



L'apport des technologies interactives dans l'étude des composantes sensorielles de la créativité

Fabien Bitu

► To cite this version:

Fabien Bitu. L'apport des technologies interactives dans l'étude des composantes sensorielles de la créativité. Psychologie. Normandie Université, 2022. Français. NNT : 2022NORMC027 . tel-03970224

HAL Id: tel-03970224

<https://theses.hal.science/tel-03970224>

Submitted on 2 Feb 2023

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.



Normandie Université

THÈSE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité PSYCHOLOGIE

Préparée au sein de l'Université de Caen Normandie

**L'apport des technologies interactives dans l'étude des
composantes sensorielles de la créativité.**

**Présentée et soutenue par
FABIEN BITU**

**Thèse soutenue le 13/12/2022
devant le jury composé de**

MME MAUD BESANCON	Professeur des universités, Université Rennes 2	Rapporteur du jury
M. ANDRE TRICOT	Professeur des universités, Université de Montpellier	Rapporteur du jury
M. DENIS ALAMARGOT	Professeur des universités, UNIVERSITE POITIERS	Membre du jury
M. YANN COELLO	Professeur des universités, UNIVERSITE LILLE 3 CHARLES DE GAULLE	Président du jury
MME MICHELE MOLINA	Professeur des universités, Université de Caen Normandie	Directeur de thèse
MME BEATRICE GALINON-MELENEC	Professeur émérite, Université Le Havre Normandie	Co-directeur de thèse

**Thèse dirigée par MICHELE MOLINA (Laboratoire de Psychologie de Caen
Normandie) et BEATRICE GALINON-MELENEC (Identité et Différenciation des
Espaces de l'Environnement et des Sociétés)**



UNIVERSITÉ
CAEN
NORMANDIE



LABORATOIRE
DE PSYCHOLOGIE
CAEN NORMANDIE

REMERCIEMENTS

Cette thèse constitue en soi un chapitre de vie à part entière. Ces années ont été extrêmement riches en émotions et en savoirs. Je souhaite ainsi remercier toutes les personnes qui ont eu un rôle à jouer dans la construction de ce travail, de sa genèse à sa conclusion.

J'adresse plus particulièrement mes remerciements à Michèle Molina auprès de qui tout a commencé en 2016, lors de ma première année de master. Je nourrissais déjà à ce moment une volonté très forte de poursuivre en doctorat, mais j'étais loin d'imaginer vivre cette épopée. Tout au long de ces quelques années, vous avez su m'encourager, me former, me préparer aux différentes étapes, tout en me transmettant votre goût de l'écriture, du détail, et de la richesse théorique. Par-dessus tout, je souhaiterais remercier votre soutien indéfectible, me poussant à ne jamais rien lâcher et à me dépasser pour aller toujours plus loin. J'espère profondément que le padawan que j'ai été puisse devenir aussi sage et patient que vous l'êtes. Mais en attendant... je risque encore de vous embêter quelques temps avec des relectures, conseils et avis critiques !

Je remercie également la co-directrice de ce travail de thèse, Béatrice Galinon-Mélénec, pour avoir accepté de nous rejoindre dans cette aventure et d'avoir contribué à ouvrir mon esprit avec une pensée plus large et critique autour des différents sujets abordés dans ce travail. Votre sens critique et votre goût du détail ont été des atouts précieux.

J'adresse également mes remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'expertiser mon travail de thèse, les Pr. Denis Alamargot, Maud Besançon, Yann Coello et André Tricot.

Je remercie les chercheurs qui ont participé de plus loin à l'élaboration de ces travaux de thèse, en ayant accepté de consacrer du temps à nos échanges, en apportant de précieux conseils méthodologiques et théoriques (Todd Lubart, Giovanni Pezzulo, Arne Dietrich, mais également et surtout les différents reviewers anonymes) et de façon plus générale, la communauté scientifique pour ces échanges enrichissants au travers des différents congrès et séminaires.

