6 girls and 6 boys, 5-9 years of age, $M = 7.37$, $SD = 1.23$) from the groups of participants in Experiments 1 and 2 participated in this experiment (mean difference between developmental age of the WBS group and chronological age of the TD group was 0.33, $SE\ difference = 0.54$, $t(22) = 0.61$, $p = .55$).

Stimuli and Material

198 color photographs (567 x 425 pixels) depicting various types of scenes with common living and non-living elements were used for each group. To this end, 66 positive, 66 negative and 66 neutral pictures were selected from the Developmental Affective Photo System⁷ (DAPS: Cordon, Melinder, Goodman, & Edelstein, 2013), which provides emotional valence, arousal and complexity ratings for pictures from children. The positive, negative and neutral pictures differed significantly in terms of valence (all t-test comparisons were significant, $p < .0001$) and the emotional pictures (negative and positive) were significantly more arousing than the neutral pictures (both $p < .0001$). The negative and positive pictures did not differ in terms of arousal ($p = .83$). The positive and negative, and positive and neutral pictures were also matched on visual complexity ($p > .07$ and $p > .70$ respectively) but the negative pictures were significantly more complex than the neutral pictures ($p < .02$) (see Appendix – Table 23 for means and standard errors). The negative and positive pictures did not overlap with the neutral pictures in terms of normative valence and arousal ratings. In addition, as individuals with WBS can be particularly attracted by social stimuli (Skwerer et al., 2011), we balanced the number of pictures with humans between the three categories of pictures. Thus, in each valence category, 40 pictures (out of 66) represented humans.

⁷ The use of a new picture bank in this experiment was a methodological decision because none of the picture sets contained enough pictures to use in the three experiments.

For the individuals with WBS, the 198 pictures were divided into two lists of 102 and 96 pictures, each of which was used in one of the two experimental blocks that were run during the experiment to prevent potential floor effects in performances. Each block-list was then split into two sub-lists, of 51 pictures (17 positive, 17 negative and 17 neutral) for the first block and 48 pictures (16 positive, 16 negative and 16 neutral) for the second. Each sub-list was used for the encoding and retrieval phases of each block, in such a way that each sub-list was used equally often for the two phases. For the group of TD children, the 198 pictures were split into two lists of 99 pictures (33 positive, 33 negative and 33 neutral) for the encoding and retrieval phases of one experimental block in such a way that each list was used equally often for the two phases. This precaution, i.e. not dividing the experiments into two blocks, was taken to prevent potential ceiling effects in the performance of the TD children. Within each list, the positive, negative and neutral pictures differed significantly in terms of valence (all $p < .0001$) and the emotional pictures (negative and positive) were significantly more arousing than the neutral pictures (both $p < .0001$). The negative and positive pictures did not differ in terms of arousal (all $p > .70$). The positive, negative and neutral pictures were also matched on visual complexity (all $p > .10$) for both groups. Moreover, for each valence category, the pictures did not differ in terms of valence, arousal and complexity between each list (all t-test comparisons were nonsignificant, $p > .57$).

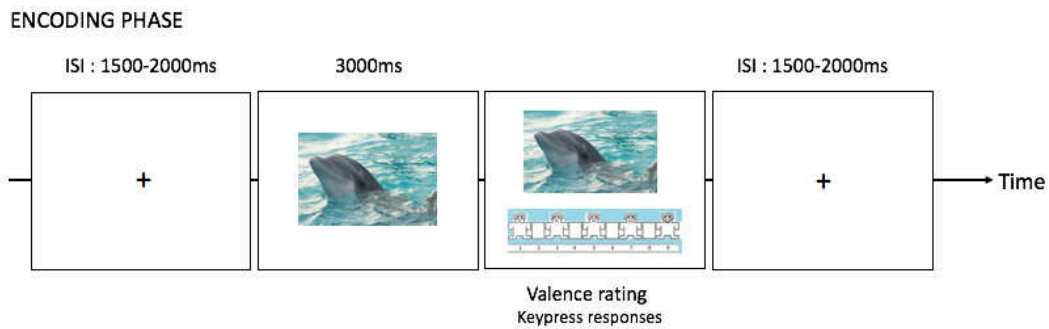
Procedure

Before starting the experiment, the participants completed the FMATC (described in Experiment 1) to self-report their emotional state. For the WBS group, two experimental blocks (both composed of encoding and retrieval phases) took place successively, with the order being counterbalanced between participants. A break between the two blocks was included to avoid any fatigue. During the encoding phases, pictures were presented successively in a pseudorandom order in such a way that no more than two pictures of the same valence occurred in succession for each participant. The participants were asked to remember the pictures for a subsequent memory test and to rate the emotional valence of each picture using the Self-Assessment Manikin (Lang, 1980) following the same procedure as in Experiment 1. This was done to focus the participants' attention on the pictures. Each picture was presented alone on a computer screen for 3000ms. The valence scale then appeared underneath the picture until a keypress was made by the experimenter to indicate the participant's response. The participants were instructed to pay attention to the pictures

and to wait until the valence scale appeared on the screen before answering. A jittered 1500-2000ms inter-stimulus interval (ISI) was employed to prevent habituation and development of picture onset expectations. During this interval, a central fixation cross was presented to ensure that the participants fixated the center of the screen before picture onset. After the encoding phase, the participants completed a 5-min filler task (visual processing tasks: maze, similarities between two images, etc.) before completing the retrieval phase, which consisted of a recognition task. In this task, the WBS participants viewed the 51 old pictures from the encoding phase intermixed with 51 new pictures from each category of valence, making a total of 102 pictures for the first block and a total of 96 pictures (48 old and 48 new pictures) for the second block. The order of presentation of the two blocks was the same as for the encoding phase. The pictures were presented in a pseudorandom order in such a way that no more than three old or new pictures and no more than two pictures of the same valence occurred in succession. The participants indicated whether they thought each picture was old or not by pressing one of two keys, 'yes' or 'no', labeled with colored stickers. If they thought the picture was old, they had to rate their confidence by making a very sure/maybe sure/unsure response on one of three possible keys. For each task, the two or three options appeared underneath the picture with the same colors as the corresponding keypress responses. The pictures were presented for 2000ms, followed by the old/new decision screen and, if the response was 'old', the confidence rating screen until a keypress was made by the experimenter to indicate the participant's response. The trials were separated by a jittered 1500-2000ms ISI. The participants were asked to respond as correctly as possible. The key-responses were counterbalanced across participants (see Figure 31). The procedure used in the encoding and retrieval phases for the TD children was identical to that for the WBS group, except that only one experimental block was implemented with two lists of 99 pictures (33 positive, 33 negative and 33 neutral) for the encoding and retrieval phases in order to avoid ceiling effects in the recognition task for this group.

Practice trials with 15 pictures (5 positive, 5 negative and 5 neutral) for the encoding phase were presented at the beginning to make sure that the participants understood how to complete the task. This was repeated if necessary until it was clear that the participants had understood. Keypress responses were made by the experimenter for all the participants to ensure consistency between their oral responses and key-responses. The experiment was programmed and run with the E-Prime software (2.0) on a Dell PC computer.

a)



b)

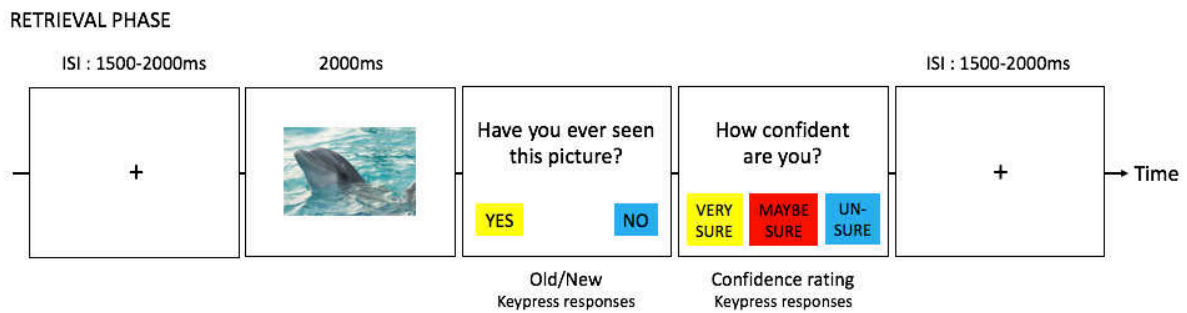


Figure 31. Procedures for a) encoding phase and b) retrieval phase for pictures⁸ are illustrated here.

ERP data recording and reduction

EEG was recorded from 128 Ag/AgCl electrode elements embedded in a cap (WaveGuard, ANT, The Netherlands), conforming to the 10-20 international electrode placement system. The EEG signal was recorded using ASAlab 4.7 software. Impedances were under 5 k Ω and the sampling rate was set at 1024 Hz. Data were preprocessed using EEGLab v14.1.2 operating in Matlab R2018b. Data were rereferenced offline to the combined P9 and P10 electrodes, which are closest to the mastoids and thought to optimize LPP effects (Hajcak, Weinberg, MacNamara, & Foti, 2012), filtered using a bandpass filter between 0.1 and 30 Hz, downsampled to 256 Hz, segmented into 2200ms epochs (from 200ms before to 2000ms after picture onset) and baseline-corrected (200ms prior to picture onset). Independent component analysis (ICA) was applied to identify and remove eye-blink artifacts. Trials that were contaminated by positive or negative deflections that exceeded

⁸ The picture is not from the DAPS and is used for illustrative purposes only. It has been downloaded from the photography sharing website unsplash.com and is used in accordance with the Terms and Conditions of the website, which do not require further permission.

100 μ V were excluded from the analysis using the 200ms moving window peak-to-peak threshold for automatic artifact detection. To investigate the *emotion effect*, artifact-free epochs during encoding were averaged in 3 conditions: negative, positive and neutral. This was done separately for the WBS and TD groups. The mean number of epochs included in the ERP averages was: for individuals with WBS, $M = 31.42$ (1.78) epochs for negative, $M = 31.50$ (1.93) epochs for positive and $M = 31.58$ (1.24) epochs for neutral conditions, and for TD children, $M = 32.42$ (1.00) epochs for negative, $M = 32.33$ (1.15) epochs for positive and $M = 32.33$ (0.65) epochs for neutral conditions. Moreover, to investigate the *old/new effect*, artifact-free epochs during recognition were averaged in 6 conditions: old and new for each valence (negative, positive and neutral), performed separately for the WBS and TD groups. The mean number of epochs included in the ERP averages for the *old/new effect* for both groups of participants is presented in Table 14.

Pictures	WBS group (N = 12)		TD group (N = 12)	
	Old	New	Old	New
Negative	32.17 (1.11)	31.17 (2.55)	32.08 (1.00)	32.58 (0.51)
Positive	31.33 (2.10)	31.75 (1.42)	32.58 (0.67)	32.58 (0.51)
Neutral	31.00 (2.63)	31.92 (1.08)	32.42 (0.67)	32.25 (1.71)

Table 14. Mean number of epochs included in ERP averages for the *old/new effect* for WBS and TD groups. Standard deviations are in parentheses.

ERP data analysis

Averaged data were examined in the light of previous studies (Rugg & Allan, 2000; Sprondel et al., 2011; Leventon et al., 2014; Key & Dykens, 2016) and, in particular, the shape of the encoding ERP waveforms revealed a sustained positive slow-wave consistent with the LPP over all electrodes. The LPP is interpreted for deflections toward positive amplitude regardless of value. That is, only positive deflection is interpreted even if effects at frontal and central sites are negative. This is consistent with the approach taken in the above-mentioned studies. For the *emotion effect*, mean amplitude of the LPP was examined over four time windows (W1: 200-400ms, W2: 400-600ms, W3: 600-800ms and W4: 800-1200ms) and the *old/new effect* was examined over only the first three time windows. Both effects were analyzed across four clusters of electrodes separated according to right and left hemisphere (Frontal: AF3, AF4, F1, F2, F3, F4; Fronto-Central: FC1, FC2, FC3, FC4, C1, C2, C3, C4; Centro-Parietal: CP1, CP2, CP3, CP4, P1, P2, P3, P4;

Occipital: O1, O2, POO3h, POO4h; clusters are depicted in Figure 32). These locations and time windows were selected based on the above-mentioned research on both the *emotion* and *old/new effect* and a careful visual inspection of our own data in order to investigate the duration, the timing and the topography of emotional and memory responses. To eliminate any concurrently neural processes that do not differ between each condition, Difference Wave (DW) scores were used in the ERP data analysis. The DW provides a waveform indicating the voltage changes and timing difference between two conditions. Therefore, for the *emotion effect*, the ERP waveforms of the neutral condition were subtracted from those of the negative and the positive condition: negative minus neutral and positive minus neutral. For the *old/new effect*, the ERP waveforms of the new pictures were subtracted from those of the old pictures in each condition: negative old minus negative new, positive old minus positive new and neutral old minus neutral new.

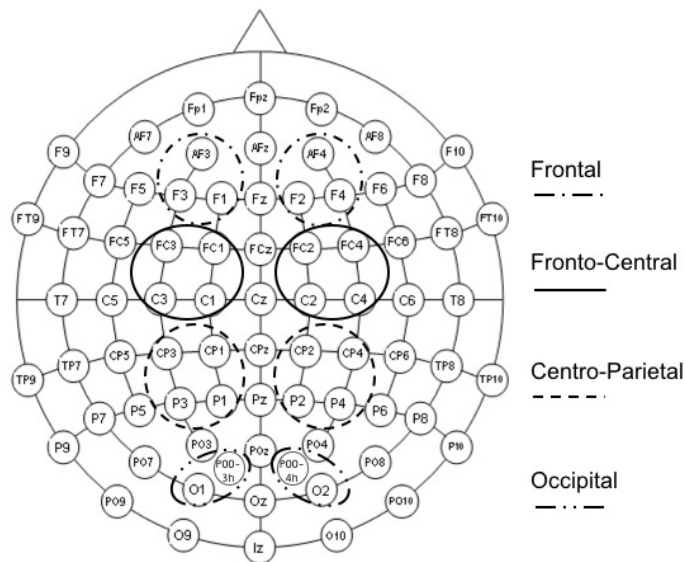


Figure 32. Electrode layout conforming to the 10-20 international system. The four clusters, separated into right and left hemisphere, are circled with different continuous or broken lines.

Behavioral statistical analysis

The proportion of corrected recognition (HITs-FAs) scores for positive, negative and neutral pictures was used for the statistical analysis. Confidence ratings were not analyzed because there was low variability in ratings among the two groups of participants: more than 90% of ratings were ‘Very sure’ responses. Preliminary analyses were performed to check for sphericity (Mauchly’s test) and homogeneity of variance (Levene’s test), with no violations being found for any of the data.

Mixed-measures ANOVAs were performed on the proportion scores with Valence (positive vs. negative vs. neutral) and Human (human vs. no human) as within-subject factors, and Group (WBS vs. TD) as between-subject factor. These were followed by post-hoc comparisons. Although it was not part of the research question, the Human within-subject factor was included to check if the effect of Valence on the corrected recognition scores of both groups of participants might change depending on whether or not a human was present in the pictures. As in Experiments 1 and 2, we added the non-verbal raw scores obtained in WISC-V matrix reasoning by the individuals with WBS and the TD children as a co-variant in the analysis. Moreover, for the WBS group only, we performed an additional ANOVA with the supplementary within-subject factor Block to check if the proportion of corrected recognition varied depending on the experimental blocks. Moreover, a mixed-measures ANOVA was also performed on the valence rating scores for pictures, with Valence (positive vs. negative vs. neutral) as within-subject factor and Group (WBS vs. TD) as between-subject factor. This was followed by post-hoc comparisons.

ERP statistical analysis

For the averaged DW, mean amplitudes were analyzed using mixed-measures ANOVAs with both groups of participants. Preliminary analyses were performed to check for sphericity (Mauchly's test) and homogeneity of variance (Levene's test). When violations were found, the Greenhouse-Geisser sphericity correction was applied to the data. Thus, for the *emotion effect*, a mixed-measures ANOVA with Valence (negative minus neutral vs. positive minus neutral), Window (W1 vs. W2 vs. W3 vs. W4), and Hemisphere (right vs. left) as within-subject factors, and Group (WBS vs. TD) as between-subject factor, was performed separately for the four clusters of electrodes (frontal, fronto-central, centro-parietal and occipital). For the *old/new effect*, the Valence factor became the Memory Valence within-subject factor (negative old minus negative new vs. positive old minus positive new vs. neutral old minus neutral new), and only the first three time windows were included in the analysis. These analyses were followed by post-hoc comparisons with Bonferroni corrections in the case of multiple comparisons.

11. Exp3: Results

Behavioral results

See Appendix – Table 26 for means and standard errors of the behavioral results of Experiment 3.

Item Recognition

The ANOVA yielded a significant main effect of Valence, $F(2,44) = 13.74$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .38$. Post-hoc comparisons showed that positive pictures were better recognized ($M = 0.87$, $SE = 0.04$) than negative ($M = 0.83$, $SE = 0.04$), $t(44) = 2.39$, $p < .03$, and neutral pictures ($M = 0.78$, $SE = 0.04$), $t(44) = 5.24$, $p < .001$. Negative pictures were also better recognized than neutral pictures, $t(44) = 2.84$, $p < .007$. A significant main effect of Group also emerged, $F(1,22) = 6.39$, $p < .02$, partial $\eta^2 = .23$, with WBS individuals ($M = 0.73$, $SE = 0.05$) performing worse than TD children ($M = 0.92$, $SE = 0.05$). The Valence x Group interaction was not significant, $p = .49$ (see Figure 33). Moreover, there were no main effects or interactions including the factor Human (all $p > .05$). However, a significant Valence x Non-verbal scores interaction emerged, $F(2,44) = 4.96$, $p = .001$.

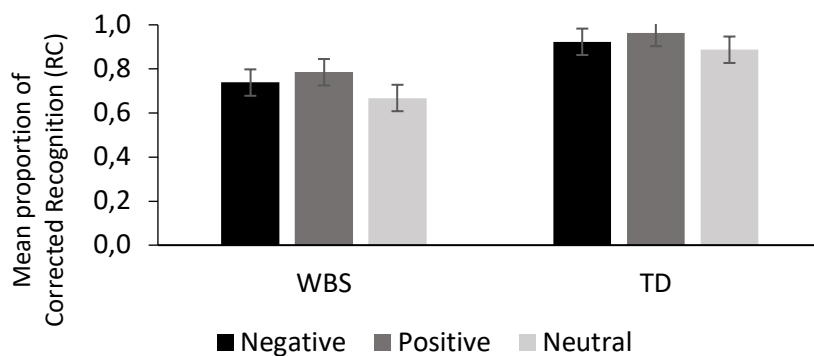


Figure 33. Mean proportion of corrected recognition of pictures as a function of group (WBS individuals vs. TD children) and emotional valence (negative vs. positive vs. neutral). Error bars represent standard errors.

For individuals with WBS, we further analyzed if the recognition performances were modulated by the experimental blocks. The ANOVA yielded a significant effect of Block, $F(1,11) = 9.59$, $p < .01$, partial $\eta^2 = .47$, with better performances for the first block ($M = 0.79$, $SE = 0.08$) than the second

one ($M = 0.67$, $SE = 0.08$). The Valence x Block interaction was not significant, $F(2,22) = 2.40$, $p = .12$, partial $\eta^2 = .18$. Moreover, a main effect of Valence also emerged, $F(2,22) = 5.59$, $p < .01$, partial $\eta^2 = .34$. Post-hoc comparisons showed that positive ($M = 0.78$, $SE = 0.08$) and negative pictures ($M = 0.74$, $SE = 0.08$) were better recognized than neutral ones ($M = 0.67$, $SE = 0.08$), $t(22) = 3.31$, $p < .003$ and $t(22) = 2.07$, $p < .05$, respectively. No significant difference was observed between positive and negative pictures, $t(22) = 1.24$, $p = .23$.

Valence Rating

The ANOVA yielded a significant main effect of Valence, $F(2,44) = 88.41$, $p < .001$, partial $\eta^2 = .80$. Post-hoc comparisons showed that negative pictures ($M = 2.75$, $SE = .36$) were rated as less pleasant than neutral ($M = 5.59$, $SE = .36$), $t(44) = 8.75$, $p < .001$, and positive pictures ($M = 6.99$, $SE = .36$), $t(44) = 13.05$, $p < .001$. Neutral pictures were also rated as less pleasant than positive pictures, $t(44) = 4.30$, $p < .001$. The main effect of Group and the Valence x Group interaction were not significant (all $p > .05$) (see Figure 34).

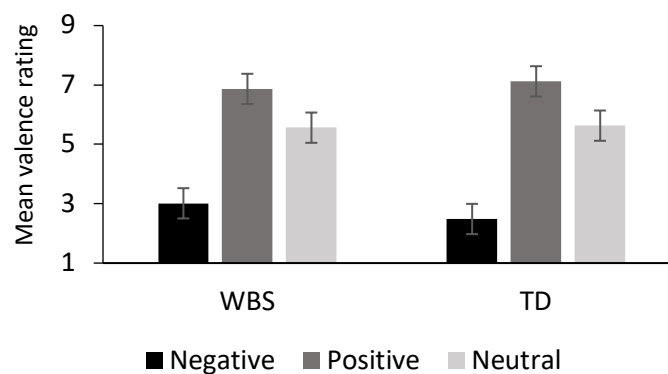


Figure 34. Mean valence rating of pictures as a function of group (WBS individuals vs. TD children) and emotional valence (negative vs. positive vs. neutral). Error bars represent standard errors.

ERP results

ERP results are divided into two sections (*emotion effect* and *old/new effect*) for WBS individuals and TD children. For clarity of presentation of the results, only the main effects and interactions that inform the research question are reported. All the ERP results in the text and figures are expressed in microvolts (μV).

*DW analysis – Emotion effect**Frontal cluster*

After application of the Greenhouse-Geisser sphericity correction, the ANOVA yielded significant Valence x Window, $F(2.54, 55.90) = 3.34$, $p < .03$, partial $\eta^2 = .13$, and Valence x Window x Group, $F(2.54, 55.90) = 2.88$, $p < .05$, partial $\eta^2 = .12$, interactions. However, post-hoc comparisons were not significant using Bonferroni corrections for multiple comparisons, although some comparisons were significant without this correction. Notably, without correction, the difference in amplitude between positive and neutral pictures ($M = 0.13$, $SE = .45$) was more positive during the W4 time window than the difference between negative and neutral pictures ($M = -0.85$, $SE = .45$), $t(60.9) = 2.08$, $p < .05$. The Valence x Window x Group interaction revealed that this effect was driven by the WBS group, with the amplitude of positive minus neutral pictures ($M = 0.80$, $SE = .64$) being more positive-going than the amplitude of negative minus neutral pictures ($M = -0.52$, $SE = .64$) during the W4 time window, $t(60.9) = 1.99$, $p < .05$. Moreover, for this group, a reverse pattern was observed during the W1 time window, with the amplitude of negative minus neutral pictures ($M = 0.02$, $SE = .64$) being more positive-going than the amplitude of positive minus neutral pictures ($M = -1.34$, $SE = .64$), $t(60.9) = 2.06$, $p < .05$ (see Table 15 for detailed statistical results). Difference waves at frontal cluster are plotted in Figure 35.

Variables	Mean difference (SE)	p	p _{bonferroni}	Effect size (Cohen's d) ^b	CI lower ^a	CI upper ^a
Valence x Window						
W4: Pos – Neu > Neg – Neu	0.97 (.47)	.04*	1.00	/	-2.518	0.561
Valence x Window x Group						
WBS W1: Neg – Neu > Pos – Neu	1.37 (.67)	.04*	1.00	/	-1.117	3.858
WBS W4: Pos – Neu > Neg – Neu	1.33 (.67)	.05*	1.00	/	-3.816	1.159

Table 15. DW for the *emotion effect* in WBS and TD groups at frontal cluster.

^a 95% CI for Mean Difference, ^b Cohen's d does not correct for multiple comparisons. The significant comparisons are indicated by *. Only significant data are reported here, with and without Bonferroni corrections. W: Window.

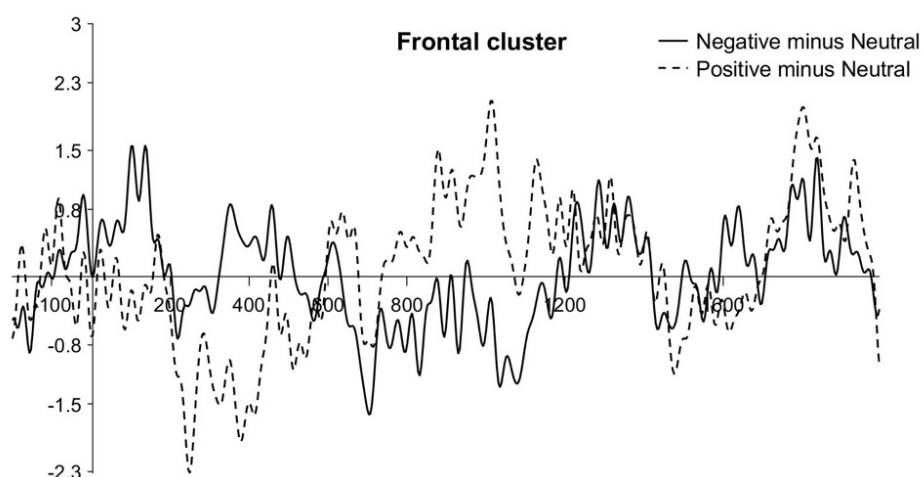


Figure 35. Difference waves for Negative minus Neutral and Positive minus Neutral pictures for children and adolescents with WBS at frontal cluster.

Fronto-central and Centro-parietal clusters

The ANOVA analyses of both clusters, using Greenhouse-Geisser sphericity correction, revealed a Valence x Window x Group interaction, $F(2.60, 57.27) = 2.49$, $p = .08$, partial $\eta^2 = .10$ and $F(1.81, 39.84) = 4.17$, $p < .03$, partial $\eta^2 = .16$, for fronto-central and centro-parietal clusters, respectively. Notably, without Bonferroni correction, WBS group had a more positive-going amplitude for negative minus neutral pictures (Fronto-central: $M = 0.33$, $SE = .58$; Centro-parietal: $M = 0.49$, $SE = .48$) than for positive minus neutral pictures (Fronto-Central: $M = -0.96$, $SE = .58$; Centro-parietal: $M = -0.41$, $SE = .48$) during the W1 time window, $t(49.2) = 2.08$, $p < .05$ and $t(48.3) = 2.18$, $p < .04$ for fronto-central and centro-parietal clusters, respectively (see Table 16 for statistical detailed results).

Variables	Mean difference (SE)	P	P _{bonferroni}	Effect size (Cohen's d) ^b	CI lower ^a	CI upper ^a
Valence x Window x Group						
FC: WBS W1: Neg – Neu > Pos – Neu	1.29 (.62)	.04*	1.00	/	-1.059	3.649
CP: WBS W1: Neg – Neu > Pos – Neu	0.90 (.42)	.03*	1.00	/	-0.675	2.494

Table 16. DW for the *emotion effect* in WBS and TD groups at fronto-central and centro-parietal clusters.

^a 95% CI for Mean Difference, ^b Cohen's d does not correct for multiple comparisons. The significant comparisons are indicated by *. Only significant data are reported here, with and without Bonferroni corrections. FC: Fronto-Central; CP: Centro-Parietal; W: Window.

Occipital cluster

The ANOVA yielded a significant Hemisphere x Group interaction, $F(1, 22) = 5.02$, $p < .04$, partial $\eta^2 = .19$. However, post-hoc comparisons were not significant using Bonferroni corrections for multiple comparisons, although some comparisons were significant without this correction. Notably, without correction, the DW was more positive-going in the left ($M = 0.51$, $SE = .36$) than in the right hemisphere ($M = -0.27$, $SE = .36$), $t(22) = 2.63$, $p < .02$, for TD children. Moreover, a trend was observed, with the DW being more positive-going in the left hemisphere for TD children than WBS participants ($M = -0.47$, $SE = .36$), $t(30.7) = 1.93$, $p = .06$ (see Table 17 for statistical detailed results).

Variables	Mean difference (SE)	P	P _{bonferroni}	Effect size (Cohen's d) ^b	CI lower ^a	CI upper ^a
Hemisphere x Group						
TD: LH > RH	0.78 (.29)	.015*	.09	/	-1.643	0.080
LH: TD > WBS	0.98 (.51)	.062	.37	/	-0.450	2.416

Table 17. DW for the *emotion effect* in WBS and TD groups at occipital cluster.

^a 95% CI for Mean Difference, ^b Cohen's d does not correct for multiple comparisons. The significant comparisons are indicated by *. Only significant data are reported here, with and without Bonferroni corrections. LH: left hemisphere; RH: right hemisphere.

DW analysis – Old/new effect

Fronto-central cluster

After application of the Greenhouse-Geisser sphericity correction, the ANOVA yielded a significant Memory Valence x Hemisphere x Group interaction, $F(1.85, 40.70) = 5.05$, $p < .01$, partial $\eta^2 = .19$. Post-hoc comparisons, using Bonferroni corrections, showed that, in the right hemisphere, the difference in amplitude between positive old and positive new pictures ($M = 0.84$, $SE = .48$) was more positive than the difference between neutral old and neutral new pictures ($M = -1.34$, $SE = .48$), $t(53.2) = 3.73$, $p_{\text{bonf}} < .03$, for WBS participants. Other significant comparisons without Bonferroni correction also emerged for individuals with WBS: in the right hemisphere, the difference between negative old and negative new pictures ($M = 0.19$, $SE = .48$) was more positive than the difference between neutral old and neutral new pictures, $t(53.2) = 2.63$, $p < .01$. Moreover, in the left hemisphere, the difference between positive old and positive new pictures ($M = 0.84$, $SE = .48$) was more positive than the difference between neutral old and neutral new pictures ($M = -0.41$, $SE = .48$), $t(53.2) = 2.13$, $p < .04$. There were also trends toward a more positive-going amplitude for positive old minus positive new pictures in the right hemisphere for WBS participants than TD children ($M = -0.43$, $SE = .48$), $t(77.7) = 1.86$, $p = .07$, and a more positive-going amplitude for neutral old minus neutral new pictures in the right hemisphere for TD children than for the WBS group (TD: $M = -0.09$, $SE = .48$), and $t(77.7) = 1.84$, $p = .07$.

(see Table 18 for statistical detailed results). Difference waves at right fronto-central cluster for individuals with WBS are plotted in Figure 36.

Variables	Mean difference (SE)	p	p _{bonferroni}	Effect size (Cohen's d) ^b	CI lower ^a	CI upper ^a
Valence x Hemisphere x Group						
WBS RH: Pos old – Pos new > Neu old – Neu new	2.17 (.58)	<.001*	.03*	/	0.094	4.259
WBS RH: Neg old – Neg new > Neu old – Neu new	1.53 (.58)	.01*	.74	/	-0.551	3.614
WBS LH: Pos old – Pos new > Neu old – Neu new	1.24 (.58)	.04*	1.00	/	-0.842	3.323
Pos old – Pos New RH: WBS > TD	1.27 (.68)	.07	1.00	/	-3.656	1.119
Neu old – Neu New RH: TD > WBS	1.26 (.68)	.07	1.00	/	-1.132	3.643

Table 18. DW for the *old/new effect* in WBS and TD groups at fronto-central cluster.

^a 95% CI for Mean Difference, ^b Cohen's d does not correct for multiple comparisons. The significant comparisons are indicated by *. Only significant data are reported here, with and without Bonferroni corrections. LH: left hemisphere; RH: right hemisphere.

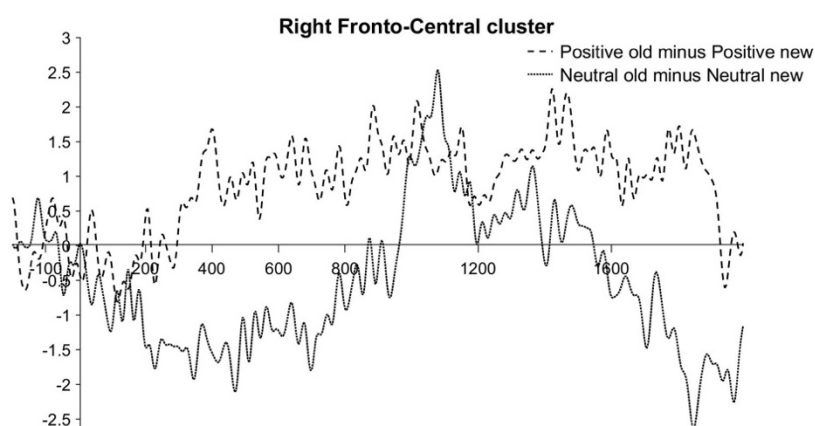


Figure 36. Difference waves for Positive old minus Positive new and Neutral old minus Neutral new pictures for children and adolescents with WBS at right fronto-central cluster.

Frontal and Centro-parietal clusters

After application of the Greenhouse-Geisser sphericity correction, the ANOVA analyses of both clusters revealed a tendency toward a Memory Valence x Hemisphere x Group interaction, $F(1.34, 29.57) = 2.61$, $p = .09$, partial $\eta^2 = .11$ and $F(1.54, 33.86) = 3.05$, $p = .07$, partial $\eta^2 = .12$, for frontal and centro-parietal clusters, respectively (see Table 19 for statistical detailed results).

Variables	Mean difference (SE)	P	$p_{\text{bonferroni}}$	Effect size (Cohen's d) ^b	CI lower ^a	CI upper ^a
Valence x Hemisphere x Group						
F: WBS RH: Pos old – Pos new > Neu old – Neu new	2.19 (.70)	.002*	.16	/	-0.261	4.65
F: WBS RH: Neg old – Neg new > Neu old – Neu new	1.51 (.70)	.03*	1.00	/	-0.949	3.961
F: Neu old – Neu New RH: TD > WBS	1.78 (.85)	.04*	1.00	/	-1.224	4.792
CP: WBS RH: Pos old – Pos new > Neu old – Neu new	1.59 (.57)	.007*	.45	/	-0.423	3.604
CP: WBS RH: Neg old – Neg new > Neu old – Neu new	1.23 (.57)	.04*	1.00	/	-0.789	3.239

Table 19. DW for the *old/new effect* in WBS and TD groups at frontal and centro-parietal clusters.

^a 95% CI for Mean Difference, ^b Cohen's d does not correct for multiple comparisons. The significant comparisons are indicated by *. Only significant data are reported here, with and without Bonferroni corrections. F: Frontal; CP: Centro-Parietal; LH: left hemisphere; RH: right hemisphere.

Occipital cluster

After applying the Greenhouse-Geisser sphericity correction, the ANOVA yielded a significant Memory Valence x Window interaction, $F(2.69, 59.28) = 3.34$, $p < .03$, partial $\eta^2 = .13$, and a trend toward Memory Valence x Window x Group interaction, $F(2.69, 59.28) = 2.36$, $p = .08$, partial $\eta^2 = .10$. However, post-hoc comparisons were not significant using Bonferroni corrections for multiple comparisons, although some comparisons were significant without this correction. Notably, without correction, the difference in amplitude between negative old and negative new

pictures ($M = 0.70$, $SE = .31$) was more positive during the W1 time window than the difference between positive old and positive new pictures ($M = -0.16$, $SE = .31$), $t(59) = 2.17$, $p < .04$, and the difference between negative old and negative new pictures ($M = 0.63$, $SE = .31$) was also more positive during the W3 time window than that between neutral old and neutral new pictures ($M = -0.27$, $SE = .31$), $t(59) = 2.24$, $p < .03$ (see Table 20 for detailed statistical results).

Variables	Mean difference (SE)	P	$P_{\text{bonferroni}}$	Effect size (Cohen's d) ^b	CI lower ^a	CI upper ^a
Valence x Window						
W1: Neg old – Neg New > Pos old – Pos New	0.87 (.40)	.03*	1.00	/	-0.475	2.214
W3: Neg old – Neg New > Neu old – Neu New	0.90 (.40)	.03*	1.00	/	-0.446	2.243
Valence x Window x Group						
TD W3: Neg old – Neg New > Neu old – Neu new	1.08 (.57)	.06	1.00	/	-1.082	3.243
WBS W3: Pos old – Pos New > Neu old – Neu new	1.07 (.57)	.06	1.00	/	-1.094	3.231
W3 Neg old – Neg new: TD > WBS	1.25 (.63)	.05*	1.00	/	-1.102	3.593

Table 20. DW for the *old/new effect* in WBS and TD groups at occipital cluster.

^a 95% CI for Mean Difference, ^b Cohen's d does not correct for multiple comparisons. The significant comparisons are indicated by *. Only significant data are reported here, with and without Bonferroni corrections. W: Window.

12. Exp3: Discussion

Behavioral results

In Experiment 3, our results showed a general EEM in the recognition task for both groups of participants, along with a *positivity* effect. In fact, positive and negative pictures were better recognized than neutral ones, and positive pictures were also better recognized than negative ones. These results are inconsistent with our hypothesis and the *negativity* effect observed in item recall tasks in the previous two experiments. These diverging results between this experiment and the previous experiments relative to item memory may be due to the type of task, item recognition task vs. item recall task, or to the type of pictures, visual scenes vs. single objects. It is likely that the positive pictures may have benefited from a greater sense of familiarity, which is a phenomenon that can enhance performance in recognition tasks. The process of retrieval based on familiarity differs from that based on recollection in that it does not require a true episodic remembering involving contextual details associated with the item. Instead, a simple feeling of familiarity can lead to the correct recognition of the item. This is particularly likely since it is known from the literature that, compared to negative pictures, the recognition of positive pictures is based more on familiarity than on recollection (Kensinger & Schacter, 2008a) and that young TD children (Ghetti & Angelini, 2008) and individuals with WBS (Costanzo et al., 2013) tend to use familiarity more than recollection processes in recognition tasks. Nevertheless, since the confidence level judgments were unusable in our experiment due to the high rate of 'Very sure' responses given by both groups of participants, it is difficult to disentangle the relative contribution of familiarity and recollection processes in recognition performance in the present study. Moreover, it is interesting to note that the EEM did not change depending on whether the pictures depicted humans or not, which is inconsistent with the findings of Skwerer et al. (2011), who reported reduced reactivity to negative social stimuli when using pictures with visual scenes in individuals with WBS.

Finally, regarding the valence rating of the pictures, as in the first experiment of this study, the pictures were, on average, properly rated in line with the valence category of the DAPS - negative, positive or neutral - by both groups. Once again, this shows that children and adolescents with WBS tend to have a spared ability to rate the emotional valence of pictures, even if they are complex visual scenes.

In this experiment, we also investigated whether behavioral performances might be associated with modulations of neural responses during the encoding (*emotion effect*) and recognition (*old/new effect*) phases in individuals with WBS and TD children.

ERP results – emotion effect

The averaged neural DW seems to reveal an *emotion effect* during the encoding of the pictures in both groups but with some specificities according to the group. More specifically, in the WBS group, the difference in amplitude between the negative and neutral pictures appeared to be more positive-going than that between the positive and neutral pictures during the early time window (W1: 200-400ms) and a reverse pattern seemed to be observed during the late time window (W4: 800-1200ms), mainly at the frontal cluster and indifferently between the hemispheres. These results could indicate an early *negativity effect* and a late *positivity effect* at the frontal cluster for WBS participants, although the early *negativity effect* also seemed to spread to the fronto-central and centro-parietal clusters. In the TD group, the amplitude of the DW appeared to be greater at the occipital cluster in the left hemisphere than in the right hemisphere, revealing a similar *emotion effect* for both negative and positive pictures located mainly at the left posterior sites during all time windows. These results are only partly consistent with our predictions that both groups would have larger ERPs for negative than positive and neutral pictures.

Concerning individuals with WBS, to our knowledge, the only two studies that have investigated ERP responses for emotional stimuli have revealed divergent findings (Haas et al., 2009; Key & Dykens, 2016). In fact, Haas et al. (2009) investigated the difference in amplitude of ERP responses between emotional and neutral facial expressions in adults with WBS (i.e. negative (fearful) minus neutral and positive (happy) minus neutral). The results showed that the WBS group exhibited larger neural responses for happy minus neutral facial expressions during the 300-500ms time window at posterior sites, and smaller responses for fearful minus neutral facial expressions during the 500-700ms time window at right anterior sites, when compared to the TD group matched on chronological age. Moreover, Key & Dykens (2016) investigated the ERP responses for emotional social (faces) and non-social (objects) stimuli in adults with WBS aged from 19 to 59 years and TD adults with the same average chronological age as the WBS group. The results revealed larger LPP responses for negative than positive nonsocial stimuli during the 500-800ms time window at centro-parietal sites for both groups of participants. Moreover, the LPP

responses were larger for positive than negative nonsocial stimuli during the 500-800ms time window at left fronto-temporal sites, while negative stimuli were associated with larger LPP amplitudes in the right hemisphere for both groups of participants. However, compared to Key & Dykens' findings, the *negativity* effect observed in our study appeared earlier (200-400ms) at frontal, fronto-central and centro-parietal sites in the WBS group, and the onset of the *positivity* effect occurred later (800-1200ms) at frontal sites and did not differ between hemispheres. These discrepancies may be due to the tasks involved (processing vs. encoding of emotional pictures), the stimuli used (objects vs. visual scenes) and the age of the participants with WBS (adults vs. children and adolescents). In their review, Hajcak et al. (2010) mention that early LPP may reflect the processing of the emotional qualities of the stimuli, while later LPP may reflect deeper processing related to ongoing evaluations of stimulus meaning. It is therefore possible that negative pictures may have attracted attentional resources at an earlier stage due to their intrinsic motivational properties, while positive pictures require more elaborate cognitive processing. However, it is worth noting that the early *negativity* effect is unlikely to be linked to the anxious nature of individuals with WBS, as research into anxiety tends to show an enhanced early posterior component (around 100-150ms) but diminished early (160-220ms) and late (400-700ms) fronto-central LPP responses to fearful stimuli in high-trait anxiety compared to low-trait anxiety individuals. This suggests early attentional vigilance for threat-related stimuli in anxious individuals coupled with a subsequent threat avoidance (Holmes, Nielsen, & Green, 2008).