De façon plus générale, je remercie l'ED 556 HSRT et ses directeurs, le laboratoire LPCN et l'Université de Caen Normandie pour m'avoir permis de réaliser ce travail dans les meilleures conditions. Une pensée plus particulière s'adresse à la Team 403 et les deux compères avec qui j'ai commencé mon travail de thèse, Pauline et Maxime. J'adresse également mes remerciements plus particuliers à Marc Aguert pour ses nombreux conseils et sa pédagogie sur les statistiques : merci de m'avoir fait aimer les chiffres !

Je souhaite également remercier les différentes institutions qui gravitent autour des doctorants et qui contribuent à leur formation. Plus particulièrement, je souhaiterais remercier le Dôme et le CNRS Normandie pour m'avoir fait découvrir et m'avoir formé à la médiation scientifique.

Je souhaite également remercier les membres du CRP-CPO et qui m'ont accueilli pour ma dernière année de thèse. Un très grand merci aux doctorants pour leur accueil et les nombreux échanges que nous avons eu. Je souhaitais surtout remercier mes collègues de bureau, qui ont vécu au plus proche de moi cette dernière année de thèse : Damien, Hélios et Daphné. Merci d'avoir ensoleillé mes journées, de m'avoir transmis autant de joie et de bonne humeur, et merci infiniment pour votre soutien inconditionnel.

J'adresse enfin mes remerciements à mes amis et surtout ma famille qui m'a toujours soutenu dans mes projets. Je n'aurais jamais pu arriver jusqu'ici sans vous. Les dernières années ont filé et je n'ai pas vu le temps passer, plongé avec passion dans mon travail. Merci de votre patience. Et je remercie plus particulièrement Romain et Laura de m'avoir secouru à chaque doute orthographique !

Je terminerai par adresser le plus grand des remerciements à la personne qui a vécu cette thèse au moins autant que moi. Aurore, merci de m'avoir supporté pendant ces quelques années. Tu t'es souvent sentie spectatrice impuissante lors de mes moments de doute et face à cet ascenseur émotionnel, mais aucun mot ne pourrait décrire le soutien et le pilier que tu as été pour moi. Merci de ne pas t'être enfuie quand j'ai lancé ce projet de thèse. Merci pour tes encouragements. Merci pour ton soutien. Merci pour tout.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	I

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE 1 – LES NOUVELLES TECHNOLOGIES CHEZ L’ENFANT ET L’ADOLESCENT : QUELS BENEFICES ?	5
I – La révolution numérique	6
I.1. L’utilisation des technologies par les enfants et adolescents : un débat sociétal	6
I.2. L’omniprésence des technologies numériques dans l’environnement des enfants et adolescents.....	7
I.3. Méfiance et défiance face à la technologie	8
II - L’exposition passive aux écrans	10
II.1. Du mauvais usage des technologies numériques passives.....	10
II.2. Les premières recommandations académiques portant sur les effets des technologies numériques	13
III - Un nouveau débat marqué par l’apparition des technologies interactives	14
III.1. Les écrans tactiles numériques : une nouvelle révolution	15
III.2. Une reconsidération des recommandations académiques.....	17
III.3. Des bénéfices sur les apprentissages scolaires	18
CHAPITRE 2 – LA CREATIVITE : ORIGINES, DEFINITION, ET DEVELOPPEMENT CHEZ L’ENFANT ET L’ADOLESCENT	25
I - Créativité et cognition.....	26
I.1. La créativité : du don divin à l’intelligence.....	26
I.2. Définition de la créativité.....	27
I.3. Pensée convergente et divergente	28
II - L’approche multivariée de la créativité.....	30
III - Les facteurs de créativité évoqués dans l’approche multivariée	31
III.1. Facteurs conatifs.....	31
III.2. Facteurs émotionnels.....	32
III.3. Facteurs environnementaux.....	33
IV - Les outils d’évaluation de la créativité	36
IV.1. Description des tests dans les études développementales	36
IV.2. L’évaluation de l’originalité dans les tâches de dessin et ses limites.....	38
V - Le développement de la créativité de l’âge préscolaire à l’adolescence	41