Concerning the TD children, our results are consistent with a study by Hajcak & Dennis (2009) that evaluated ERP responses during passive viewing of negative, positive and neutral visual scenes in 5- to 8-year-old TD children. Their results showed larger LPP responses for negative and positive than for neutral pictures during the 500-1000ms time window at bilateral occipital-parietal sites, although no difference between hemispheres was observed, unlike in our own study. Taken together, our results show differences in neural responses to emotional pictures between individuals with WBS and TD children, possibly due to the difference in maturity of the neural networks underlying the *emotion effect* which, according to some studies, shift from occipital sites in middle childhood to more anterior regions in adolescence (Pegg, Dickey, Mumper, Kessel, Klein, & Kujawa, 2019). Hence, individuals with WBS would benefit from more mature neural networks than TD children when encoding emotional pictures, despite their developmental delay.

ERP results – old/new effect

The *old/new effect* also presented some specificities in both groups of participants. In the WBS group, a greater *old/new effect* emerged for the positive and negative than the neutral pictures, albeit being more prominent for positive ones, at right frontal, fronto-central and centro-parietal sites, and the effect seemed to be greater than in TD children for positive pictures at right fronto-central sites. A greater *old/new effect* also seemed to emerge, but to a lesser extent for the positive than the neutral pictures during all time windows in left fronto-central sites and during the W3 time window (600-800ms) at the occipital cluster. In the case of the TD children, the *old/new effect* seemed to be apparent for the negative relative to the neutral pictures during the W3 time window at the occipital cluster and to be larger than in the WBS group.

In the literature, the topographically distinct ERPs associated with the *old/new effect* are thought to reflect relative contributions of familiarity and recollection processes during memory recognition. In particular, the early bilateral frontal component (300-500ms) is associated with the global assessment of the similarity between old and new items that is accompanied by a subjective feeling of familiarity, and the left parietal effect (400-700ms) is sensitive to the amount of retrieved information, which is thought to index recollection. Finally, the sustained and late right frontal effect is associated with post-retrieval monitoring processes, mainly during associative memory retrieval (Sprondel et al., 2011). Thus, in our study, although the *old/new effect* was observed across all time windows equally in the WBS group (from 200 to 800ms), positive and negative pictures benefited most from a greater *old/new effect* than neutral pictures at the right anterior sites. Although there is no strong neural evidence of the contribution of familiarity or recollection processes in our study as a function of the topography and time course of the ERP responses in the WBS group, the effects found at the fronto-central sites lead us to believe that familiarity processes contributed more to the recognition of emotional pictures than recollection processes. Moreover, the largest *old/new effect* for positive pictures seemed to be particularly systematic at the different clusters in the WBS group and also greater than in the TD children at the fronto-central cluster, thus revealing a greater sensitivity in the recognition of positive pictures on the part of the WBS participants.

As far as the TD children are concerned, our results are in line with the study by Leventon et al. (2014) who found that 7.5- to 9-year-old TD children exhibited larger LPP responses to negative old than negative new pictures at posterior sites, although this effect was apparent later (during the 800-1200ms time window) than in our study. However, the authors did not investigate

the *old/new effect* for earlier time windows, but it is known that this effect can emerge around 300ms after stimulus onset in children, adolescents and adults for non-emotional information (Sprondel et al., 2011).

To conclude, the findings from Experiment 3 suggest that the interaction between emotional and memory systems is effective in children and adolescents with WBS and TD children, as observed in the recognition performances and ERP responses. However, some discrepancies between the ERP responses in the two groups indicate that the neural correlates underlying EEM seem to be more mature in the WBS participants than the TD children and, therefore, do not appear to be affected by the former group's developmental disruptions. Hence, these findings provide a direct connection between the effect of emotions on memory observed in behavioral performance as well as physiological responses to emotions during encoding and recognition, in typical and atypical development.

13. General discussion

In the present study, we conducted three experiments to investigate the effect of emotions on item and associative memory in children and adolescents with WBS and TD children. Moreover, in order to generalize the evaluation of EEM to several types of memory in these populations, we used different memory tasks with different types of stimulus to specifically assess visual, verbal and visuo-spatial memory. Across all the experiments and for both groups, an effect of emotions was observed in visual item memory, but this manifested itself differently depending on the type of task (i.e. *negativity* effect in free recall tasks and a general EEM along with a *positivity* effect in the recognition task). An effect of emotions was also observed in verbal item memory, with free-recall performance being better for positive than negative words, albeit with no difference between both negative and positive words and neutral ones. However, the effect of emotions on associative memory was less consistent, with a trend toward a *negativity* effect being observed for the source of the words (gender of the voice in which they were spoken), no EEM being observed for the context of the pictures (type of frames), and a *positivity* effect being observed for the spatial locations of the pictures. Importantly, no difference was reported between the two groups regarding behavioral EEM for any of the tasks, although the WBS group performed worse than the TD group on almost all the tasks. In addition, in the last experiment, some clues were provided regarding the neural responses associated with the *emotion effect* and the *old/new effect* during the encoding and

the recognition of emotional pictures in both groups of participants. Overall, both groups exhibited neural responses to the emotional content of the stimuli during encoding and recognition that were located mainly at anterior sites for the WBS group and at posterior sites for the TD group. Although the participants appeared to be sensitive to the negative and positive pictures, the WBS group seemed more consistently reactive to positive pictures and the TD group to negative ones.

This study is of great relevance in showing for the first time that children and adolescents with WBS can exhibit an EEM similar to that of TD children of a chronological age matched to their mental age, despite the specificities of emotional and memory processes frequently found in WBS. Therefore, the *negativity* effect observed in the free recall tasks and the *positivity* effect observed in the recognition task in the WBS participants could be due to behavioral specificities associated with developmental age, rather than to abnormalities related to WBS. Thus, in both groups of participants, negative pictures might benefit more from the contribution of recollection processes, although moderately so given the poor recall performance, and positive pictures from familiarity processes. In particular, the *negativity* effect observed in our recall tasks is consistent with other studies that have found a memory advantage of negative over positive stimuli in 5- to 11-year-old TD children in recall tasks (Davidson et al., 2001; Van Bergen et al., 2015; Massol et al., 2020). This may be due to adaptive processes that result in greater attentional mobilization for negative than other stimuli at an early age (LoBue & DeLoache, 2008; Vaish, Grossmann, & Woodward, 2008; but for a review, see Morales, Fu, & Perez-Edgar, 2016). Moreover, specificities related to WBS can also explain this *negativity* effect, in particular the anxious nature of individuals with WBS in non-social environmental conditions and their greater emotional bias and reactivity to non-social negative stimuli compared with positive and neutral ones (Dodd & Porter, 2011a; Key & Dykens, 2016; Meyer-Lindenberg et al., 2005). By contrast, the *positivity* effect observed for the retrieval of the spatial locations of pictures in Experiment 2 and for the picture recognition task in Experiment 3 show that specific memory mechanisms seem to favor the retrieval of positive pictures over that of negative and neutral ones in both groups of participants. Although emotional reactivity to positive information was largely demonstrated for social stimuli in the individuals with WBS, our study also shows that positive non-social stimuli can generate greater neural responses during recognition in children and adolescents with WBS and also better behavioral performance in item recognition and spatial associative memory.

Finally, even if an EEM was observed, the emotions did not overcome the memory deficits observed in the individuals with WBS, who performed worse than the TD children on all the tasks

except for the picture recognition task in Experiment 1. Thus picture recognition would seem to be preserved in children and adolescents with WBS, undoubtedly due to the familiarity processes, up to a certain number of items to be recognized. Indeed, their performance was deficient in Experiment 3, in which there were more pictures to recognize. Overall, our results are consistent with studies that have shown relatively preserved abilities in single-item recognition but deficient abilities in binding items with their context or source in individuals with WBS (Jarrold et al., 2007; Costanzo et al., 2013; Mastrogioiuseppe et al., 2019).

In conclusion, this study suggests that emotions may have an impact on the episodic memory of children and adolescents with WBS in the same way as they do on those of TD children of chronological age matched with their own mental age, as observed in the behavioral results of the present study. In addition, the ERP results seem to show that the neural correlates underlying emotional memory were already well developed in the WBS participants and did not appear to be affected by their atypical development. Hence, for the first time, these findings provide evidence of EEM in individuals with WBS, both at the behavioral level thanks to the evaluation of the two main components of episodic memory (item and associative memory) and at the neural level through the evaluation of ERP responses during the encoding and recognition of emotional pictures, thus allowing a more systematic assessment of the EEM in atypical development. Nevertheless, it seems essential to further investigate the EEM in relation to the different types of memory, i.e. verbal, visual and visuo-spatial, using other types of contextual details associated with the items in order to determine whether these results can be replicated and generalized, as well as by using neuro-imaging techniques to further investigate the integrity of the brain regions and connections underlying EEM in WBS. From a broader perspective, we hope that this work will be useful in permitting a better understanding of the functioning of individuals with WBS and therefore in the design of new interventions intended to improve the development of their cognitive abilities and promote their well-being. In the light of this study, one potential intervention could therefore consist in using non-social pleasant stimuli to stimulate visual and visuo-spatial memory in order to improve performance in children and adolescents with WBS.

Acknowledgements:

We warmly thank the children and adolescents and their parents for agreeing to participate in this study. We extend our sincere thanks to the associations and individuals who assisted us in the recruitment of participants for this study. We also thank the researchers I. Cordon, A. Melinder, G. Goodman and R. Edelstein for sharing their DAPS database. We also gratefully thank Joel Brogniart for his help in implementing the experiment, Laura Bon for her help in setting up the EEG working environment and her guidance within the Psychosocial rehabilitation center, as well as Dr. Anne Caclin for her advice on ERP data analysis. We finally thank Timothy Pownall for English proofreading.

This study received funding from a partnership between the Centre Hospitalier Le Vinatier and the University of Lyon 2.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

Appendix:

Experiment 1				
	Pictures		Words	
	Valence	Arousal	Valence	Arousal
Negative	2.98 (.49)	4.97 (.85)	3.53 (.64)	5.10 (.53)
Positive	7.24 (.48)	4.83 (.89)	7.01 (.73)	5.42 (.88)
Neutral	5.44 (.26)	2.38 (.37)	4.93 (.31)	3.79 (.26)

Table 21. Experiment 1 - Mean ratings of emotional valence and arousal of stimuli. Standard deviations are in parentheses.

Note: Ratings for pictures are based on the evaluation of 30 adults from 18 to 30 years old ($M = 22.47$, $SD = 3.03$) and ratings for words are from the FANchild database. Valence and arousal are rated on a scale from 1 (very negative/not arousing at all) to 9 (very positive/highly arousing).

Experiment 2		
Pictures	Valence	Arousal
Negative	2.98 (.47)	5.01 (.94)
Positive	7.23 (.43)	4.88 (.68)
Neutral	5.28 (.23)	2.13 (.27)

Table 22. Experiment 2 - Mean ratings of emotional valence and arousal of pictures. Standard deviations are in parentheses.

Note: Ratings for pictures are based on the evaluation of 30 adults from 18 to 30 years old ($M = 22.47$, $SD = 3.03$). Valence and arousal are rated on a scale from 1 (very negative/not arousing at all) to 9 (very positive/highly arousing).

Experiment 3			
Pictures	Valence^a	Arousal^a	Complexity^b
Negative	3.19 (.34)	6.14 (.91)	2.54 (.52)
Positive	7.42 (.43)	6.17 (.74)	2.37 (.54)
Neutral	5.95 (.42)	3.89 (.52)	2.34 (.48)

Table 23. Experiment 3 - Mean ratings of emotional valence, arousal and visual complexity of pictures from the DAPS database. Standard deviations are in parentheses.

^aValence and arousal are rated on a scale from 1 (very negative/not arousing at all) to 9 (very positive/highly arousing)

^bVisual complexity is rated on a scale from 1 (very simple) to 4 (very complex)

Experiment 1		WBS group (N = 16)	TD group (N = 16)
Pictures			
Free recall / 8			
	Negative	1.81 (.29)	2.31 (.29)
	Positive	1.25 (.29)	1.56 (.29)
	Neutral	0.75 (.29)	1.06 (.29)
Associative recall (context: frames) / 8			
	Negative	3.94 (.33)	4.25 (.33)
	Positive	4.19 (.33)	4.63 (.33)
	Neutral	3.75 (.33)	4.13 (.33)
Corrected Recognition / 8			
	Negative	7.37 (.41)	7.69 (.41)
	Positive	7.19 (.41)	7.69 (.41)
	Neutral	6.75 (.41)	7.50 (.41)
Valence rating (from 1 to 9)			
	Negative	2.67 (.30)	3.00 (.30)
	Positive	7.61 (.30)	7.73 (.30)
	Neutral	5.47 (.30)	6.19 (.30)
Words			
Free recall / 8			
	Negative	0.56 (.29)	1.00 (.29)
	Positive	0.94 (.29)	1.94 (.29)
	Neutral	0.88 (.29)	1.31 (.29)
Associative recall (source: voice gender) / 8			
	Negative	3.44 (.33)	4.06 (.33)
	Positive	2.81 (.33)	3.31 (.33)
	Neutral	2.38 (.33)	4.00 (.33)
Corrected Recognition / 8			
	Negative	5.31 (.41)	6.63 (.41)
	Positive	5.06 (.41)	5.81 (.41)
	Neutral	4.75 (.41)	6.50 (.41)

Table 24. Mean correct response scores for free recall, associative recall and corrected recognition for negative, positive and neutral stimuli (pictures and words), as well as mean valence rating scores for pictures, in Experiment 1. Standard errors are in parentheses.

Experiment 2		WBS group (N = 16)	TD group (N = 16)
Pictures			
Free recall / 12			
	Negative	1.72 (.33)	2.91 (.33)
	Positive	1.44 (.33)	1.66 (.33)
	Neutral	1.22 (.33)	1.56 (.33)
Associative recall (spatial location) / 12			
	Negative	5.22 (.53)	9.75 (.53)
	Positive	6.19 (.53)	10.31 (.53)
	Neutral	4.94 (.53)	9.25 (.53)

Table 25. Mean correct response scores for free recall and associative recall for negative, positive and neutral pictures in Experiment 2. Standard errors are in parentheses.

Experiment 3		WBS group (N = 12)	TD group (N = 12)
Pictures			
Proportions of Corrected Recognition			
	Negative	0.74 (.06)	0.92 (.06)
	Positive	0.78 (.06)	0.96 (.06)
	Neutral	0.67 (.06)	0.89 (.06)
Valence rating (from 1 to 9)			
	Negative	3.01 (.51)	2.48 (.51)
	Positive	6.87 (.51)	7.12 (.51)
	Neutral	5.56 (.51)	5.63 (.51)

Table 26. Mean proportions of corrected recognition scores for negative, positive and neutral pictures, as well as mean valence rating scores for pictures, in Experiment 3. Standard errors are in parentheses.

14. Conclusion

Nous avons présenté, ci-dessus, l'Étude 3 de ce travail de thèse qui s'est intéressée à l'EEM chez les enfants et adolescents porteurs du SWB âgés de 8 à 18 ans, en comparaison avec des enfants au DT âgés de 5 à 9 ans et ayant un âge chronologique équivalent à l'âge mental des individus avec SWB. Trois expériences ont été réalisées afin d'évaluer l'EEM d'un point de vue comportemental et neurophysiologique. Les deux premières expériences comportementales visaient à analyser l'influence des émotions sur les deux composants principaux de la mémoire épisodique : mémoire de l'item et mémoire associative, à l'aide de différents types de stimuli (images et mots) et contextes de présentation de stimuli (visuel, auditivo-verbal, visuo-spatial). La dernière expérience s'est intéressée aux corrélats neuronaux associés à l'EEM durant l'encodage et la reconnaissance d'images, grâce à la technique des PE (mesures du LPP et de l'effet ancien/nouveau). L'objectif de cette étude était d'apporter de nouvelles connaissances concernant l'EEM dans le SWB et son éventuelle modulation selon le type de mémoire évalué. Dans l'ensemble, cette étude a démontré la présence d'un EEM chez les enfants et adolescents porteurs du SWB pour les différents types de mémoire évalués (verbal, visuel et visuo-spatial). En outre, l'EEM était présent pour toutes les tâches évaluant la mémoire de l'item, ainsi que pour la tâche évaluant la mémoire associative visuo-spatiale. De façon importante, les résultats concernant l'EEM étaient similaires dans les deux groupes de participants. En revanche, bien que les émotions aient participé à l'amélioration des performances des individus porteurs du SWB, elles n'ont pas permis de contrecarrer les déficits mnésiques observés dans ce groupe qui avait des performances mnésiques plus faibles que le groupe contrôle dans la majorité des tâches. En outre, les réponses neuronales semblent indiquer que les corrélats neuronaux sous-tendant l'EEM seraient déjà mis en place dans le groupe d'individus porteurs du SWB et ne sembleraient pas être affectés par leur développement atypique.

Partie 3.

Discussion générale.

Discussion générale

L'objectif principal de ce travail de thèse était, dans un premier temps, d'étudier l'émergence et les mécanismes de l'EEM chez les enfants au développement typique, à la lumière de la littérature et des modèles théoriques existants chez l'adulte, et dans un deuxième temps d'étudier comment certains troubles neuro-développementaux entraînant des dysfonctionnements émotionnels et mnésiques comme le syndrome de Williams-Beuren, pouvaient affecter les mécanismes sous-tendant l'EEM au cours du développement. Ces questionnements étaient appréhendés grâce à des mesures comportementales et neurophysiologiques qui nous ont permis d'élargir les connaissances sur les mécanismes cognitifs et neuronaux sous-jacents, à la fois pour le développement typique et atypique. Dans cette dernière partie, nous reviendrons sur les principaux résultats obtenus auprès de nos deux populations d'intérêt ainsi que les apports théoriques concernant les mécanismes sous-jacents à l'EEM que nous pourrions dégager à partir de ces résultats. Nous évoquerons également les limites et les perspectives théoriques ouvertes par ce travail de recherche concernant l'EEM au cours du développement typique et atypique, avant de faire une conclusion générale sur l'ensemble de ce travail.

I. Discussion des résultats expérimentaux

1. EEM immédiat : données comportementales

La première partie de ce travail de thèse a permis de prouver l'existence d'un EEM immédiat à la fois en mémoire de l'item et en mémoire associative chez les enfants au DT, suggérant un effet des émotions sur la mémoire épisodique dans sa globalité. Nos études ont ainsi montré que les émotions entraînaient une augmentation de la quantité d'informations récupérées en mémoire chez les enfants, mais également une meilleure récupération des détails du souvenir épisodique, au même

titre que chez les adultes. Par ailleurs, l'apparition fréquente d'un effet de *négativité* en mémoire chez les enfants, de façon plus systématique que dans le groupe d'adultes, associé à une modulation plus importante du LPP lors du traitement des stimuli négatifs (voir ci-dessous pour la discussion des données neurophysiologiques), révèle une sensibilité accrue aux stimuli négatifs chez les enfants. Ces résultats sont en accord avec l'hypothèse du biais attentionnel envers les stimuli négatifs observé très tôt au cours du développement et décrit dans le modèle développemental de Morales et al. (2016). Il se pourrait, ainsi, que les enfants âgés entre 8 et 11 ans n'aient pas les capacités de réguler efficacement les émotions négatives du fait du développement lent et progressif des régions cérébrales sous-tendant cette régulation jusqu'à la fin de l'adolescence (pour une revue, voir Casey et al., 2019). En outre, il convient de noter que l'EEM est apparu chez les enfants malgré le fait que certains processus mnésiques soient encore immatures dans cette population comparativement aux adultes. En effet, les enfants avaient des performances plus faibles que les adultes notamment pour les tâches de rappel libre des stimuli et les tâches de mémoire associative impliquant le rappel de la localisation spatiale des stimuli. Ces résultats sont en accord avec des études ayant montré un développement lent et progressif du processus de recollection (pour une revue voir, Alibrán et al., 2018) et de la récupération du contexte spatial d'un événement (Guillery-Girard et al., 2013 ; Picard et al., 2017) avec l'âge.

Après avoir obtenu de plus amples connaissances sur l'EEM au cours du développement typique dans la première partie de ce travail de thèse, la deuxième partie s'est penchée sur le cas de l'EEM chez les enfants et adolescents porteurs du SWB qui est un trouble neuro-développemental engendrant des dysfonctionnement émotionnels et mnésiques. L'approche neuropsychologique adoptée dans cette deuxième partie nous permettait d'étudier les facteurs susceptibles de moduler l'EEM lors du développement atypique, en lien avec les altérations présentes au niveau des mécanismes mnésiques et émotionnels, et ainsi bénéficier d'une meilleure compréhension des mécanismes sous-jacents à l'EEM. Notre étude a pu démontrer pour la première fois l'existence d'un EEM immédiat chez les enfants et adolescents porteurs du SWB, et ceci pour les différents types de mémoire évalués : verbal, visuel et visuo-spatial, et de façon similaire aux enfants du groupe contrôle. En outre, l'EEM apparaissait dans les deux groupes de participants pour toutes les tâches évaluant la mémoire de l'item, mais se manifestait différemment selon la tâche, particulièrement pour la mémoire visuelle : un effet de *négativité* était observé lors du rappel libre des images et un EEM général accompagné d'un effet de *positivité* était observé lors de la reconnaissance des images.

Ces résultats semblent indiquer une influence différentielle de la valence des informations sur la mémoire de l'item selon le type de tâche effectué dans les deux groupes de participants. Par ailleurs, le fait que ces résultats soient observés à la fois dans le groupe avec SWB et dans le groupe contrôle, suggère que l'EEM serait modulé par des spécificités comportementales relatives à l'âge développemental plutôt qu'à des anomalies liées au syndrome. Ainsi, il est possible que, pour des enfants au DT jeunes (âgés de 5 à 9 ans) et pour des enfants et adolescents présentant une déficience intellectuelle, les émotions agissent différemment suivant le processus mnésique impliqué. Il se pourrait donc que le processus de recollection, impliqué majoritairement dans les tâches de rappel libre, soit principalement influencé par les émotions négatives, et que le processus de familiarité, impliqué dans les tâches de reconnaissance, soit principalement influencé par les émotions positives dans ces deux populations. Cependant, les tâches de reconnaissance pouvant engager à la fois le processus de recollection et celui de familiarité, nos données ne permettent pas de savoir précisément sur quel processus se sont basés les participants pour reconnaître les images. De futures études sont donc nécessaires pour confirmer ou infirmer cette hypothèse. En outre, il convient de noter que l'EEM est apparu dans le groupe avec SWB malgré le fait que certains processus mnésiques présentent des déficits comparativement aux enfants contrôles. En effet, le processus de recollection semble particulièrement déficitaire chez les individus porteurs du SWB au vu des performances mnésiques plus faibles observées dans les tâches de rappel libre et de mémoire associative par rapport au groupe contrôle. En revanche, les performances pour les tâches de reconnaissance de stimuli étaient préservées jusqu'à une certaine quantité d'informations à reconnaître, suggérant que le processus de familiarité peut aider, dans une certaine mesure, la récupération en mémoire dans le SWB. Ces résultats sont en accord avec des études ayant montré la préservation relative du processus de familiarité et la contribution réduite du processus de recollection dans le SWB (Costanzo, Vicari, & Carlesimo, 2013 ; Mastrogiuseppe et al., 2019).

Dans l'ensemble, les données comportementales obtenues dans ce travail de thèse montrent que l'interaction entre mémoire et émotions se produirait de façon relativement précoce au cours du développement, permettant l'émergence d'un EEM chez les enfants au DT et chez les enfants et adolescents porteurs du SWB, alors même que certains processus mnésiques n'ont pas acquis un niveau de développement mature et/ou présentent des altérations. En effet, bien que le processus de recollection mnésique ne soit pas pleinement développé dans le cas des enfants au DT et soit déficitaire dans le cas des individus avec SWB, celui-ci était modulé par les émotions dans les deux

cas. Par ailleurs, la valence émotionnelle des informations semblait influencer différemment le processus de recollection et de familiarité chez les enfants au DT âgés de 5 à 9 ans et chez les individus avec SWB. Ces résultats font ainsi émerger plusieurs questions : tout d'abord, à quel stade du développement l'interaction entre mémoire et émotions devient-elle fonctionnelle ? Ensuite, est-ce que tous les processus mnésiques sont susceptibles d'être influencés par les émotions au même stade du développement ? Et enfin, à quel point l'altération de certains processus mnésiques peut influencer l'EEM ? Pour répondre à ces questions, il semble important, dans de futures études, d'inclure plusieurs groupes d'individus avec des âges variés et d'étendre la fourchette d'âge afin d'inclure des enfants plus jeunes. Ceci afin d'évaluer les mécanismes sous-tendant l'EEM en lien avec le développement progressif des systèmes mnésique et émotionnel dès le plus jeune âge. Une étude de Salzwedel, Stephens, Goldman, et al. (2019) s'est notamment intéressée au développement des régions cérébrales responsables du traitement émotionnel depuis le stade néonatal jusqu'à l'âge de 2 ans. Les auteurs ont mis en évidence une connectivité fonctionnelle précoce entre l'amygdale et l'hippocampe et le cortex para-hippocampique au stade néonatal. Ceci suggère que l'interaction entre les régions responsables du traitement émotionnel et les régions liées aux processus mnésiques serait présente dès la naissance, et pourrait potentiellement soutenir l'émergence de l'EEM dès le plus jeune âge. En revanche, l'EEM immédiat pouvant également reposer sur des facteurs cognitifs sous-tendus par la région frontale, comme discuté en détails ci-dessous, le développement plus tardif de cette région (Gogtay et al., 2004) pourrait retarder l'apparition de l'EEM au cours du développement malgré la présence de connexions précoces entre l'amygdale et l'hippocampe. En outre, le développement progressif des régions cérébrales sous-tendant la mémoire épisodique (pour des revues, voir Ofen, 2012 et Mullally & Maguire, 2014) et le traitement et la régulation des émotions (pour une revue, voir Michalska & Davis, 2019), laisse présager que l'interaction entre mémoire et émotions serait également soumise à une maturation lente et progressive, pouvant entraîner une variation de l'EEM au cours du développement.

2. EEM immédiat : données neurophysiologiques

Ce travail de thèse s'est également intéressé aux corrélats neuronaux sous-tendant l'EEM dans nos deux populations d'intérêt grâce à la technique de l'EEG. Concernant les enfants au DT, nos travaux ont démontré, pour la première fois, l'existence de modulations neuronales lors de

l'encodage d'images émotionnelles chez l'enfant pouvant prédire l'EEM au niveau comportemental dans les tâches de rappel libre. En effet, le LPP était amplifié lors de la présentation des images négatives comparativement aux images neutres lors de l'encodage. De plus, le LPP était particulièrement amplifié lors de l'encodage efficace des images négatives et positives (i.e. donnant lieu à un rappel ultérieur) par rapport aux images neutres, en accord avec l'EEM observé au niveau comportemental. Ces modulations neuronales étaient visibles au niveau antérieur du cerveau, majoritairement frontal, et durant les fenêtres temporelles tardives d'apparition de l'image.

Concernant les enfants et adolescents porteurs du SWB, l'analyse de leurs réponses neuronales semblait indiquer un effet de *négativité* précoce et un effet de *positivité* tardif au niveau frontal lors de l'encodage des images. De plus, un effet de *positivité* était observé lors de la reconnaissance des images au niveau des régions antérieures avec une prédominance hémisphérique droite. Pour le groupe contrôle d'enfants au DT, un effet des émotions négatives et positives semblait apparaître au niveau occipital gauche lors de la phase d'encodage. Ces différences de réponses neuronales entre les groupes semblent indiquer que les corrélats neuronaux sous-tendant l'EEM sont plus matures chez les individus porteurs du SWB et ne paraissent pas affectés par leur développement atypique. En effet, selon certaines études, la distribution topographique du LPP migrerait au cours du développement de la région postérieure chez les enfants vers des régions plus antérieures chez les adolescents (e.g., Pegg et al., 2019). Toutefois, il convient de noter que les analyses des réponses neuronales dans notre étude n'ont été réalisées que sur des petits groupes de participants et n'ont pas une grande puissance statistique, elles doivent donc être considérées comme préliminaires. Des études en neuro-imagerie supplémentaires sont donc nécessaires pour analyser en profondeur les corrélats neuronaux sous-tendant l'EEM dans le SWB. Ceci permettrait de bénéficier d'une meilleure compréhension de la dynamique temporelle de l'interaction entre mémoire et émotions dans le SWB, et d'obtenir davantage d'informations sur l'intégrité des structures cérébrales impliquées dans l'EEM ainsi que sur leur connectivité.

Dans l'ensemble, les données neurophysiologiques obtenues dans ce travail de thèse semblent montrer que les enfants au DT âgés de 8 à 11 ans et les enfants et adolescents avec SWB s'appuieraient sur des processus cognitifs sous-tendus par la région frontale pour encoder ou récupérer des informations émotionnelles en mémoire. En effet, une augmentation du potentiel LPP était observée au niveau frontal lors de l'encodage efficace des images émotionnelles dans le

groupe au DT et au niveau fronto-central droit lors de la reconnaissance des images positives dans le SWB, comparativement aux images neutres, bien que les résultats pour les individus avec SWB soient préliminaires. Le rôle du CPF dans l'émergence d'un EEM a notamment été relevé dans la littérature via l'implication de mécanismes *top-down*, à savoir la mise en place de stratégies mnémotechniques, l'élaboration de liens sémantiques, la mémoire de travail et les processus attentionnels, par opposition aux mécanismes *bottom-up*, reflétant l'influence de mécanismes neuro-hormonaux directs au niveau de l'amygdale et du LTM (pour une revue, voir Dolcos, Iordan, & Dolcos, 2011). Si nos travaux n'apportent pas d'indication concernant l'implication des mécanismes *bottom-up* dans l'apparition de l'EEM dû au manque de résolution spatiale de la technique de l'EEG qui ne permet pas d'analyser l'activité de structures sous-corticales telles que l'amygdale et l'hippocampe, il est, en revanche, possible d'envisager que l'EEM dans nos deux populations puisse reposer sur l'implication de facteurs cognitifs indirects sous-tendus par le CPF. Nos résultats pourraient, ainsi, être interprétés dans la perspective du modèle de la médiation cognitive qui stipule que la modulation de ces facteurs cognitifs serait à l'origine de l'émergence de l'EEM immédiat (Talmi, 2013). Ces résultats ouvrent la voie à de futures recherches pour analyser plus en détails les facteurs cognitifs (e.g., attention, organisation sémantique, *distinctivité*) impliqués dans l'apparition de l'EEM immédiat au cours du développement typique et atypique et pouvoir tester l'applicabilité sur le plan développemental des modèles théoriques de l'EEM existants chez l'adulte.

3. EEM à long terme

Ce travail de thèse s'est intéressé à l'influence des émotions sur la mémoire épisodique après un intervalle de temps relativement court (quelques minutes), rendant uniquement compte des spécificités de l'EEM immédiat dans le développement typique et atypique. Or, nous avons vu dans la Partie 1, Chapitre 1, sous-chapitre III, que les émotions pouvaient également influencer le processus de consolidation des informations en mémoire, engendrant ainsi un EEM à long terme (après plusieurs heures, voire plusieurs jours). Ce phénomène est expliqué dans le cadre du modèle de la consolidation, par la sécrétion d'hormones de stress dans le corps (épinéphrine et cortisol) lors d'un événement émotionnel, qui va entraîner l'activation du noyau basolatéral de l'amygdale qui modulerait ensuite la consolidation des traces mnésiques par l'hippocampe (McGaugh, 2018).

L'implication de l'amygdale et de l'hippocampe a également été soulignée lors de la récupération correcte de stimuli émotionnels un an après l'encodage initial chez l'adulte normotypique (Dolcos, LaBar, & Cabeza, 2005). Par ailleurs, certaines études se sont notamment intéressées à l'EEM à long terme chez des enfants au DT âgés entre 9 et 13 ans et ont montré qu'ils présentaient un EEM plus important après une nuit de sommeil comparativement à une période d'éveil (Prehn-Kristensen et al., 2009, 2013), suggérant une influence précoce des émotions sur la consolidation en mémoire et donc une influence précoce de l'amygdale sur l'hippocampe dans le développement typique. En outre, compte tenu des anomalies neurobiologiques observées dans certaines études au niveau hippocampique dans le SWB (Meyer-Lindenberg et al., 2005), il se pourrait que l'EEM à long terme se manifeste différemment dans cette population, voire qu'il soit altéré. Ainsi, il paraît important de comparer l'EEM immédiat et l'EEM à long terme dans cette population afin de pouvoir dégager d'éventuelles différences au niveau des mécanismes cognitifs et neurobiologiques mis en jeu. En effet, si l'EEM à long terme est altéré, cela pourrait indiquer que les individus avec SWB ont potentiellement utilisé des mécanismes compensatoires, basés sur des processus cognitifs plutôt dépendants de la région frontale, lors de la récupération immédiate des informations émotionnelles, qui ne pourraient pas être recrutés lors de la récupération à long terme. De futures études sont donc nécessaires pour préciser les spécificités de l'EEM immédiat en comparaison avec l'EEM à long terme dans le DT et dans le SWB, afin d'avoir une meilleure compréhension des mécanismes sous-jacents et de leur intégrité.

4. Rôle des processus d'encodage, de consolidation et de récupération dans l'EEM

De nombreux travaux dans la littérature chez l'adulte normotypique ont montré que les émotions pouvaient avoir une influence sur chaque processus mnésique, à savoir l'encodage, la consolidation et la récupération des informations (pour une revue, voir Dolcos et al., 2017). En effet, les stimuli émotionnels sont préférentiellement encodés dû notamment à un renforcement du traitement perceptif et attentionnel de ces stimuli comparativement aux stimuli neutres. De plus, ils bénéficieraient d'une consolidation privilégiée en mémoire et impliqueraient majoritairement le processus de recollection lors de leur récupération en mémoire, entraînant une récupération vivace et détaillée de l'épisode d'encodage. En outre, l'amygdale aurait un rôle prépondérant dans chacun de ces processus mnésiques pour favoriser la mémorisation des stimuli émotionnels, en lien étroit

avec plusieurs régions corticales et sous-corticales, notamment au niveau du LTM et du CPF (Dolcos et al., 2017). Les modèles théoriques de l'EEM existants dans la littérature, notamment les modèles de la médiation cognitive et de la consolidation, se sont surtout penchés sur l'effet des émotions sur les processus d'encodage et de consolidation mnésique. Cependant, l'influence additionnelle que peuvent avoir les émotions sur le processus de récupération commence à susciter davantage l'intérêt des chercheurs. En effet, le modèle computationnel *emotional Context Maintenance and Retrieval Model* (eCMR) développé récemment par Talmi, Lohnas, & Daw (2019), fait des prédictions sur le rôle essentiel du processus de récupération, en interaction avec le processus d'encodage, dans l'apparition d'un EEM. En effet, ce modèle postule que lors de l'encodage, les stimuli présentés sont associés à « un contexte de source » spécifique à l'épisode d'encodage. Lorsque des items émotionnels sont encodés, ils entraîneraient une mise à jour du contexte de source qui se transformerait en contexte émotionnel. Ainsi, les items émotionnels partageraient entre eux un contexte d'encodage commun que ne partageraient pas les items neutres. Cette mise à jour du contexte de source en contexte émotionnel lors de l'encodage rendrait le contexte de récupération également émotionnel, lorsque celui-ci se produit rapidement après l'encodage. Il en résulterait finalement une facilitation du rappel des items associés à ce contexte, c'est-à-dire des items émotionnels. De plus, le rappel d'un item émotionnel favoriserait ensuite le rappel d'un autre item émotionnel dû au fait qu'ils partagent un contexte de source commun, et également qu'ils partagent des liens sémantiques, entraînant finalement une plus grande quantité d'items émotionnels rappelés comparativement aux items neutres. Ce modèle explique ainsi comment les processus d'encodage et de récupération interagissent pour aboutir à des performances en mémoire dépendantes du contexte.

Chez l'enfant au DT, très peu d'études se sont intéressées à l'effet des émotions sur les différents processus mnésiques, entraînant un manque de connaissance sur les mécanismes à l'origine de l'émergence de l'EEM au cours du développement. Leventon et al. (2014, 2016) ont notamment montré que les émotions pouvaient influencer la récupération d'informations en mémoire un à cinq jours après l'encodage initial chez des enfants âgés de 7,5 à 9 ans. En particulier, ceci était reflété par la modulation émotionnelle de leurs réponses neuronales lors de la phase de reconnaissance. De plus, comme évoqué ci-dessus, Prehn-Kristensen et al. (2009, 2013) ont indiqué que les émotions pouvaient influencer la consolidation des informations après une nuit de sommeil chez des enfants âgés de 9 à 13 ans. Par ailleurs, les travaux réalisés dans ce travail de thèse semblent montrer que les

émotions influenceraient l'encodage des informations chez des enfants de 8 à 11 ans, comme indiqué par la modulation émotionnelle de leurs réponses neuronales lors de l'encodage efficace des stimuli. Ainsi, bien qu'il semblerait que chacun des processus mnésiques (encodage, consolidation, récupération) soit modulé par les émotions chez les enfants au DT, il n'est pas encore clair si l'influence des émotions sur chacun de ces processus suit une trajectoire développementale propre, à quel stade du développement ces interactions émergent, et est-ce qu'elles sont nécessaires à l'apparition d'un EEM comportemental. Par ailleurs, les nouveaux modèles de l'EEM développés chez l'adulte, à savoir le modèle eCMR qui stipule que les conditions de la récupération influencent quels items sont spécifiquement rappelés, est à prendre en compte dans de futures études chez l'enfant. Ce modèle pourrait peut-être expliquer l'effet de *négativité* fréquemment observé chez les enfants dans les tâches de rappel, et également chez les adultes, avec le fait que les stimuli négatifs seraient plus susceptibles de modifier le contexte de source en contexte négatif lors de l'encodage, entraînant finalement un rappel ultérieur plus important de ces stimuli. De futures études sont nécessaires pour tester cette hypothèse. En outre, chez les enfants et adolescents porteurs du SWB, nos données neurophysiologiques préliminaires semblent montrer que les émotions auraient une influence sur les processus d'encodage et de récupération en mémoire. En revanche, nos résultats doivent être confirmés et étendus dans de futures études afin d'avoir une idée plus précise des processus mnésiques qui sont spécifiquement modulés par les émotions dans le SWB, et l'impact que cela peut avoir dans l'apparition d'un EEM comportemental. Néanmoins, notre étude ayant évalué l'EEM immédiat, nous pouvons d'ores-et-déjà indiquer que les émotions peuvent avoir une influence sur la mémoire épisodique dans le DT et dans le SWB, sans que le processus de consolidation ne soit impliqué.

5. Nouvelles connaissances sur le syndrome de Williams-Beuren

Le syndrome de Williams-Beuren étant une maladie rare et relativement peu étudiée dans la littérature, un autre objectif de ce travail de recherche était de mieux identifier les mécanismes cognitifs qui sont altérés ou préservés chez les individus porteurs du syndrome, afin de contribuer *in fine* au développement de nouveaux outils thérapeutiques. Nos travaux ont permis de démontrer que les déficits observés au niveau des performances mnésiques chez les enfants et adolescents porteurs du SWB n'ont pas été un frein à l'apparition d'un EEM. Ceci suggère que les déficits

mnésiques fréquemment observés dans le SWB pourraient être dus en partie à un déficit de certains mécanismes cognitifs nécessaires à l'encodage et à la récupération efficace des informations en mémoire, plutôt qu'à un seul dysfonctionnement des processus mnésiques. En effet, le modèle de la médiation cognitive développé chez l'adulte normotypique (Talmi, 2013) stipule que les stimuli émotionnels, comparativement aux stimuli neutres, capturent davantage de ressources attentionnelles, sont dotés d'attributs uniques qui les rendent plus distinctifs et partagent des liens sémantiques forts qui permettent une meilleure organisation conceptuelle de ces stimuli, ce qui concourrait finalement à la facilitation des processus d'encodage et de récupération de ces stimuli. Les émotions pourraient donc favoriser l'implication de ces facteurs cognitifs durant l'encodage et la récupération des informations chez les enfants et adolescents porteurs du SWB, améliorant finalement leurs performances mnésiques. Ceci est en accord avec une étude de Greer et al. (2014) qui a montré que lorsque les individus porteurs du SWB étaient incités à réaliser un encodage profond, grâce à la réalisation de catégorisation sémantique des stimuli, leurs performances en mémoire étaient améliorées comparativement à un encodage uniquement perceptif. Les individus avec SWB pourraient donc majoritairement présenter des difficultés au niveau attentionnel et exécutif (Costanzo, Varuzza, Menghini, et al., 2013) plutôt que de réels déficits mnésiques. La présentation de stimuli émotionnels pourrait donc permettre de stimuler automatiquement et involontairement leurs habiletés cognitives, entraînant finalement un meilleur encodage et une meilleure récupération de ces stimuli en mémoire. En revanche, même si les émotions ont contribué à l'amélioration des performances mnésiques, elles n'ont pas permis de contrecarrer entièrement les déficits mnésiques observés chez les individus avec SWB qui avaient des performances mnésiques plus faibles dans la plupart des tâches comparativement au groupe contrôle. Néanmoins, dans notre étude, les tâches réalisées durant les phases d'encodage des stimuli n'incitaient pas toujours la mise en place d'un encodage profond, bien qu'elles permettaient de focaliser l'attention des participants sur les stimuli. Il semble donc important d'évaluer, dans de futures études, si l'implication automatique de facteurs cognitifs lors de l'encodage des stimuli émotionnels additionnée à une tâche favorisant un encodage profond, peuvent potentialiser l'EEM chez les individus avec SWB et éventuellement corriger leurs déficits en mémoire. De plus, une analyse approfondie des différents facteurs cognitifs impliqués dans l'encodage des stimuli émotionnels chez les individus avec SWB est nécessaire afin d'évaluer l'implication spécifique de chacun d'entre eux dans l'apparition de l'EEM dans cette population. En pratique, ces résultats pourraient être utiles dans la création de nouveaux outils de soins permettant d'optimiser l'encodage en mémoire chez les individus porteurs

du SWB, ce qui pourrait contribuer finalement à l'amélioration de leurs capacités mnésiques au quotidien.