V.1. Du préscolaire au scolaire.....	42
V.2. La fin de la période élémentaire	42
V.3. Du collège au lycée.....	44
V.4. Des facteurs de développement multiples	44
 CHAPITRE 3 – LES BASES EVOLUTIVES DE LA CREATIVITE : DE LA VARIATION A LA SELECTION	49
I - Le couplage variation-sélection dans l'évolution biologique	50
II - La créativité conçue comme un système de variation-sélection.....	51
II.1. Le modèle BVSR : un précurseur	51
II.2. Le couplage variation-sélection appliqué à la créativité selon le modèle de Dietrich et Haider (2015)	53
 CHAPITRE 4 - LE SYSTEME PREDICTIF : DU CONTROLE SENSORIMOTEUR A LA CREATIVITE	57
I - La prédiction en tant que processus de l'évolution.....	58
II - Prédiction et modèles internes de l'action.....	59
II.1. Présentation des modèles internes	60
II.2. La prédiction, élément central des boucles de contrôle des modèles internes	61
II.3. L'émulation, générateur de prédiction sensorielle des modèles directs.....	62
II.4. Des connaissances implicites aux connaissances explicites	63
III - La simulation de l'action imaginée	65
IV – L'analogie des modèles internes	68
V - Relier la variation à la sélection	69
V.1. La sélection : un système de simulation explicite	70
V.2. La variation : un système d'émulation implicite	71
VI – Les afférences sensorielles, essence de créativité	72
 CHAPITRE 5 – AGIR SUR L'AFFERENCE SENSORIELLE POUR MODULER LA CREATIVITE AU COURS DU DEVELOPPEMENT	75
I – Créativité et cognition incarnée	76
II – L'évolution des capacités d'intégration sensorielle au cours du développement	78
II.1. Le développement du traitement de l'afférence sensorielle dans le contrôle de l'action chez l'enfant.....	79
II.2. Le développement des capacités de prédiction	81
III - L'étude de l'intégration sensorielle chez l'enfant à partir des technologies interactives.....	83
IV – Créativité et dessin sur tablette tactile.....	85

CHAPITRE 6 – SYNTHÈSE, PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE THÈSE	91
I – Synthèse de la revue de littérature et objectifs de thèse	92
II – Problématique et hypothèses	93

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE 7 – METHODOLOGIE GENERALE.....	99
I - Participants	100
II - Matériel	100
III - Inclusion et exclusion.....	101
IV - Tâche de contrôle.....	102
V - Procédure.....	103
VI - Cotation de l'originalité des dessins	103

CHAPITRE 8 – LE DESSIN CREATIF AU DOIGT SUR TABLETTE TACTILE A L'AGE SCOLAIRE	109
Les apports de l'interface tactile numérique dans l'expression créative graphique : une étude exploratoire chez des enfants d'âge scolaire	110
I. Introduction.....	112
II. Méthode	117
II.1. Participants	117
II.2. Matériel.....	118
II.3. Procédure	119
II.4. Analyse des résultats.....	120
III. Résultats	121
IV. Discussion	125
REFERENCES	129

CHAPITRE 9 – LE DESSIN CREATIF AU DOIGT ET AU STYLET SUR TABLETTE TACTILE A L'ADOLESCENCE	135
Digital touchscreens as a media for creativity during adolescence	136
I. Introduction.....	138
II. Method.....	144
II.1. Participants	144
II.2. Materials	145
II.3. Procedure	145
II.4. Coding.....	146
II.5. Data analysis	157