II. Limites et perspectives

Bien que ce travail de thèse ait manifestement contribué à l'apport de nouvelles connaissances concernant l'EEM durant le développement typique et atypique, certains points n'ont pas été investigués et méritent d'être appréhendés dans de futures études.

Tout d'abord, les études réalisées dans ce travail sont transversales et non longitudinales, c'est-à-dire qu'elles comparent l'EEM pour différents groupes de participants à une période précise du développement et à un instant donné, mais n'évaluent pas les changements pouvant émerger progressivement au cours du développement chez les mêmes individus. Certaines limites des études transversales reposent sur une confusion entre les différences d'âges et les différences entre les groupes de participants. En effet, dans notre cas, les enfants au DT et les adultes ainsi que les individus avec SWB et les enfants contrôles, présentent des différences à plusieurs niveaux (âge, apprentissage, expérience de vie, environnement etc.) qui pourraient potentiellement affecter la nature de l'EEM et entraîner des variabilités entre les groupes. Par ailleurs, les études transversales rendent difficile la constitution d'échantillons de participants appariés, particulièrement dans le cas de l'étude d'une population présentant une déficience intellectuelle comme pour les enfants et adolescents avec SWB. L'importance d'un suivi longitudinal a notamment été relevé par De Ribaupierre (1989, 2015) par le fait qu'il apporte une description plus précise des changements développementaux en suivant le même échantillon de participants au cours du temps, qu'il a un « pouvoir prédictif » dans le sens où des changements développementaux peuvent prédire les comportements futurs, et permettre ainsi d'identifier les causes de comportements inadaptés, et finalement qu'il permet de prendre en considération la variabilité intra-individuelle. Des désavantages sont, néanmoins, inhérents à l'approche longitudinale, à savoir la lourdeur du paradigme expérimental, notamment la difficulté de trouver des participants qui puissent être suivis sur une longue période de temps, la mortalité expérimentale, la longueur et le délai d'acquisition des données, ainsi que les effets de re-test d'une passation à l'autre qui peuvent se confondre avec

l'effet de l'avancée en âge. Toutefois, il serait intéressant d'analyser avec une approche longitudinale ces changements progressifs qui apparaissent depuis l'enfance jusqu'à l'âge adulte, et qui pourraient notamment moduler l'émergence de l'EEM au niveau comportemental mais aussi au niveau cérébral. En effet, l'analyse du développement des systèmes mnésique et émotionnel ainsi que leur interaction est importante pour mieux comprendre les mécanismes sous-jacents à l'EEM et pour déterminer à quelle étape du développement celui-ci se met en place. Bien qu'aucune étude n'ait évalué l'EEM avec une approche longitudinale au cours du développement à notre connaissance, des premiers indices ont néanmoins été révélés concernant le développement mnésique (Lee et al., 2019) et émotionnel (Kujawa et al., 2013 ; Salzwedel et al., 2019) grâce à des études longitudinales. Lee et al. (2019) ont notamment mis en évidence que l'augmentation des performances en mémoire associative pour différents types d'association (associations avec des informations temporelles, spatiales et inter-item) au cours du développement était liée à la maturation spécifique de certaines subrégions de l'hippocampe, notamment entre l'âge de 7 et 15 ans. Concernant le développement émotionnel, Kujawa et al. (2013) ont mis en exergue la stabilité de la modulation du LPP lors du traitement émotionnel chez des enfants âgés entre 8 et 13 ans sur une période de 2 ans, bien que l'amplitude du LPP diminuait avec le temps principalement au niveau occipital, suggérant une maturation des régions cérébrales responsables du traitement émotionnel à ce stade du développement. Par ailleurs, Salzwedel et al. (2019) ont relevé des changements développementaux au niveau de l'amygdale et de ses connexions fonctionnelles avec d'autres régions corticales et sous-corticales du cerveau durant les deux premières années de vies. En effet, leur étude a mis en évidence une augmentation de la connectivité positive entre l'amygdale et le CPF médian et de la connectivité négative entre l'amygdale et le CPF latéral et le cortex pariétal, responsables de la régulation émotionnelle, durant les deux premières années de vie. De façon importante, le développement de la connectivité fonctionnelle de l'amygdale avec le précunéus, au niveau de la région pariétale, semblait prédire positivement le comportement d'anxiété à l'âge de 4 ans, tandis que la connectivité avec le cortex sensorimoteur prédisait négativement ces scores d'anxiété. Cette étude souligne finalement l'importance du développement infantile du système émotionnel et ses conséquences sur les comportements futurs d'un individu. Nous avons notamment vu dans nos études que l'EEM ne reposait pas forcément sur un développement mature ni un fonctionnement normal des systèmes mnésique et émotionnel. Une étude longitudinale pourrait ainsi préciser les fondements de l'EEM au cours du développement typique et atypique, en lien avec le développement cognitif et émotionnel et ses éventuels déficits. Ceci paraît d'autant plus important

dans le SWB où l'ensemble du cerveau suit une trajectoire développementale atypique dès le plus jeune âge et pourrait donc présenter des différences développementales concernant les bases cérébrales supportant l'EEM.

En outre, il est important de noter que les personnes avec SWB présentent la plupart du temps une grande hétérogénéité interindividuelle au niveau de leurs compétences (Heiz, 2019). En effet, certaines personnes vont présenter des performances similaires à des enfants au DT plus jeunes tandis que d'autres ont des performances atypiques qui sont peu comparables aux groupes contrôles. Il est donc nécessaire d'envisager de créer des sous-groupes de participants selon leurs performances et potentiellement identifier des facteurs prédictifs de ces performances, afin d'adapter au mieux la prise en charge clinique. Le faible échantillon d'enfants et adolescents avec SWB inclus dans notre étude ne nous a malheureusement pas permis de faire plusieurs groupes de participants, mais cette approche mérite d'être considérée dans de futures études afin d'analyser des potentiels changements au niveau de l'EEM selon le profil cognitif et émotionnel et selon les performances mnésiques des participants. Il serait notamment intéressant d'évaluer si l'EEM bénéficie plus au groupe de participants ayant de plus faibles performances mnésiques ou à celui ayant de meilleures performances.

Une autre problématique que soulève ce travail de thèse concerne notamment l'approche bidimensionnelle des émotions sur laquelle nos études se sont basées afin d'évaluer l'EEM. En effet, la grande majorité des études présentes dans la littérature sur l'EEM, que ce soit chez l'adulte, chez l'enfant ou auprès de populations présentant des pathologies, s'est focalisée sur les dimensions de la valence et de l'arousal des informations émotionnelles afin d'évaluer leur impact sur la mémoire. Compte tenu de l'objectif principal de ce travail de thèse qui était d'étendre les connaissances de l'EEM aux développements typique et atypique, il était primordial d'utiliser des paradigmes expérimentaux similaires à ceux déjà utilisés dans la littérature afin de pouvoir confronter nos observations aux études déjà existantes. Or, l'évaluation de l'EEM est grandement influencée par la façon dont les chercheurs conceptualisent les émotions dans leurs études, notamment sur quelle approche théorique ils se basent. On peut ainsi se demander si le modèle bidimensionnel des émotions est suffisant pour comprendre pleinement la nature et les mécanismes qui sous-tendent les interactions entre émotion et mémoire. En effet, si aujourd'hui l'EEM est largement appréhendé en considérant les dimensions de la valence et de l'arousal des stimuli émotionnels, d'autres

approches tendent plutôt à se focaliser sur des aspects émotionnels relatifs à la pertinence personnelle, c'est-à-dire en quoi l'information est pertinente dans la poursuite des buts et l'assouvissement des besoins d'un individu. En particulier, une revue de Cunningham & Brosch (2012) montre, qu'au-delà du concept de valence et d'arousal, l'amygdale serait surtout impliquée dans le traitement des stimuli pertinents pour les buts et les motivations d'un individu, en accord avec la théorie émotionnelle de l'*appraisal* (Sander, Grandjean, & Scherer, 2005). Ainsi, la pertinence des stimuli de l'environnement peut changer selon l'état psychologique de l'individu et ses motivations à une période donnée, entraînant une variation de la réponse de l'amygdale. Un individu peut ainsi ressentir une émotion lorsqu'un objectif personnel a été atteint ou entravé, et qu'il devient nécessaire pour lui de revoir ses anciennes convictions ou de construire de nouveaux objectifs. Une fois évoquées, les émotions sont censées orienter le comportement futur de l'individu afin de pouvoir prévenir, modifier ou s'adapter à ses nouveaux objectifs. Dans cette optique, Levine & Edelstein (2009) stipule que les émotions amélioreraient la mémoire pour les informations pertinentes par rapport aux buts actuels d'un individu. Cette approche rejoint d'ailleurs la conception de la mémoire épisodique de Conway (2009) qui stipule que seuls les souvenirs épisodiques pertinents par rapport aux buts actuels d'un individu et sélectionnés par le *self* seraient retenus et maintenus en mémoire autobiographique. L'introduction du modèle de mémoire de Conway nous permet notamment d'aborder un autre point qui mérite une attention particulière, à savoir que l'étude de l'EEM dans ce travail de thèse a été réalisée dans le cadre d'un modèle spécifique de mémoire qui est celui de Tulving. Toutefois, d'autres modèles de mémoire pourraient permettre d'aborder l'EEM de façon complémentaire, notamment le modèle de Conway, sur lequel nous allons nous pencher, ou des modèles dits à « système unique » (pour une revue, voir Rousset, 2000). Plus spécifiquement, Conway intègre la mémoire épisodique dans ce qu'il appelle le *Self-Memory System* (SMS, Conway & Pleydell-Pearce, 2000) qui envisage la mémoire autobiographique comme une interaction entre la mémoire épisodique et le *self* à long terme. Dans le SMS, la mise en mémoire d'un événement en cours serait motivée par deux objectifs principaux : d'une part, l'encodage de l'épisode en lien avec ses objectifs à court terme, et d'autre part, le maintien de la cohérence du *self* à long terme. La mise en mémoire d'un événement en cours, motivée par les objectifs actuels, correspond à la mémoire épisodique. Un événement épisodique est riche en détails situationnels, perceptifs, sensoriels mais également émotionnels, qui permettent une expérience de reviviscence du passé, comme évoqué dans la conception de la mémoire épisodique de Tulving (Wheeler, Stuss, & Tulving, 1997). Par ailleurs, les événements épisodiques

retenus en mémoire autobiographique seraient ceux qui favoriseraient le maintien de la cohérence du *self* à long terme. Il est notamment mentionné dans la littérature que les événements émotionnels seraient majoritairement traités en référence au *self* (Conway & Pleydell-Pearce, 2000), ce qui entraînerait un meilleur traitement de ces stimuli et ainsi une meilleure mémorisation ultérieure, comparativement aux stimuli neutres (Schaefer & Philippot, 2005). Ainsi, le traitement des stimuli émotionnels en référence au *self* pourrait être un autre facteur facilitant l'émergence d'un EEM, en plus des facteurs cognitifs déjà mentionnés dans la littérature, notamment l'attention, l'organisation sémantique et la *distinctivité*. Il serait donc intéressant d'envisager d'autres approches théoriques des émotions et de la mémoire épisodique dans de futures études, à la fois chez l'adulte et au cours du développement, afin d'appréhender l'EEM sous une autre perspective et d'élargir nos connaissances sur ce phénomène. Ceci permettrait notamment de prendre davantage en compte les différences interindividuelles retrouvées dans la population et la variabilité des réponses émotionnelles qui en découle, en lien avec le *self* et la pertinence personnelle, ce qui paraît particulièrement important lors de l'inclusion de populations ayant des troubles émotionnels (Barry, Naus, & Rehm, 2006).

Conclusion générale

Ce travail de thèse a permis d'étendre et d'enrichir nos connaissances sur l'EEM immédiat chez les enfants au développement typique et dans une population présentant des dysfonctionnements mnésiques et émotionnels, à savoir les enfants et adolescents porteurs du syndrome de Williams-Beuren. L'atout majeur de ce travail de thèse réside notamment dans la variété des stimuli présentés (images et mots avec une valence négative, positive et neutre), des tâches expérimentales proposées (tâches de rappel libre et de reconnaissance de stimuli, tâche de mémoire associative avec informations contextuelles visuelles, auditivo-verbales et visuo-spatiales), des populations étudiées (enfants au DT de 8 à 11 ans vs. adultes normotypiques ; enfants et adolescents porteurs du SWB de 8 à 18 ans vs. enfants au DT de 5 à 9 ans) et des mesures réalisées (comportementales et neurophysiologiques), qui a permis d'obtenir des résultats robustes et novateurs concernant l'EEM dans le développement typique et atypique.

Nos résultats ont mis en évidence la présence d'un EEM à la fois en mémoire de l'item et en mémoire associative dans nos deux populations d'intérêt, bien que l'EEM pouvait varier selon les tâches expérimentales réalisées et la population étudiée. En particulier, les enfants au DT âgés de 8 à 11 ans et les adultes normotypiques présentaient majoritairement un EEM général dans les tâches de rappel libre des stimuli qui était plus souvent accompagné d'un effet de *négativité* chez les enfants au DT. Un effet de *négativité* était également observé dans les tâches de rappel libre des stimuli pour les enfants et adolescents avec SWB et les enfants au DT âgés de 5 à 9 ans ainsi qu'un EEM général accompagné d'un effet de *positivité* lors de la reconnaissance des stimuli. De plus, l'EEM n'était pas observé de façon systématique dans les tâches de mémoire associative pour les différents groupes de participants. Néanmoins, il était particulièrement visible en mémoire visuo-spatiale avec un effet de *positivité* présent pour tous les groupes de participants. Par ailleurs, il est important de souligner que l'EEM immédiat est apparu chez les enfants au DT et les enfants et adolescents porteurs du SWB malgré l'immaturité et/ou l'altération de certains processus mnésiques, notamment le processus de recollection. En outre, des premiers éléments concernant les

mécanismes cognitifs et neuronaux qui supportent l'EEM immédiat au cours du développement ont pu être exposés, notamment l'implication de facteurs cognitifs majoritairement sous-tendus par la région frontale du cerveau. Ceci nous a permis de faire un parallèle avec les modèles théoriques de l'EEM existants dans la littérature chez l'adulte, à savoir le modèle de la médiation cognitive (Talmi et al., 2013), et d'envisager son applicabilité auprès d'une population en cours de développement.

Bien que les études déjà réalisées dans le domaine et les résultats obtenus dans ce travail de thèse aient contribué à une meilleure compréhension de l'EEM chez les enfants, des lacunes subsistent encore concernant ce phénomène au cours du développement typique et atypique. Des études supplémentaires sont donc nécessaires pour confirmer nos résultats et approfondir les connaissances sur les mécanismes cognitifs et neurobiologiques à l'origine de l'émergence de l'EEM immédiat chez les enfants au développement typique et chez les enfants ayant des troubles neuro-développementaux pouvant affecter les processus émotionnels et/ou mnésiques.

Références bibliographiques

- Achenbach, T. M., & Ruffle, T. M. (2000). The Child Behavior Checklist and related forms for assessing behavioral/emotional problems and competencies. *Pediatrics in review*, 21(8), 265-271.
- Ack Baraly, K., Hot, P., Davidson, P., & Talmi, D. (2016). How Emotional Arousal Enhances Episodic Memory. In J. H. Byrne (Ed.), *Learning and Memory: A Comprehensive Reference* (2nd ed.). Elsevier BV.
- Addis, D. R., Leclerc, C. M., Muscatell, K. A., & Kensinger, E. A. (2010). There are age-related changes in neural connectivity during the encoding of positive, but not negative, information. *cortex*, 46(4), 425-433.
- Alibrán, É., Angel, L., Bouazzaoui, B., Gomot, M., & Isingrini, M. (2018). Le développement des processus de remémoration et de familiarité : données comportementales et électrophysiologiques. *L'Année psychologique*, 118(1), 29-58.
- Alves, N. T., Fukusima, S. S., & Aznar-Casanova, J. A. (2008). Models of brain asymmetry in emotional processing. *Psychology & Neuroscience*, 1(1), 63.
- Avery, S. N., Thornton-Wells, T. A., Anderson, A. W., & Blackford, J. U. (2012). White matter integrity deficits in prefrontal–amygdala pathways in Williams syndrome. *Neuroimage*, 59(2), 887-894.
- Babkirk, S., Rios, V., & Dennis, T. A. (2015). The late positive potential predicts emotion regulation strategy use in school-aged children concurrently and two years later. *Developmental science*, 18(5), 832-841.
- Barrett, L. F., Mesquita, B., Ochsner, K. N., & Gross, J. J. (2007). The experience of emotion. *Annu. Rev. Psychol.*, 58, 373-403.
- Barry, E. S., Naus, M. J., & Rehm, L. P. (2006). Depression, implicit memory, and self: A revised memory model of emotion. *Clinical Psychology Review*, 26(6), 719-745.
- Baumeister, R. F., Bratslavsky, E., Finkenauer, C., & Vohs, K. D. (2001). Bad is stronger than good. *Review of general psychology*, 5(4), 323.

- Bellugi, U., Lichtenberger, L., Jones, W., Lai, Z., & St. George, M. (2000). I. The neurocognitive profile of Williams syndrome: a complex pattern of strengths and weaknesses. *Journal of cognitive neuroscience*, 12(Supplement 1), 7-29.
- Bertels, J., Kolinsky, R., & Morais, J. (2009). Norms of emotional valence, arousal, threat value and shock value for 80 spoken French words: Comparison between neutral and emotional tones of voice. *Psychologica Belgica*, 49(1), 19.
- Beuren, A. J., Apitz, J., & Harmjanz, D. (1962). Supravalvular aortic stenosis in association with mental retardation and a certain facial appearance. *circulation*, 26(6), 1235-1240.
- Binder, J., de Quervain, J. F., Frieze, M., Luechinger, R., Boesiger, P., & Rasch, B. (2012). Emotion suppression reduces hippocampal activity during successful memory encoding. *NeuroImage*, 63(1), 525-532.
- Binelli, C., Muñiz, A., Subira, S., Navines, R., Blanco-Hinojo, L., Perez-Garcia, D., ... & Martin-Santos, R. (2016). Facial emotion processing in patients with social anxiety disorder and Williams–Beuren syndrome: an fMRI study. *Journal of psychiatry & neuroscience: JPN*, 41(3), 182.
- Bishop, S., Dalgleish, T., & Yule, W. (2004). Memory for emotional stories in high and low depressed children. *Memory*, 12(2), 214-230.
- Boddaert, N., Mochel, F., Meresse, I., Seidenwurm, D., Cachia, A., Brunelle, F., ... & Zilbovicius, M. (2006). Parieto-occipital grey matter abnormalities in children with Williams syndrome. *Neuroimage*, 30(3), 721-725.
- Bondy, E., Stewart, J. G., Hajcak, G., Weinberg, A., Tarlow, N., Mittal, V. A., & Auerbach, R. P. (2018). Emotion processing in female youth: Testing the stability of the late positive potential. *Psychophysiology*, 55(2), e12977.
- Boulton, K. A., & Porter, M. A. (2020). Extending the positive bias in Williams syndrome: The influence of biographical information on attention allocation. *Development and psychopathology*, 32(1), 243-256.
- Bradley, B. P., & Mogg, K. (1994). Mood and personality in recall of positive and negative information. *Behaviour research and therapy*, 32(1), 137-141.
- Brock, J., Brown, G. D., & Boucher, J. (2006). Free recall in Williams syndrome: Is there a dissociation between short-and long-term memory?. *Cortex*, 42(3), 366-375.
- Brown, R., & Kulik, J. (1977). Flashbulb memories. *Cognition*, 5(1), 73-99.

- Buchanan, T. W., & Adolphs, R. (2002). The role of the human amygdala in emotional modulation of long-term declarative memory. *Advances in Consciousness Research*, 44, 9-34.
- Bunford, N., Kujawa, A., Fitzgerald, K. D., Monk, C. S., & Phan, K. L. (2018). Convergence of BOLD and ERP measures of neural reactivity to emotional faces in children and adolescents with and without anxiety disorders. *Biological psychology*, 134, 9-19.
- Cabeza, R., Ciaramelli, E., Olson, I. R., & Moscovitch, M. (2008). The parietal cortex and episodic memory: an attentional account. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(8), 613-625.
- Campbell, L. E., Daly, E., Toal, F., Stevens, A., Azuma, R., Karmiloff-Smith, A., ... & Murphy, K. C. (2009). Brain structural differences associated with the behavioural phenotype in children with Williams syndrome. *Brain research*, 1258, 96-107.
- Capitão, L., Sampaio, A., Fernández, M., Sousa, N., Pinheiro, A., & Gonçalves, O. F. (2011). Williams syndrome hypersociability: A neuropsychological study of the amygdala and prefrontal cortex hypotheses. *Research in Developmental Disabilities*, 32(3), 1169-1179.
- Carney, D. P., Brown, J. H., & Henry, L. A. (2013). Executive function in Williams and Down syndromes. *Research in developmental disabilities*, 34(1), 46-55.
- Carney, D. P., Henry, L. A., Messer, D. J., Danielsson, H., Brown, J. H., & Rönnerberg, J. (2013). Using developmental trajectories to examine verbal and visuospatial short-term memory development in children and adolescents with Williams and Down syndromes. *Research in developmental disabilities*, 34(10), 3421-3432.
- Carretié, L., Hinojosa, J. A., & Mercado, F. (2003). Cerebral patterns of attentional habituation to emotional visual stimuli. *Psychophysiology*, 40(3), 381-388.
- Carretti, B., Lanfranchi, S., De Mori, L., Mammarella, I. C., & Vianello, R. (2015). Exploring spatial working memory performance in individuals with Williams syndrome: The effect of presentation format and configuration. *Research in developmental disabilities*, 37, 37-44.
- Carstensen, L. L., & DeLiema, M. (2018). The positivity effect: a negativity bias in youth fades with age. *Current opinion in behavioral sciences*, 19, 7-12.
- Carstensen, L. L., Fung, H. H., & Charles, S. T. (2003). Socioemotional selectivity theory and the regulation of emotion in the second half of life. *Motivation and emotion*, 27(2), 103-123.
- Casey, B. J., Heller, A. S., Gee, D. G., & Cohen, A. O. (2019). Development of the emotional brain. *Neuroscience letters*, 693, 29-34.

- Charles, S. T. (2010). Strength and vulnerability integration: a model of emotional well-being across adulthood. *Psychological bulletin*, *136*(6), 1068.
- Chiang, M. C., Reiss, A. L., Lee, A. D., Bellugi, U., Galaburda, A. M., Korenberg, J. R., ... & Thompson, P. M. (2007). 3D pattern of brain abnormalities in Williams syndrome visualized using tensor-based morphometry. *Neuroimage*, *36*(4), 1096-1109.
- Christianson, S. Å. (1992). Emotional stress and eyewitness memory: a critical review. *Psychological bulletin*, *112*(2), 284.
- Christodoulou, J., & Burke, D. M. (2016). Mood congruity and episodic memory in young children. *Journal of experimental child psychology*, *142*, 221-229.
- Cohen, M. (1997). *Children's memory scale*. San Antonio, TX: Psychological Corporation.
- Conway, M. A. (2001). Sensory-perceptual episodic memory and its context: Autobiographical memory. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, *356*(1413), 1375-1384.
- Conway, M. A. (2005). Memory and the self. *Journal of memory and language*, *53*(4), 594-628.
- Conway, M. A. (2009). Episodic memories. *Neuropsychologia*, *47*(11), 2305-2313.
- Conway, M. A., & Pleydell-Pearce, C. W. (2000). The construction of autobiographical memories in the self-memory system. *Psychological review*, *107*(2), 261.
- Conway, M. A., Singer, J. A., & Tagini, A. (2004). The self and autobiographical memory: Correspondence and coherence. *Social cognition*, *22*(5: Special issue), 491-529.
- Cordon, I. M., Melinder, A. M., Goodman, G. S., & Edelman, R. S. (2013). Children's and adults' memory for emotional pictures: Examining age-related patterns using the Developmental Affective Photo System. *Journal of experimental child psychology*, *114*(2), 339-356.
- Costanzo, F., Varuzza, C., Menghini, D., Addona, F., Ganesini, T., & Vicari, S. (2013). Executive functions in intellectual disabilities: a comparison between Williams syndrome and Down syndrome. *Research in developmental disabilities*, *34*(5), 1770-1780.
- Costanzo, F., Vicari, S., & Carlesimo, G. A. (2013). Familiarity and recollection in Williams syndrome. *Cortex*, *49*(1), 232-242.
- Cunningham, W. A., & Brosch, T. (2012). Motivational salience: Amygdala tuning from traits, needs, values, and goals. *Current Directions in Psychological Science*, *21*(1), 54-59.

- Cunningham, W. A., Espinet, S. D., DeYoung, C. G., & Zelazo, P. D. (2005). Attitudes to the right-and left: frontal ERP asymmetries associated with stimulus valence and processing goals. *NeuroImage*, 28(4), 827-834.
- Cuthbert, B. N., Schupp, H. T., Bradley, M. M., Birbaumer, N., & Lang, P. J. (2000). Brain potentials in affective picture processing: covariation with autonomic arousal and affective report. *Biological psychology*, 52(2), 95-111.
- Cycowicz, Y. M., Friedman, D., Snodgrass, J. G., & Duff, M. (2001). Recognition and source memory for pictures in children and adults. *Neuropsychologia*, 39(3), 255-267.
- Dalgleish, T. (2004). The emotional brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 5(7), 583-589.
- D'Argembeau, A., & Van der Linden, M. (2004). Influence of affective meaning on memory for contextual information. *Emotion*, 4(2), 173.
- Davidson, R. J. (2003). Affective neuroscience and psychophysiology: Toward a synthesis. *Psychophysiology*, 40(5), 655-665.
- Davidson, D., Luo, Z., & Burden, M. J. (2001). Children's recall of emotional behaviours, emotional labels, and nonemotional behaviours: Does emotion enhance memory?. *Cognition & Emotion*, 15(1), 1-26.
- Dégeilh, F., Eustache, F., & Guillery-Girard, B. (2015). Le développement cognitif et cérébral de la mémoire : de l'enfance à l'âge adulte. *Biologie Aujourd'hui*, 209(3), 249-260.
- DeMaster, D. M., & Ghetti, S. (2013). Developmental differences in hippocampal and cortical contributions to episodic retrieval. *Cortex*, 49(6), 1482-1493.
- DeMaster, D., Pathman, T., Lee, J. K., & Ghetti, S. (2014). Structural development of the hippocampus and episodic memory: developmental differences along the anterior/posterior axis. *Cerebral cortex*, 24(11), 3036-3045.
- Dennis, T. A., & Hajcak, G. (2009). The late positive potential: a neurophysiological marker for emotion regulation in children. *Journal of child psychology and psychiatry*, 50(11), 1373-1383.
- De Ribaupierre, A. (1989). On the use of longitudinal research in developmental psychology. *Transition mechanisms in child development: The longitudinal perspective*, 297-317.

- De Ribaupierre, A. (2015). Pourquoi faut-il étudier la variabilité intra-individuelle lorsqu'on s'intéresse au développement cognitif. *Différences et Variabilités en Psychologie; Juhel, J., Rouxel, G., Eds*, 159-178.
- Desatnik, A., Bel-Bahar, T., Nolte, T., Crowley, M., Fonagy, P., & Fearon, P. (2017). Emotion regulation in adolescents: An ERP study. *Biological psychology*, 129, 52-61.
- Devenny, D. A., Krinsky-McHale, S. J., Kittler, P. M., Flory, M., Jenkins, E., & Brown, W.T. (2004). Age-associated memory changes in adults with Williams syndrome. *Developmental Neuropsychology*, 26(3), 691-706.
- Diana, R. A., Yonelinas, A. P., & Ranganath, C. (2007). Imaging recollection and familiarity in the medial temporal lobe: a three-component model. *Trends in cognitive sciences*, 11(9), 379-386.
- Dodd, H. F., & Porter, M. A. (2010). I see happy people: attention bias towards happy but not angry facial expressions in Williams syndrome. *Cognitive Neuropsychiatry*, 15(6), 549-567.
- Dodd, H. F., & Porter, M. A. (2011a). There's that scary picture: Attention bias to threatening scenes in Williams syndrome. *Neuropsychologia*, 49(2), 247-253.
- Dodd, H. F., & Porter, M. A. (2011b). Interpretation of ambiguous situations: evidence for a dissociation between social and physical threat in Williams syndrome. *Journal of autism and developmental disorders*, 41(3), 266-274.
- Doerksen, S., & Shimamura, A. P. (2001). Source memory enhancement for emotional words. *Emotion*, 1(1), 5.
- Dolan, R. J. (2002). Emotion, cognition, and behavior. *science*, 298(5596), 1191-1194.
- Dolcos, F., & Cabeza, R. (2002). Event-related potentials of emotional memory: encoding pleasant, unpleasant, and neutral pictures. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 2(3), 252-263.
- Dolcos, F., Denkova, E., & Dolcos, S. (2012). Neural correlates of emotional memories: a review of evidence from brain imaging studies. *Psychologia*, 55(2), 80-111.
- Dolcos, F., Iordan, A. D., & Dolcos, S. (2011). Neural correlates of emotion–cognition interactions: A review of evidence from brain imaging investigations. *Journal of Cognitive Psychology*, 23(6), 669-694.
- Dolcos, F., Katsumi, Y., Weymar, M., Moore, M., Tsukiura, T., & Dolcos, S. (2017). Emerging directions in emotional episodic memory. *Frontiers in psychology*, 8, 1867.

Dolcos, F., LaBar, K. S., & Cabeza, R. (2004). Interaction between the amygdala and the medial temporal lobe memory system predicts better memory for emotional events. *Neuron*, 42(5), 855-863.

Dolcos, F., LaBar, K. S., & Cabeza, R. (2005). Remembering one year later: role of the amygdala and the medial temporal lobe memory system in retrieving emotional memories. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(7), 2626-2631.

Doyle, T. F., Bellugi, U., Korenberg, J. R., & Graham, J. (2004). "Everybody in the world is my friend" hypersociability in young children with Williams syndrome. *American Journal of Medical Genetics Part A*, 124(3), 263-273.

Easterbrook, J. A. (1959). The effect of emotion on cue utilization and the organization of behavior. *Psychological review*, 66(3), 183.

Edgin, J. O., Pennington, B. F., & Mervis, C. B. (2010). Neuropsychological components of intellectual disability: the contributions of immediate, working, and associative memory. *Journal of intellectual disability research*, 54(5), 406-417.

Ekman, P. (1992). An argument for basic emotions. *Cognition & emotion*, 6(3-4), 169-200.

Ekstrom, A. D., & Yonelinas, A. P. (2020). Precision, binding, and the hippocampus: Precisely what are we talking about?. *Neuropsychologia*, 138, 107341.

Eustache, F., & Desgranges, B. (2008). MNESIS: towards the integration of current multisystem models of memory. *Neuropsychology review*, 18(1), 53-69.

Eustache, F., Viard, A., & Desgranges, B. (2016). The MNESIS model: memory systems and processes, identity and future thinking. *Neuropsychologia*, 87, 96-109.

Ewart, A. K., Morris, C. A., Atkinson, D., Jin, W., Sternes, K., Spallone, P., ... & Keating, M. T. (1993). Hemizygoty at the elastin locus in a developmental disorder, Williams syndrome. *Nature genetics*, 5(1), 11-16.

Fan, C. C., Brown, T. T., Bartsch, H., Kuperman, J. M., Hagler Jr, D. J., Schork, A., ... & Dale, A. M. (2017). Williams syndrome-specific neuroanatomical profile and its associations with behavioral features. *NeuroImage: Clinical*, 15, 343-347.

Fanning, P. A., Hocking, D. R., Dissanayake, C., & Vivanti, G. (2018). Delineation of a spatial working memory profile using a non-verbal eye-tracking paradigm in young children with autism and Williams syndrome. *Child Neuropsychology*, 24(4), 469-489.

- Faria, A. V., Landau, B., O'Hearn, K. M., Li, X., Jiang, H., Oishi, K., ... & Mori, S. (2012). Quantitative analysis of gray and white matter in Williams syndrome. *Neuroreport*, *23*(5), 283.
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A. G., & Buchner, A. (2007). G* Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior research methods*, *39*(2), 175-191.
- Friedman, D., & Johnson Jr, R. (2000). Event-related potential (ERP) studies of memory encoding and retrieval: A selective review. *Microscopy research and technique*, *51*(1), 6-28.
- Frigerio, E., Burt, D. M., Gagliardi, C., Cioffi, G., Martelli, S., Perrett, D. I., & Borgatti, R. (2006). Is everybody always my friend? Perception of approachability in Williams syndrome. *Neuropsychologia*, *44*(2), 254-259.
- Gagliardi, C., Arrigoni, F., Nordio, A., De Luca, A., Peruzzo, D., Decio, A., ... & Borgatti, R. (2018). A different brain: anomalies of functional and structural connections in Williams Syndrome. *Frontiers in neurology*, *9*, 721.
- Gagliardi, C., Frigerio, E., Burt, D. M., Cazzaniga, I., Perrett, D. I., & Borgatti, R. (2003). Facial expression recognition in Williams syndrome. *Neuropsychologia*, *41*(6), 733-738.
- Gallant, S. N., Pun, C., & Yang, L. (2018). Age differences in the neural correlates underlying control of emotional memory: An event-related potential study. *Brain research*, *1697*, 83-92.
- Gee, D. G., Humphreys, K. L., Flannery, J., Goff, B., Telzer, E. H., Shapiro, M., ... & Tottenham, N. (2013). A developmental shift from positive to negative connectivity in human amygdala–prefrontal circuitry. *Journal of Neuroscience*, *33*(10), 4584-4593.
- Ghetti, S., & Angelini, L. (2008). The development of recollection and familiarity in childhood and adolescence: Evidence from the dual-process signal detection model. *Child development*, *79*(2), 339-358.
- Ghetti, S., & Lee, J. (2011). Children's episodic memory. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, *2*(4), 365-373.
- Greer, J., Hamilton, C., Riby, D. M., & Riby, L. M. (2014). Deeper processing is beneficial during episodic memory encoding for adults with Williams syndrome. *Research in developmental disabilities*, *35*(7), 1720-1726.
- Gross, J. J. (2008). Emotion regulation. *Handbook of emotions*, *3*(3), 497-513.

- Gogtay, N., Giedd, J. N., Lusk, L., Hayashi, K. M., Greenstein, D., Vaituzis, A. C., ... & Rapoport, J. L. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *101*(21), 8174-8179.
- Goldman, K. J., Shulman, C., Bar-Haim, Y., Abend, R., & Burack, J. A. (2017). Attention allocation to facial expressions of emotion among persons with Williams and Down syndromes. *Development and psychopathology*, *29*(4), 1189-1197.
- Gotlib, I. H., & Joormann, J. (2010). Cognition and depression: current status and future directions. *Annual review of clinical psychology*, *6*, 285-312.
- Gui, W. J., Wang, P. Y., Lei, X., Lin, T., Horta, M., Liu, X. Y., & Yu, J. (2019). Sleep facilitates consolidation of positive emotional memory in healthy older adults. *Memory*, *27*(3), 387-396.
- Guillery-Girard, B., Martins, S., Deshayes, S., Hertz-Pannier, L., Chiron, C., Jambaqué-Aubourg, I., ... & Eustache, F. (2013). Developmental trajectories of associative memory from childhood to adulthood: a behavioral and neuroimaging study. *Frontiers in behavioral neuroscience*, *7*, 126.
- Haas, B. W., & Canli, T. (2008). Emotional memory function, personality structure and psychopathology: a neural system approach to the identification of vulnerability markers. *Brain Research Reviews*, *58*(1), 71-84.
- Haas, B. W., Mills, D., Yam, A., Hoeft, F., Bellugi, U., & Reiss, A. (2009). Genetic influences on sociability: heightened amygdala reactivity and event-related responses to positive social stimuli in Williams syndrome. *Journal of Neuroscience*, *29*(4), 1132-1139.
- Hajcak, G., & Dennis, T. A. (2009). Brain potentials during affective picture processing in children. *Biological psychology*, *80*(3), 333-338.
- Hajcak, G., MacNamara, A., & Olvet, D. M. (2010). Event-related potentials, emotion, and emotion regulation: an integrative review. *Developmental neuropsychology*, *35*(2), 129-155.
- Hajcak, G., Weinberg, A., MacNamara, A., & Foti, D. (2012). ERPs and the study of emotion. In S. J. Luck & E. S. Kappenman (Eds.), *Oxford library of psychology. The Oxford handbook of event-related potential components* (p. 441-472). Oxford University Press.
- Hamann, S. (2001). Cognitive and neural mechanisms of emotional memory. *Trends in cognitive sciences*, *5*(9), 394-400.
- Hamann, S., & Stevens, J. S. (2013). Memory for emotional stimuli in development. *The Wiley Handbook on the Development of Children's Memory*, *1*, 724-742.

- Hayes, J. P., Morey, R. A., Petty, C. M., Seth, S., Smoski, M. J., McCarthy, G., & LaBar, K. S. (2010). Staying cool when things get hot: Emotion regulation modulates neural mechanisms of memory encoding. *Frontiers in human neuroscience*, *4*, 230.
- Headley, D. B., & Paré, D. (2013). In sync: gamma oscillations and emotional memory. *Frontiers in behavioral neuroscience*, *7*, 170.
- Heiz, J. (2019). Le syndrome de Williams. *ANAE-Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*, *31*(160), 295-297.
- Holmes, A., Nielsen, M. K., & Green, S. (2008). Effects of anxiety on the processing of fearful and happy faces: an event-related potential study. *Biological psychology*, *77*(2), 159-173.
- Howe, M. L., Candel, I., Otgaar, H., Malone, C., & Wimmer, M. C. (2010). Valence and the development of immediate and long-term false memory illusions. *Memory*, *18*(1), 58-75.
- Hu, P., Stylos-Allan, M., & Walker, M. P. (2006). Sleep facilitates consolidation of emotional declarative memory. *Psychological science*, *17*(10), 891-898.
- Izard, C. E. (2009). Emotion theory and research: Highlights, unanswered questions, and emerging issues. *Annual review of psychology*, *60*, 1-25.
- Jambaqué, I., Pinabiaux, C., Dubouch, C., Fohlen, M., Bulteau, C., & Delalande, O. (2009). Verbal emotional memory in children and adolescents with temporal lobe epilepsy: a first study. *Epilepsy & Behavior*, *16*(1), 69-75.
- Jarrold, C., Baddeley, A. D., & Phillips, C. (2007). Long-term memory for verbal and visual information in Down syndrome and Williams syndrome: performance on the Doors and People test. *Cortex*, *43*(2), 233-247.
- Jarrold, C., Phillips, C., & Baddeley, A. D. (2007). Binding of visual and spatial short-term memory in Williams syndrome and moderate learning disability. *Developmental Medicine & Child Neurology*, *49*(4), 270-273.
- Järvinen, A. M., Dering, B., Neumann, D., Ng, R., Crivelli, D., Grichanik, M., ... & Bellugi, U. (2012). Sensitivity of the autonomic nervous system to visual and auditory affect across social and non-social domains in Williams syndrome. *Frontiers in Psychology*, *3*, 343.
- Järvinen, A., Ng, R., Crivelli, D., Neumann, D., Grichanik, M., Arnold, A. J., ... & Bellugi, U. (2015). Patterns of sensitivity to emotion in children with Williams syndrome and autism: Relations between autonomic nervous system reactivity and social functioning. *Journal of autism and developmental disorders*, *45*(8), 2594-2612.