III. Results	158
IV. Discussion	161
IV.1. The positive effect of drawing with finger on a tablet: a difference with pen drawing on a paper	162
IV.2. The stylus effect in original drawing.....	164
IV.3. Finger and stylus	166
IV.4. Limitations	167
V. Conclusion.....	168
REFERENCES.....	170

CHAPITRE 10 – MODIFIER LES AFFERENCES SENSORIELLES LORS DU DESSIN CREATIF SUR TABLETTE TACTILE DE 6 A 14 ANS	
175	
MODIFYING SENSORY AFFERENCES ON TABLET CHANGES ORIGINALITY IN DRAWINGS	176
I. Introduction.....	179
II. Materials and methods	186
II.1. Participants	186
II.2. Materials	187
II.3. Inclusion and exclusion criteria	187
II.4. Control tasks	188
II.5. Experimental procedure.....	188
II.6. Coding.....	189
II.7. Data analysis	193
III. Results	195
IV. Discussion	203
REFERENCES.....	210

CHAPITRE 11 – UNE PISTE D’INTERVENTION POUR DES ADOLESCENTS PRESENTANT DES TROUBLES DU COMPORTEMENT	
217	
CREATIVE DRAWING ON TOUCHSCREEN: POSITIVE ACTING FOR ADOLESCENTS WITH DISRUPTIVE BEHAVIOR	218
I. Introduction.....	221
II. Method.....	230
II.1. Participants	230
II.2. Materials	231
II.3. Inclusion and exclusion criteria	231
II.4. Control task.....	232
II.5. Experimental procedure	233

II.6. Creativity rating	234
II.7. Qualitative interview.....	237
II.8. Data analysis	237
III. Results	238
III.1. Originality measures.....	239
III.2. Qualitative measures	241
IV. Discussion	244
V. Conclusion.....	249
REFERENCES	251

DISCUSSION GENERALE

I - Synthèse des études expérimentales	258
II – Modifier les afférences sensorielles sur tablette tactile numérique module l’originalité.....	261
III – L’effet des afférences sensorielles sur l’originalité dépend des capacités d’intégration sensorielles	262
III.1. Modifier l’afférence sensorielle au doigt : des bénéfices à tout âge.....	263
III.2. Modifier l’afférence sensorielle au stylet : des bénéfices à partir de 8 ans	264
IV – Des applications possibles auprès d’enfants et adolescents à BEP	265
V – Limites.....	267
V.1. L’effet des différents types d’informations sensorielles.....	267
V.2. L’utilisation du doigt sur papier	268
V.3. Une influence multifactorielle	269
VI - Pour aller plus loin.....	271
VI.1. Le développement de la créativité pourrait-il dépendre du développement des capacités de prédiction sensorimotrice ?.....	271
VI.2. Les effets sur la créativité peuvent-ils s’étendre aux fonctions exécutives ?	271
VII - Conclusion.....	272
 BILBIOGRAPHIE	 276
Liste des figures.....	318
Liste des Tableaux.....	320