- Johnson, M. K., Hashtroudi, S., & Lindsay, D. S. (1993). Source monitoring. *Psychological bulletin*, *114*(1), 3.
- Karmiloff-Smith, A. (2012). Brain: The neuroconstructivist approach. *Neurodevelopmental disorders across the lifespan: A neuroconstructivist approach*, 37-58.
- Kausler, D. H., & Puckett, J. M. (1981). Adult age differences in memory for sex of voice. *Journal of Gerontology*, *36*(1), 44-50.
- Keifer, C. M., Hauschild, K. M., Nelson, B. D., Hajcak, G., & Lerner, M. D. (2019). Differences in the Late Positive Potential and P300 to Emotional Faces in Individuals with Autism Spectrum Disorder. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *49*(12), 5009-5022.
- Kensinger, E. A. (2009). Remembering the details: Effects of emotion. *Emotion review*, *1*(2), 99-113.
- Kensinger, E. A., & Corkin, S. (2003). Memory enhancement for emotional words: Are emotional words more vividly remembered than neutral words? *Memory & cognition*, *31*(8), 1169-1180.
- Kensinger, E. A., & Corkin, S. (2004). Two routes to emotional memory: Distinct neural processes for valence and arousal. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *101*(9), 3310-3315.
- Kensinger, E. A., & Schacter, D. L. (2008a). Memory and emotion. *Handbook of emotions*, *3*, 601-617.
- Kensinger, E. A., & Schacter, D. L. (2008b). Neural processes supporting young and older adults' emotional memories. *Journal of cognitive neuroscience*, *20*(7), 1161-1173.
- Key, A. P., & Dykens, E. M. (2016). Processing of stimulus content but not of emotional valence is altered in persons with Williams syndrome. *Journal of Intellectual Disability Research*, *60*(10), 993-1009.
- Kim, J. M., Sidhu, D. M., & Pexman, P. M. (2020). Effects of Emotional Valence and Concreteness on Children's Recognition Memory. *Frontiers in Psychology*, *11*.
- Kisley, M. A., Wood, S., & Burrows, C. L. (2007). Looking at the sunny side of life: Age-related change in an event-related potential measure of the negativity bias. *Psychological Science*, *18*(9), 838-843.
- Kleinginna, P. R., & Kleinginna, A. M. (1981). A categorized list of emotion definitions, with suggestions for a consensual definition. *Motivation and emotion*, *5*(4), 345-379.

- Krauel, K., Duzel, E., Hinrichs, H., Santel, S., Rellum, T., & Baving, L. (2007). Impact of emotional salience on episodic memory in attention-deficit/hyperactivity disorder: a functional magnetic resonance imaging study. *Biological Psychiatry*, *61*(12), 1370-1379.
- Kujawa, A., Klein, D. N., & Hajcak, G. (2012). Electrocardiac reactivity to emotional images and faces in middle childhood to early adolescence. *Developmental cognitive neuroscience*, *2*(4), 458-467.
- Kujawa, A., Klein, D. N., & Proudfit, G. H. (2013). Two-year stability of the late positive potential across middle childhood and adolescence. *Biological psychology*, *94*(2), 290-296.
- Kurz, E. M., Conzelmann, A., Barth, G. M., Hepp, L., Schenk, D., Renner, T. J., ... & Zinke, K. (2019). Signs of enhanced formation of gist memory in children with autism spectrum disorder—a study of memory functions of sleep. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *60*(8), 907-916.
- LaBar, K. S., & Cabeza, R. (2006). Cognitive neuroscience of emotional memory. *Nature Reviews Neuroscience*, *7*(1), 54.
- Labouvie-Vief, G. (2003). Dynamic integration: Affect, cognition, and the self in adulthood. *Current directions in psychological science*, *12*(6), 201-206.
- Labouvie-Vief, G., Grünh, D., & Studer, J. (2010). Dynamic integration of emotion and cognition: Equilibrium regulation in development and aging. *The Handbook of Life-Span Development*.
- Lacroix, A., Guidetti, M., Rogé, B., & Reilly, J. (2009). Recognition of emotional and nonemotional facial expressions: A comparison between Williams syndrome and autism. *Research in developmental disabilities*, *30*(5), 976-985.
- Lacroix, A., Pezet, M., Capel, A., Bonnet, D., Hennequin, M., Jacob, M. P., ... & Gilbert-Dussardier, B. (2009). Le syndrome de Williams-Beuren: une approche pluridisciplinaire. *Archives de pédiatrie*, *16*(3), 273-282.
- Lanfranchi, S., De Mori, L., Mammarella, I. C., Carretti, B., & Vianello, R. (2015). Spatial-sequential and spatial-simultaneous working memory in individuals with Williams Syndrome. *American journal on intellectual and developmental disabilities*, *120*(3), 193-202.
- Lang, P. J. (1980). Behavioral treatment and bio-behavioral assessment: Computer applications. In J. B. Sidowski, J. H. Johnson, & T. A. William (Eds.), *Technology in mental health care delivery systems* (pp. 119–137). Norwood, NJ: Ablex.

- Lang, P. J., Bradley, M. M., & Cuthbert, B. N. (1997). International affective picture system (IAPS): Technical manual and affective ratings. *NIMH Center for the Study of Emotion and Attention, 1*, 39-58.
- Lang, P.J., Bradley, M.M., & Cuthbert, B.N. (2008). International affective picture system (IAPS): Affective ratings of pictures and instruction manual. Technical Report A-8. University of Florida, Gainesville, FL.
- Langeslag, S. J., & van Strien, J. W. (2009). Aging and emotional memory: The co-occurrence of neurophysiological and behavioral positivity effects. *Emotion, 9*(3), 369.
- Lavenex, P., & Amaral, D. G. (2000). Hippocampal-neocortical interaction: A hierarchy of associativity. *Hippocampus, 10*(4), 420-430.
- LeDoux, J. (2012). Rethinking the emotional brain. *Neuron, 73*(4), 653-676.
- LeDoux, J. E., & Hofmann, S. G. (2018). The subjective experience of emotion: a fearful view. *Current Opinion in Behavioral Sciences, 19*, 67-72.
- Lee, J. K., Wendelken, C., Bunge, S. A., & Ghetti, S. (2016). A time and place for everything: Developmental differences in the building blocks of episodic memory. *Child development, 87*(1), 194-210.
- Lee, J. K., Fandakova, Y., Johnson, E. G., Cohen, N., Bunge, S. A., & Ghetti, S. (2019). Changes in anterior and posterior hippocampus differentially predict item-space, item-time, and item-item memory improvement. *BioRxiv, 551705*.
- Leppänen, J. M., Moulson, M. C., Vogel-Farley, V. K., & Nelson, C. A. (2007). An ERP study of emotional face processing in the adult and infant brain. *Child development, 78*(1), 232-245.
- Leppänen, J. M., & Nelson, C. A. (2009). Tuning the developing brain to social signals of emotions. *Nature Reviews Neuroscience, 10*(1), 37-47.
- Leventon, J. S., & Bauer, P. J. (2016). Emotion regulation during the encoding of emotional stimuli: Effects on subsequent memory. *Journal of experimental child psychology, 142*, 312-333.
- Leventon, J. S., Stevens, J. S., & Bauer, P. J. (2014). Development in the neurophysiology of emotion processing and memory in school-age children. *Developmental cognitive neuroscience, 10*, 21-33.
- Levine, L. J., & Edelman, R. S. (2009). Emotion and memory narrowing: A review and goal-relevance approach. *Cognition and Emotion, 23*(5), 833-875.

- Liu, Y., Huang, H., McGinnis-Deweese, M., Keil, A., & Ding, M. (2012). Neural substrate of the late positive potential in emotional processing. *Journal of Neuroscience*, *32*(42), 14563-14572.
- LoBue, V., & DeLoache, J. S. (2008). Detecting the snake in the grass: Attention to fear-relevant stimuli by adults and young children. *Psychological science*, *19*(3), 284-289.
- LoBue, V., & DeLoache, J. S. (2010). Superior detection of threat-relevant stimuli in infancy. *Developmental science*, *13*(1), 221-228.
- Luck, S. J. (2014). *An introduction to the event-related potential technique*. MIT press.
- Luna, B., Garver, K. E., Urban, T. A., Lazar, N. A., & Sweeney, J. A. (2004). Maturation of cognitive processes from late childhood to adulthood. *Child development*, *75*(5), 1357-1372.
- MacLean, P. D. (1949). Psychosomatic disease and the "visceral brain"; recent developments bearing on the Papez theory of emotion. *Psychosomatic medicine*.
- Macri, A., Pavard, A., & Versace, R. (2018). The beneficial effect of contextual emotion on memory: the role of integration. *Cognition and Emotion*, *32*(6), 1355-1361.
- Mangels, J. A., Picton, T. W., & Craik, F. I. (2001). Attention and successful episodic encoding: An event-related potential study. *Cognitive Brain Research*, *11*(1), 77-95.
- Manly, T. I. H. R., Robertson, I. H., Anderson, V., & Nimmo-Smith, I. (1999). TEA-Ch: The test of everyday attention for children manual. *Bury St. Edmunds, UK: Thames Valley Test Company Limited*.
- Maratos, E. J., & Rugg, M. D. (2001). Electrophysiological correlates of the retrieval of emotional and non-emotional context. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *13*(7), 877-891.
- Martens, M. A., Wilson, S. J., Dudgeon, P., & Reutens, D. C. (2009). Approachability and the amygdala: insights from Williams syndrome. *Neuropsychologia*, *47*(12), 2446-2453.
- Martens, M. A., Wilson, S. J., & Reutens, D. C. (2008). Research Review: Williams syndrome: a critical review of the cognitive, behavioral, and neuroanatomical phenotype. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *49*(6), 576-608.
- Martins, S., Guillery-Girard, B., & Eustache, F. (2006). Modèles de la mémoire humaine: concepts et modèles en neuropsychologie de l'adulte et de l'enfant. *Epilepsies*, *18*(2), 4-14.

- Massol, S., Vantaggio, S., & Chainay, H. (2020). Emotional modulation of episodic memory in school-age children and adults: Emotional items and their associated contextual details. *Journal of Experimental Psychology: General*, *149*(9), 1684-1703.
- Mastrogiuseppe, M., Bertelsen, N., Bedeschi, M. F., & Lee, S. A. (2019). The spatiotemporal organization of episodic memory and its disruption in a neurodevelopmental disorder. *Scientific Reports*, *9*(1), 1-12.
- Mao, X., You, Y., Li, W., & Guo, C. (2015). Emotion impairs extrinsic source memory – An ERP study. *Biological psychology*, *110*, 182-189.
- Mather, M. (2007). Emotional arousal and memory binding: An object-based framework. *Perspectives on Psychological Science*, *2*(1), 33-52.
- Mather, M. (2016). The affective neuroscience of aging. *Annual review of psychology*, *67*.
- Mather, M., & Carstensen, L. L. (2005). Aging and motivated cognition: The positivity effect in attention and memory. *Trends in cognitive sciences*, *9*(10), 496-502.
- Mather, M., & Fanselow, M. S. (2018). Editorial overview: Interactions between emotion and cognition. *Current opinion in behavioral sciences*, *19*, iv-vi.
- Mather, M., Mitchell, K. J., Raye, C. L., Novak, D. L., Greene, E. J., & Johnson, M. K. (2006). Emotional arousal can impair feature binding in working memory. *Journal of cognitive neuroscience*, *18*(4), 614-625.
- Mather, M., & Nesmith, K. (2008). Arousal-enhanced location memory for pictures. *Journal of memory and language*, *58*(2), 449-464.
- Mathews, A., & MacLeod, C. (2005). Cognitive vulnerability to emotional disorders. *Annu. Rev. Clin. Psychol.*, *1*, 167-195.
- Mathôt, S., Schreij, D., & Theeuwes, J. (2012). OpenSesame: An open-source, graphical experiment builder for the social sciences. *Behavior research methods*, *44*(2), 314-324.
- Mayer, J. D., & Gaschke, Y. N. (1988). The experience and meta-experience of mood. *Journal of Personality and Social Psychology*, *55*, 102-111.
- McGaugh, J. L. (2004). The amygdala modulates the consolidation of memories of emotionally arousing experiences. *Annu. Rev. Neurosci.*, *27*, 1-28.

McGaugh, J. L. (2018). Emotional arousal regulation of memory consolidation. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 19, 55-60.

McManis, M. H., Bradley, M. M., Berg, W. K., Cuthbert, B. N., & Lang, P. J. (2001). Emotional reactions in children: Verbal, physiological, and behavioral responses to affective pictures. *Psychophysiology*, 38(2), 222-231.

McRae, K., Gross, J. J., Weber, J., Robertson, E. R., Sokol-Hessner, P., Ray, R. D., ... & Ochsner, K. N. (2012). The development of emotion regulation: an fMRI study of cognitive reappraisal in children, adolescents and young adults. *Social cognitive and affective neuroscience*, 7(1), 11-22.

Menghini, D., Addona, F., Costanzo, F., & Vicari, S. (2010). Executive functions in individuals with Williams syndrome. *Journal of Intellectual Disability Research*, 54(5), 418-432.

Meyer-Lindenberg, A., Hariri, A. R., Munoz, K. E., Mervis, C. B., Mattay, V. S., Morris, C. A., & Berman, K. F. (2005). Neural correlates of genetically abnormal social cognition in Williams syndrome. *Nature neuroscience*, 8(8), 991-993.

Meyer-Lindenberg, A., Kohn, P., Mervis, C. B., Kippenhan, J. S., Olsen, R. K., Morris, C. A., & Berman, K. F. (2004). Neural basis of genetically determined visuospatial construction deficit in Williams syndrome. *Neuron*, 43(5), 623-631.

Meyer-Lindenberg, A., Mervis, C. B., & Berman, K. F. (2006). Neural mechanisms in Williams syndrome: a unique window to genetic influences on cognition and behaviour. *Nature Reviews Neuroscience*, 7(5), 380-393.

Meyer-Lindenberg, A., Mervis, C. B., Sarpal, D., Koch, P., Steele, S., Kohn, P., ... & Mattay, V. S. (2005). Functional, structural, and metabolic abnormalities of the hippocampal formation in Williams syndrome. *The Journal of clinical investigation*, 115(7), 1888-1895.

Michalska, K. J., & Davis, E. L. (2019). The psychobiology of emotional development: the case for examining sociocultural processes. *Developmental psychobiology*, 61(3), 416-429.

Mickley, K. R., & Kensinger, E. A. (2008). Emotional valence influences the neural correlates associated with remembering and knowing. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 8(2), 143-152.

Mickley Steinmetz, K. R., & Kensinger, E. A. (2009). The effects of valence and arousal on the neural activity leading to subsequent memory. *Psychophysiology*, 46(6), 1190-1199.

- Mimura, M., Hoeft, F., Kato, M., Kobayashi, N., Sheau, K., Piggot, J., ... & Reiss, A. L. (2010). A preliminary study of orbitofrontal activation and hypersociability in Williams Syndrome. *Journal of neurodevelopmental disorders*, 2(2), 93.
- Minor, G., & Herzmann, G. (2019). Effects of negative emotion on neural correlates of item and source memory during encoding and retrieval. *Brain research*, 1718, 32-45.
- Mirandola, C., Losito, N., Ghetti, S., & Cornoldi, C. (2014). Emotional false memories in children with learning disabilities. *Research in developmental disabilities*, 35(2), 261-268.
- Mitchell, K. J., & Johnson, M. K. (2009). Source monitoring 15 years later: what have we learned from fMRI about the neural mechanisms of source memory?. *Psychological bulletin*, 135(4), 638.
- Monin, P., Sanlaville, D., & Rossi, M. (2019). Syndrome de Williams : phénotype clinique et bases génétiques. *ANAE-Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*, 31(160), 299-306.
- Monnier, C., & Syssau, A. (2014). Affective norms for French words (FAN). *Behavior research methods*, 46(4), 1128-1137.
- Monnier, C., & Syssau, A. (2017). Affective norms for 720 French words rated by children and adolescents (FANchild). *Behavior research methods*, 49(5), 1882-1893.
- Moradi, A. R., Taghavi, R., Neshat-Doost, H. T., Yule, W., & Dalgleish, T. (2000). Memory bias for emotional information in children and adolescents with posttraumatic stress disorder: A preliminary study. *Journal of anxiety disorders*, 14(5), 521-534.
- Morales, S., Fu, X., & Pérez-Edgar, K. E. (2016). A developmental neuroscience perspective on affect-biased attention. *Developmental cognitive neuroscience*, 21, 26-41.
- Moratti, S., Saugar, C., & Strange, B. A. (2011). Prefrontal-occipitoparietal coupling underlies late latency human neuronal responses to emotion. *Journal of Neuroscience*, 31(47), 17278-17286.
- Moscovitch, M., Cabeza, R., Winocur, G., & Nadel, L. (2016). Episodic memory and beyond: the hippocampus and neocortex in transformation. *Annual review of psychology*, 67, 105-134.
- Mullally, S. L., & Maguire, E. A. (2014). Learning to remember: The early ontogeny of episodic memory. *Developmental cognitive neuroscience*, 9, 12-29.
- Muñoz, K. E., Meyer-Lindenberg, A., Hariri, A. R., Mervis, C. B., Mattay, V. S., Morris, C. A., & Berman, K. F. (2010). Abnormalities in neural processing of emotional stimuli in Williams syndrome vary according to social vs. non-social content. *Neuroimage*, 50(1), 340-346.

- Murphy, N. A., & Isaacowitz, D. M. (2008). Preferences for emotional information in older and younger adults: A meta-analysis of memory and attention tasks. *Psychology and aging, 23*(2), 263.
- Murty, V. P., Ritchey, M., Adcock, R. A., & LaBar, K. S. (2010). fMRI studies of successful emotional memory encoding: A quantitative meta-analysis. *Neuropsychologia, 48*(12), 3459-3469.
- Nashiro, K., & Mather, M. (2010). How arousal affects younger and older adults' memory binding. *Experimental Aging Research, 37*(1), 108-128.
- Nichols, S., Jones, W., Roman, M. J., Wulfeck, B., Delis, D. C., Reilly, J., & Bellugi, U. (2004). Mechanisms of verbal memory impairment in four neurodevelopmental disorders. *Brain and Language, 88*(2), 180-189.
- Norris, C. J. (2019). The negativity bias, revisited: Evidence from neuroscience measures and an individual differences approach. *Social neuroscience, 1*-15.
- Ofen, N. (2012). The development of neural correlates for memory formation. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 36*(7), 1708-1717.
- Ofen, N., Chai, X. J., Schuil, K. D., Whitfield-Gabrieli, S., & Gabrieli, J. D. (2012). The development of brain systems associated with successful memory retrieval of scenes. *Journal of Neuroscience, 32*(29), 10012-10020.
- Ofen, N., Kao, Y. C., Sokol-Hessner, P., Kim, H., Whitfield-Gabrieli, S., & Gabrieli, J. D. (2007). Development of the declarative memory system in the human brain. *Nature neuroscience, 10*(9), 1198-1205.
- Okon-Singer, H., Lichtenstein-Vidne, L., & Cohen, N. (2013). Dynamic modulation of emotional processing. *Biological psychology, 92*(3), 480-491.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia, 9*(1), 97-113.
- Olofsson, J. K., Nordin, S., Sequeira, H., & Polich, J. (2008). Affective picture processing: an integrative review of ERP findings. *Biological psychology, 77*(3), 247-265.
- Paller, K. A., & Wagner, A. D. (2002). Observing the transformation of experience into memory. *Trends in cognitive sciences, 6*(2), 93-102.
- Papez, J. W. (1937). A proposed mechanism of emotion. *Archives of Neurology & Psychiatry, 38*(4), 725-743.

- Paradis, C. M., Florer, F., Solomon, L. Z., & Thompson, T. (2004). Flashbulb memories of personal events of 9/11 and the day after for a sample of New York City residents. *Psychological Reports, 95*(1), 304-310.
- Paré, D., Collins, D. R., & Pelletier, J. G. (2002). Amygdala oscillations and the consolidation of emotional memories. *Trends in cognitive sciences, 6*(7), 306-314.
- Payne, J. D., Stickgold, R., Swanberg, K., & Kensinger, E. A. (2008). Sleep preferentially enhances memory for emotional components of scenes. *Psychological science, 19*(8), 781-788.
- Pegg, S., Dickey, L., Mumper, E., Kessel, E., Klein, D. N., & Kujawa, A. (2019). Stability and change in emotional processing across development: A 6-year longitudinal investigation using event-related potentials. *Psychophysiology, 56*(11), e13438.
- Perlman, S. B., & Pelphrey, K. A. (2011). Developing connections for affective regulation: age-related changes in emotional brain connectivity. *Journal of experimental child psychology, 108*(3), 607-620.
- Perner, J. (2000). Memory and theory of mind. *The Oxford handbook of memory, 297-312*.
- Pessoa, L. (2008). On the relationship between emotion and cognition. *Nature reviews neuroscience, 9*(2), 148-158.
- Pessoa, L. (2017). A network model of the emotional brain. *Trends in cognitive sciences, 21*(5), 357-371.
- Peterson, C., & Bell, M. (1996). Children's memory for traumatic injury. *Child development, 67*(6), 3045-3070.
- Phelps, E. A. (2006). Emotion and cognition: insights from studies of the human amygdala. *Annu. Rev. Psychol., 57*, 27-53.
- Phelps, E. A., LaBar, K. S., Anderson, A. K., O'connor, K. J., Fulbright, R. K., & Spencer, D. D. (1998). Specifying the contributions of the human amygdala to emotional memory: A case study. *Neurocase, 4*(6), 527-540.
- Phelps, E. A., & LeDoux, J. E. (2005). Contributions of the amygdala to emotion processing: from animal models to human behavior. *Neuron, 48*(2), 175-187.