INTRODUCTION

Cette thèse porte sur la nature des liens entre créativité et sensorimotricité, et s'ancre dans une actualité sociétale imprégnée de technologies interactives qui font partie intégrante de notre quotidien (Cristia & Seidl, 2015 ; Kabali *et al.*, 2015 ; Nikken & Schols, 2015 ; Ofcom, 2014 ; Radesky *et al.*, 2015 ; Rideout, 2016 ; Rideout *et al.*, 2010 ; Rideout *et al.*, 2013 ; Wartella *et al.*, 2013). Les technologies interactives sont utilisées de façon très majoritaire chez les enfants d'âge scolaire et les adolescents (Geist, 2012 ; NAEYC, 2012). Pourtant, les effets de l'interaction avec la technologie sur les capacités cognitives restent peu explorés. La littérature suggère de distinguer deux types de technologies : les écrans passifs et les écrans interactifs. Les études menées jusqu'à présent montrent que les écrans passifs, comme la télévision, ont tendance à apporter des effets délétères sur le développement des capacités cognitives, comme le langage (*e.g.* Harlé & Desmurget, 2012 ; Zimmerman *et al.*, 2007). En revanche, les technologies interactives, comme la tablette tactile ou le smartphone, pourraient être vecteur de bénéfices. Ces technologies seraient particulièrement faciles d'utilisation, présentant une interface accessible et utilisable au doigt avec de simples gestes. Pour ces raisons, elles semblent particulièrement appropriées pour favoriser le développement de l'enfant, permettant de faciliter sa liberté d'exploration (Couse & Chen, 2010 ; Dubé & McEwen, 2015 ; Geist, 2012). Du fait de ces atouts, son utilisation par les enfants et adolescents en contexte scolaire mène à des bénéfices pour les apprentissages comme la lecture, l'écriture, ou les mathématiques (*e.g.* Berkowitz *et al.*, 2015 ; Tricot, 2020 ; Xie *et al.*, 2018).

Ces bénéfices ont principalement été questionnés dans une situation d'apprentissages scolaires, mais ont peu été étudiés en dehors de ce contexte. Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés aux liens entre les technologies interactives et la créativité des enfants et adolescents.

La créativité peut se définir comme la capacité à réaliser une production nouvelle et adaptée au contexte dans laquelle elle se manifeste (Lubart *et al.*, 2015), et se compose de multiples facteurs cognitifs, conatifs, et environnementaux. Parmi ces facteurs, il a été suggéré que la composante sensorimotrice pourrait avoir des effets bénéfiques pour la créativité (Besançon & Lubart, 2008 ; Jeanneret *et al.*, 2012), mais elle reste à ce jour peu étudiée. Les études développementales semblent rapporter une évolution globalement croissante de la créativité, entrecoupée de périodes de chutes identifiées lors du passage du préscolaire au

scolaire, à la fin de la période élémentaire, et lors du passage du collège au lycée (Torrance, 1962 ; 1963 ; 1967 ; 1968). Cependant, le développement de la créativité ne semble pas consensuel (Barbot *et al.* 2016 ; Barbot & Rogh, 2020 ; Lau & Cheung, 2010 ; Said-Metwaly, 2021), notamment en termes de périodes de regain de créativité.

Au travers de cette thèse, nous suggérons que le facteur sensorimoteur, encore peu exploré à ce jour, pourrait jouer un rôle important dans le processus créatif. Cette thèse vise ainsi à explorer les relations entre créativité et sensorimotricité. Cette relation prend racine dans les théories évolutives de la créativité qui, par une analogie avec les mécanismes de variation et de sélection de l'évolution biologique, considèrent la créativité comme un processus fonctionnant par essai-erreur. Cette analogie permettrait d'expliquer la façon dont une idée créative est générée et retenue, empruntant les mécanismes de variation et de sélection (Campbell, 1960). Dietrich et Haider (2015) ont exploré cette perspective évolutive en proposant de définir le mécanisme d'essai-erreur sur lequel repose la créativité comme une analogie des modèles internes du contrôle de l'action sensorimotrice, qui permet de relier les mécanismes de variation et de sélection. Selon cette conception, le processus créatif reviendrait à générer une idée créative à atteindre dans les modèles directs, puis d'émuler les plans moteurs au cours de multiples itérations dans les modèles inverses, permettant d'atteindre cette idée. Les afférences sensorielles étant l'élément central permettant de nourrir les modèles internes du contrôle de l'action pourraient alors également jouer un rôle majeur dans le processus créatif. Ces afférences sensorielles peuvent être modulées grâce à l'utilisation d'outils, permettant d'augmenter ou de réduire les afférences sensorielles disponibles pendant une tâche créative. Une modification des afférences sensorielles pourrait ainsi moduler la créativité lors d'une tâche graphique, en fonction des outils utilisés.

L'objectif de cette thèse est donc de déterminer dans quelle mesure les afférences sensorielles peuvent moduler la créativité des enfants et adolescents au travers d'interfaces numériques interactives. Cette thèse a également pour vocation d'évaluer les bénéfices que pourraient impliquer une modification des afférences sensorielles sur la créativité des populations présentant des difficultés dans la mobilisation de leurs capacités cognitives.

Afin de répondre à ces objectifs, notre travail se présentera de la manière suivante : dans un premier temps, nous ferons une revue de la littérature portée sur l'utilisation et les recommandations des technologies numériques (Chapitre 1), puis nous dresserons un état des lieux des recherches sur la créativité (Chapitre 2), en décrivant la créativité conçue au sein d'une

approche multivariée et en faisant état des connaissances portant sur le développement de la créativité chez l'enfant et l'adolescent. L'absence d'identification de facteurs de développement responsables du gain et des périodes de rebond de la créativité nous mènera, au travers d'un prisme évolutif, à la description du processus créatif comme une boucle de variation-sélection reposant sur un mécanisme d'essai-erreur (Chapitre 3). Ce mécanisme sera décrit au travers des modèles internes du contrôle de l'action sensorimotrice, menant à une analogie entre créativité et contrôle de l'action sensorimotrice, dans laquelle le modèle inverse produit une idée créative à atteindre par le modèle direct qui génère de multiples plans moteurs pour y arriver (Chapitre 4). Les afférences sensorielles étant au cœur des modèles internes, nous nous appuierons sur cette analogie en proposant de considérer les afférences sensorielles comme un facteur susceptible de moduler la créativité. L'étude des liens entre créativité et sensorimotricité chez l'enfant et l'adolescents nous mènera enfin à décrire le développement de l'intégration sensorielle chez les enfants et adolescents et la façon dont les afférences sensorielles peuvent se trouver modifiées lors d'utilisation d'outils tactiles numériques en fonction du développement des enfants et adolescents. (Chapitre 5).

A l'issue de cette revue théorique, nous établirons une synthèse (Chapitre 6), puis nous présenterons notre approche expérimentale (Chapitre 7) permettant de déterminer la relation entre créativité et afférences sensorielles lors de l'utilisation d'interfaces tactiles numériques. Il s'agira de déterminer, à l'aide de 4 expérimentations présentées sous forme d'articles de recherche, si l'utilisation de telles interfaces au doigt ou au stylet peut mobiliser plus efficacement la créativité d'enfants et adolescents dans une tâche graphique, et si ces bénéfices peuvent se retrouver auprès de populations présentant des difficultés dans la mobilisation de leurs capacités cognitives. Le chapitre 8 présentera une première étude (Bitu *et al.*, 2019) qui aura pour objectif de déterminer si la tablette tactile utilisée au doigt peut améliorer l'originalité des dessins d'enfants de 6-7 et 8-9 ans, au travers d'une tâche de dessin créatif du bonhomme. Au travers du chapitre 9, une deuxième étude (Bitu *et al.*, 2021) cherchera à déterminer si les bénéfices liés à l'utilisation du doigt peuvent se retrouver chez des adolescents de 13-14 ans, tout en comparant ces effets à l'utilisation du stylet, lors d'une tâche de dessin créatif d'une maison. Le chapitre 10 décrira une troisième étude (Bitu *et al.*, 2022) qui questionnera ces effets de l'utilisation de la tablette tactile au doigt et au stylet, sur une période reconnue dans la littérature comme marquée par un développement des capacités d'intégration et de prédiction sensorielle, chez des enfants de 6 à 14 ans. Cette étude testera notamment l'hypothèse de la

charge cognitive impliquée dans l'utilisation de ces outils lors d'une tâche de créativité graphique. Enfin, le chapitre 11 présentera une quatrième étude (Bitu *et al.*, soumis) qui explorera l'application des effets observés au cours des précédents chapitres, à des adolescents présentant des troubles du comportement qui perturbent la mobilisation de leurs pensées. Ces troubles pouvant se comprendre comme une difficulté à mobiliser le sens de l'agentivité, qui dépend de la sensorimotricité, cette étude testera si l'interaction avec des outils qui rehaussent les afférences sensorielles peut permettre à ces adolescents de mobiliser positivement leurs pensées dans une tâche créative.