Picard, L., Abram, M., Orriols, E., & Piolino, P. (2017). Virtual reality as an ecologically valid tool for assessing multifaceted episodic memory in children and adolescents. *International Journal of Behavioral Development, 41*(2), 211-219.

Picard, L., Eustache, F., & Piolino, P. (2009). De la mémoire épisodique à la mémoire autobiographique: approche développementale. *L'Année psychologique, 109*(2), 197-236.

Pinabiaux, C., Bulteau, C., Fohlen, M., Dorfmueller, G., Chiron, C., Hertz-Pannier, L., ... & Jambaqué, I. (2013). Impaired emotional memory recognition after early temporal lobe epilepsy surgery: the fearful face exception?. *Cortex, 49*(5), 1386-1393.

Pinabiaux, C., Pannier, L., Chiron, C., Rodrigo, S., Jambaqué, I., & Noulhiane, M. (2013). Memory for fearful faces across development: specialization of amygdala nuclei and medial temporal lobe structures. *Frontiers in human neuroscience, 7*, 901.

Piolino, P., Hisland, M., Ruffevelle, I., Matuszewski, V., Jambaqué, I., & Eustache, F. (2007). Do school-age children remember or know the personal past?. *Consciousness and Cognition, 16*(1), 84-101.

Plesa-Skwerer, D., Faja, S., Schofield, C., Verbalis, A., & Tager-Flusberg, H. (2006). Perceiving facial and vocal expressions of emotion in individuals with Williams syndrome. *American Journal on Mental Retardation, 111*(1), 15-26.

Posner, J., Russell, J. A., & Peterson, B. S. (2005). The circumplex model of affect: An integrative approach to affective neuroscience, cognitive development, and psychopathology. *Development and Psychopathology, 17*(3), 715.

Pourtois, G., Schettino, A., & Vuilleumier, P. (2013). Brain mechanisms for emotional influences on perception and attention: what is magic and what is not. *Biological psychology, 92*(3), 492-512.

Prehn-Kristensen, A., Göder, R., Chirobeja, S., Breßmann, I., Ferstl, R., & Baving, L. (2009). Sleep in children enhances preferentially emotional declarative but not procedural memories. *Journal of experimental child psychology, 104*(1), 132-139.

Prehn-Kristensen, A., Munz, M., Molzow, I., Wilhelm, I., Wiesner, C. D., & Baving, L. (2013). Sleep promotes consolidation of emotional memory in healthy children but not in children with attention-deficit hyperactivity disorder. *PLoS One, 8*(5), e65098.

Quas, J. A., & Lench, H. C. (2007). Arousal at encoding, arousal at retrieval, interviewer support, and children's memory for a mild stressor. *Applied Cognitive Psychology: The Official Journal of the Society for Applied Research in Memory and Cognition, 21*(3), 289-305.

- Raj, V., & Bell, M. A. (2010). Cognitive processes supporting episodic memory formation in childhood: The role of source memory, binding, and executive functioning. *Developmental Review, 30*(4), 384-402.
- Ranganath, C., Cohen, M. X., Dam, C., & D'Esposito, M. (2004). Inferior temporal, prefrontal, and hippocampal contributions to visual working memory maintenance and associative memory retrieval. *Journal of Neuroscience, 24*(16), 3917-3925.
- Reed, A. E., & Carstensen, L. L. (2012). The theory behind the age-related positivity effect. *Frontiers in psychology, 3*, 33
- Reiss, A. L., Eckert, M. A., Rose, F. E., Karchemskiy, A., Kesler, S., Chang, M., ... & Galaburda, A. (2004). An experiment of nature: brain anatomy parallels cognition and behavior in Williams syndrome. *Journal of Neuroscience, 24*(21), 5009-5015.
- Reiss, A. L., Eliez, S., Schmitt, J. E., Straus, E., Lai, Z., Jones, W., & Bellugi, U. (2000). IV. Neuroanatomy of Williams syndrome: a high-resolution MRI study. *Journal of cognitive neuroscience, 12*(Supplement 1), 65-73.
- Rey, A. (1959). *Test de la figure complexe de Rey*. ECPA, Éditions du centre de psychologie appliquée.
- Righi, S., Marzi, T., Toscani, M., Baldassi, S., Ottonello, S., & Viggiano, M. P. (2012). Fearful expressions enhance recognition memory: electrophysiological evidence. *Acta psychologica, 139*(1), 7-18.
- Rimmele, U., Davachi, L., Petrov, R., Dougal, S., & Phelps, E. A. (2011). Emotion enhances the subjective feeling of remembering, despite lower accuracy for contextual details. *Emotion, 11*(3), 553.
- Ritchey, M., Dolcos, F., & Cabeza, R. (2008). Role of amygdala connectivity in the persistence of emotional memories over time: An event-related fMRI investigation. *Cerebral Cortex, 18*(11), 2494-2504.
- Ritchey, M., LaBar, K. S., & Cabeza, R. (2011). Level of processing modulates the neural correlates of emotional memory formation. *Journal of Cognitive Neuroscience, 23*(4), 757-771.
- Rollins, L., & Riggins, T. (2018). Age-related differences in subjective recollection: ERP studies of encoding and retrieval. *Developmental science, 21*(3), e12583.
- Rousset, S. (2000). Les conceptions "système unique" de la mémoire : aspects théoriques. *Revue de neuropsychologie, 10*(1), 27-51.

- Royston, R., Waite, J., & Howlin, P. (2019). Williams syndrome: recent advances in our understanding of cognitive, social and psychological functioning. *Current opinion in psychiatry*, 32(2), 60-66.
- RUGG, M. D., & Allan, K. E. V. I. N. (2000). '5 6 Memory Retrieval: An A Electrophysiological Perspective.
- Russell, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of personality and social psychology*, 39(6), 1161.
- Russell, J. A. (2003). Core affect and the psychological construction of emotion. *Psychological review*, 110(1), 145.
- Russo, R., Whittuck, D., Roberson, D., Dutton, K., Georgiou, G., & Fox, E. (2006). Mood-congruent free recall bias in anxious individuals is not a consequence of response bias. *Memory*, 14(4), 393-399.
- Salzwedel, A. P., Stephens, R. L., Goldman, B. D., Lin, W., Gilmore, J. H., & Gao, W. (2019). Development of amygdala functional connectivity during infancy and its relationship with 4-year behavioral outcomes. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, 4(1), 62-71.
- Sampaio, A., Sousa, N., Fernández, M., Henriques, M., & Gonçalves, O. F. (2008). Memory abilities in Williams syndrome: Dissociation or developmental delay hypothesis?. *Brain and cognition*, 66(3), 290-297.
- Sander, D., Grandjean, D., & Scherer, K. R. (2005). A systems approach to appraisal mechanisms in emotion. *Neural networks*, 18(4), 317-352.
- Sastre III, M., Wendelken, C., Lee, J. K., Bunge, S. A., & Ghetti, S. (2016). Age-and performance-related differences in hippocampal contributions to episodic retrieval. *Developmental cognitive neuroscience*, 19, 42-50.
- Schaefer, A., & Philippot, P. (2005). Selective effects of emotion on the phenomenal characteristics of autobiographical memories. *Memory*, 13(2), 148-160.
- Schupp, H. T., Flaisch, T., Stockburger, J., & Junghöfer, M. (2006). Emotion and attention: event-related brain potential studies. *Progress in brain research*, 156, 31-51.
- Schupp, H. T., Junghöfer, M., Weike, A. I., & Hamm, A. O. (2003). Attention and emotion: an ERP analysis of facilitated emotional stimulus processing. *Neuroreport*, 14(8), 1107-1110.

- Schupp, H. T., Kirmse, U., Schmälzle, R., Flaisch, T., & Renner, B. (2016). Newly-formed emotional memories guide selective attention processes: Evidence from event-related potentials. *Scientific reports*, 6, 28091.
- Seress, L., Abraham, H., Tornoczky, T., & Kosztolányi, G. Y. (2001). Cell formation in the human hippocampal formation from mid-gestation to the late postnatal period. *Neuroscience*, 105(4), 831-843.
- Shafer, A. T., & Dolcos, F. (2014). Dissociating retrieval success from incidental encoding activity during emotional memory retrieval, in the medial temporal lobe. *Frontiers in behavioral neuroscience*, 8, 177.
- Shimamura, A. P. (2011). Episodic retrieval and the cortical binding of relational activity. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 11(3), 277-291.
- Silvers, J. A., Insel, C., Powers, A., Franz, P., Helion, C., Martin, R. E., ... & Ochsner, K. N. (2017). vIPFC–vmPFC–amygdala interactions underlie age-related differences in cognitive regulation of emotion. *Cerebral cortex*, 27(7), 3502-3514.
- Simons, J. S., & Spiers, H. J. (2003). Prefrontal and medial temporal lobe interactions in long-term memory. *Nature reviews neuroscience*, 4(8), 637-648.
- Skwerer, D. P., Ammerman, E., André, M. C., Ciciolla, L., Fine, A. B., & Tager-Flusberg, H. (2011). A multimeasure approach to investigating affective appraisal of social information in Williams syndrome. *Journal of Neurodevelopmental Disorders*, 3(4), 325-334.
- Solomon, B., DeCicco, J. M., & Dennis, T. A. (2012). Emotional picture processing in children: an ERP study. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2(1), 110-119.
- Souchay, C., Guillery-Girard, B., Pauly-Takacs, K., Wojcik, D. Z., & Eustache, F. (2013). Subjective experience of episodic memory and metacognition: a neurodevelopmental approach. *Frontiers in behavioral neuroscience*, 7, 212.
- Sprondel, V., Kipp, K. H., & Mecklinger, A. (2011). Developmental changes in item and source memory: Evidence from an ERP recognition memory study with children, adolescents, and adults. *Child Development*, 82(6), 1638-1953.
- Steinmetz, K. R. M., Addis, D. R., & Kensinger, E. A. (2010). The effect of arousal on the emotional memory network depends on valence. *Neuroimage*, 53(1), 318-324.

- Stenson, A. F., Leventon, J. S., & Bauer, P. J. (2019). Emotion effects on memory from childhood through adulthood: Consistent enhancement and adult gender differences. *Journal of experimental child psychology*, 178, 121-136.
- Stickgold, R. (2005). Sleep-dependent memory consolidation. *Nature*, 437(7063), 1272-1278.
- Takahashi, E., Ohki, K., & Kim, D. S. (2013). Dissociation and convergence of the dorsal and ventral visual working memory streams in the human prefrontal cortex. *NeuroImage*, 65, 488-498.
- Talmi, D. (2013). Enhanced emotional memory: Cognitive and neural mechanisms. *Current Directions in Psychological Science*, 22(6), 430-436.
- Talmi, D., Lohnas, L. J., & Daw, N. D. (2019). A retrieved context model of the emotional modulation of memory. *Psychological review*, 126(4), 455.
- Talmi, D., & McGarry, L. M. (2012). Accounting for immediate emotional memory enhancement. *Journal of Memory and Language*, 66(1), 93-108.
- Talmi, D., Schimmack, U., Paterson, T., & Moscovitch, M. (2007). The role of attention and relatedness in emotionally enhanced memory. *Emotion*, 7(1), 89.
- Tang, L., Shafer, A. T., & Ofen, N. (2018). Prefrontal cortex contributions to the development of memory formation. *Cerebral Cortex*, 28(9), 3295-3308.
- Thompson, R. A. (2011). Emotion and emotion regulation: Two sides of the developing coin. *Emotion Review*, 3(1), 53-61.
- Thornton-Wells, T. A., Avery, S. N., & Blackford, J. U. (2011). Using novel control groups to dissect the amygdala's role in Williams syndrome. *Developmental cognitive neuroscience*, 1(3), 295-304.
- Todd, R. M., Evans, J. W., Morris, D., Lewis, M. D., & Taylor, M. J. (2010). The changing face of emotion: age-related patterns of amygdala activation to salient faces. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 6(1), 12-23.
- Tulving, E. (1972). 12. Episodic and Semantic Memory. *Organization of memory/Eds E. Tulving, W. Donaldson, NY: Academic Press*, 381-403.
- Tulving, E. (1985). Memory and consciousness. *Canadian Psychology/Psychologie canadienne*, 26(1), 1.

- Tulving, E. (2001). Episodic memory and common sense: how far apart?. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 356(1413), 1505-1515.
- Vaish, A., Grossmann, T., & Woodward, A. (2008). Not all emotions are created equal: the negativity bias in social-emotional development. *Psychological bulletin*, 134(3), 383.
- Van Bergen, P., Wall, J., & Salmon, K. (2015). The good, the bad, and the neutral: The influence of emotional valence on young children's recall. *Journal of Applied Research in Memory and Cognition*, 4(1), 29-35.
- Van Herwegen, J., Aznar, A., & Tenenbaum, H. (2014). The use of emotions in narratives in Williams syndrome. *Journal of communication disorders*, 50, 1-7.
- Van Steenbergen, H., Band, G. P., & Hommel, B. (2011). Threat but not arousal narrows attention: evidence from pupil dilation and saccade control. *Frontiers in psychology*, 2, 281.
- Vasa, R. A., Pine, D. S., Thorn, J. M., Nelson, T. E., Spinelli, S., Nelson, E., ... & Mostofsky, S. H. (2011). Enhanced right amygdala activity in adolescents during encoding of positively valenced pictures. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 1(1), 88-99.
- Vicari, S., Bates, E., Caselli, M. C., Pasqualetti, P., Gagliardi, C., Tonucci, F., & Volterra, V. (2004). Neuropsychological profile of Italians with Williams syndrome: An example of a dissociation between language and cognition?. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 10(6), 862-876.
- Vicari, S., Bellucci, S., & Carlesimo, G. A. (2003). Visual and spatial working memory dissociation: Evidence from Williams syndrome. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 45(4), 269-273.
- Vicari, S., Bellucci, S., & Carlesimo, G. A. (2005). Visual and spatial long-term memory: differential pattern of impairments in Williams and Down syndromes. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 47(5), 305-311.
- Vicari, S., Bellucci, S., & Carlesimo, G. A. (2006). Evidence from two genetic syndromes for the independence of spatial and visual working memory. *Developmental medicine and child neurology*, 48(2), 126-131.
- Vicari, S., Brizzolara, D., Carlesimo, G. A., Pezzini, G., & Volterra, V. (1996). Memory abilities in children with Williams syndrome. *Cortex*, 32(3), 503-514.
- Vicari, S., & Carlesimo, G. A. (2006). Short-term memory deficits are not uniform in Down and Williams syndromes. *Neuropsychology review*, 16(2), 87-94.

- Vicari, S., Costanzo, F., & Menghini, D. (2016). Memory and learning in intellectual disability. In *International review of research in developmental disabilities* (Vol. 50, pp. 119-148). Academic Press.
- Waters, A. M., Lipp, O. V., & Spence, S. H. (2004). Attentional bias toward fear-related stimuli: An investigation with nonselected children and adults and children with anxiety disorders. *Journal of Experimental Child Psychology*, *89*(4), 320-337.
- Watts, S., Buratto, L. G., Brotherhood, E. V., Barnacle, G. E., & Schaefer, A. (2014). The neural fate of neutral information in emotion-enhanced memory. *Psychophysiology*, *51*(7), 673-684.
- Wauthia, E., & Rossignol, M. (2016). Emotional processing and attention control impairments in children with anxiety: an integrative review of event-related potentials findings. *Frontiers in psychology*, *7*, 562.
- Wechsler, D. (2014). *WISC-V: Technical and Interpretive Manual*. NCS Pearson, Incorporated.
- Weymar, M., Löw, A., & Hamm, A. O. (2011). Emotional memories are resilient to time: evidence from the parietal ERP old/new effect. *Human brain mapping*, *32*(4), 632-640.
- Wheeler, M. A., Stuss, D. T., & Tulving, E. (1997). Toward a theory of episodic memory: the frontal lobes and autonoetic consciousness. *Psychological bulletin*, *121*(3), 331.
- Williams, J. C. P., Barratt-Boyes, B. G., & Lowe, J. B. (1961). Supravalvular aortic stenosis. *circulation*, *24*(6), 1311-1318.
- Wright, C. I., Fischer, H., Whalen, P. J., McInerney, S. C., Shin, L. M., & Rauch, S. L. (2001). Differential prefrontal cortex and amygdala habituation to repeatedly presented emotional stimuli. *Neuroreport*, *12*(2), 379-383.
- Yick, Y. Y., Buratto, L. G., & Schaefer, A. (2015). The effects of negative emotion on encoding-related neural activity predicting item and source recognition. *Neuropsychologia*, *73*, 48-59.
- Yick, Y. Y., Buratto, L. G., & Schaefer, A. (2016). Variations in prestimulus neural activity predict the emotion-enhanced memory effect. *NeuroReport*, *27*(11), 864-868.
- Yonelinas, A. P. (1994). Receiver-operating characteristics in recognition memory: evidence for a dual-process model. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *20*(6), 1341.
- Yonelinas, A. P. (2002). The nature of recollection and familiarity: A review of 30 years of research. *Journal of memory and language*, *46*(3), 441-517.

Yonelinas, A. P., Ranganath, C., Ekstrom, A. D., & Wiltgen, B. J. (2019). A contextual binding theory of episodic memory: systems consolidation reconsidered. *Nature Reviews Neuroscience*, *20*(6), 364-375.

Yonelinas, A. P., & Ritchey, M. (2015). The slow forgetting of emotional episodic memories: an emotional binding account. *Trends in cognitive sciences*, *19*(5), 259-267.

Zamora, E. V., Richard's, M. M., Introzzi, I., Aydmune, Y., Urquijo, S., Olmos, J. G., & Marchewka, A. (2020). The Nencki Affective Picture System (NAPS): A Children-Rated Subset. *Trends in Psychology*, *28*(4), 477-493.

Résumé

Ces dernières années, les émotions et la cognition, et en particulier le lien entre ces deux domaines, ont fasciné les scientifiques du monde entier, donnant naissance à de nombreux travaux de recherche en psychologie, sciences cognitives et neurosciences. L'une des fonctions cognitives qui a éminemment attiré l'attention des chercheurs, en lien avec la modulation émotionnelle à laquelle elle est assujettie, est la mémoire épisodique. Aussi, les travaux de recherche réalisés chez l'Homme se sont largement accordés sur un point : les émotions participent à l'amélioration de la mémoire épisodique, un phénomène qui, dans la littérature, porte le nom de *Emotional Enhancement of Memory* (EEM). Si ce phénomène a amplement été étudié dans la population adulte, la nature de l'interaction entre mémoire et émotions reste largement inexplorée au cours du développement ontogénétique. Or, l'enfance est une période charnière durant laquelle des modifications majeures émergent au niveau du fonctionnement cérébral, sous-tendant le développement cognitif et émotionnel de l'enfant jusqu'à l'âge adulte. Ce travail de thèse s'est donc centré, dans un premier temps, sur l'étude de l'EEM chez l'enfant au développement typique (DT) afin de mettre en exergue de potentielles modulations développementales comparativement à la population adulte. Dans un deuxième temps, afin d'élargir nos connaissances sur l'EEM au cours du développement, ce travail de thèse a adopté une approche neuropsychologique avec l'étude de ce phénomène auprès d'enfants et d'adolescents porteurs d'un trouble neuro-développemental appelé syndrome de Williams-Beuren (SWB). Ainsi, plusieurs études expérimentales ont été conduites afin d'évaluer l'EEM chez l'enfant au DT et dans le SWB, à la fois avec des évaluations comportementales, comprenant des tâches d'encodage et de récupération en mémoire de stimuli émotionnels (négatifs et positifs) et neutres, ainsi qu'avec des mesures neurophysiologiques grâce à l'électro-encéphalographie (EEG). En particulier, les évaluations comportementales se sont intéressées à l'analyse de la mémoire épisodique dans sa globalité, c'est-à-dire en tenant compte de ses deux composants principaux qui sont la mémoire de l'item et la mémoire associative. Les résultats obtenus dans ce travail de recherche ont permis, pour la première fois, de mettre en évidence l'émergence d'un EEM à la fois en mémoire de l'item et en mémoire associative chez les enfants au DT âgés de 8 à 11 ans, et ceci de façon similaire à des jeunes adultes. Des premiers indices de la modulation des réponses neuronales lors de l'encodage de stimuli émotionnels pouvant prédire les performances comportementales en mémoire, ont également été apportés chez les enfants au DT. Par ailleurs, ce travail de recherche a contribué à fournir des premières preuves de l'émergence d'un EEM chez les enfants et adolescents porteurs du SWB âgés de 8 à 18 ans, qui apparaissait de façon similaire à un groupe de jeunes enfants au DT. Dans l'ensemble, ce travail de thèse a permis de démontrer que l'EEM est un phénomène robuste, qui se mettrait en place précocement au cours du développement et qui ne semblerait pas être affecté par l'immaturité de certains processus mnésiques observée chez les enfants au DT, ni par l'altération de ces processus dans le cas du SWB.