L'ensemble de ce corps de données permettra de discuter l'implication des composantes sensorimotrices, et plus particulièrement les afférences sensorielles, dans la créativité. Nous discuterons de ces effets au regard des capacités d'intégration sensorielles chez l'enfant et l'adolescent et des outils utilisés, puis nous aborderons les applications possibles de ces effets à des populations à besoin éducatif particulier. Enfin, nous dresserons les limites de nos études et proposerons quelques pistes à explorer.

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE 1 – LES NOUVELLES TECHNOLOGIES CHEZ L'ENFANT ET L'ADOLESCENT : QUELS BENEFICES ?

« Nous vivons peut-être dans un monde hautement technologisé, mais il est concevable qu'il le soit devenu par l'évolution, plutôt que par la révolution. »

(Bennett, Maton, & Kervin, 2008)

I – La révolution numérique

I.1. L'utilisation des technologies par les enfants et adolescents : un débat sociétal

Depuis le début des années 1990, l'arrivée d'internet a influencé de façon prédominante le monde dans lequel nous évoluons, qualifiant cette période de révolution numérique. Prensky (2001) nommait « digital natives » les nouvelles générations d'enfants qui sont nées et ont grandi, à partir des années 1980, dans un monde entouré de technologies. Imprégnées des technologies numériques, ces générations penseraient et agiraient différemment en comparaison des générations précédentes (Howe & Strauss, 2000 ; Tapscott, 1998). Alors que la technologie change plus rapidement qu'à n'importe quel autre moment de l'histoire (Bennett & Maton, 2010), l'idée qu'elle impacte profondément nos vies reste omniprésente et occupe une place centrale dans un débat sociétal. Certains voient la technologie numérique comme un danger grandissant pour les générations en devenir, d'autres voient cette révolution comme une vision utopique d'un nouveau monde numérique accessible par tous (Bennett & Maton, 2010). Le débat concernant les technologies numériques a rapidement pris une forme de panique morale (Bennett *et al.*, 2008 ; Bennett & Maton, 2010 ; Cohen, 2011 ; Ferguson, 2016). Selon Cohen (2011), une panique morale survient lorsque « des éléments, personnes ou groupes de personnes sont considérées comme une menace envers les valeurs et intérêts sociétaux » (p. 9). Bennett *et al.* (2008, 2010) condamne notamment l'utilisation abusive de langage dramatique proclamant des changements négatifs profonds qui impacteraient la nature même de l'éducation. Selon ce discours dramatique, les nouvelles générations nées dans un environnement numérique seraient si différentes des anciennes générations en termes de compétences technologiques et de modes de pensée que l'éducation donnée par les anciennes générations ne leur correspondrait plus. Cependant, selon Bennett *et al.* (2008, 2010), les croyances ont été mises en avant en lieu et place d'un débat raisonné basé sur des preuves scientifiques, résultant en un débat vide qui repose sur des affirmations dénuées de fondations solides et qui se répètent pourtant comme des faits établis, limitant la possibilité d'un débat ouvert et rationnel (Bennett & Maton, 2010). Ainsi construit, ce débat irait à l'encontre des avancées de la connaissance dans ce domaine. Selon Bennett et Maton (2010), si nous voulons comprendre l'effet des technologies numériques sur les enfants, il est nécessaire de changer la nature du débat, en se tournant vers un débat scientifique et non plus idéologique. Nous pourrions ainsi nous engager dans les questions importantes pouvant faire l'objet de recherches scientifiques, plutôt que d'adopter des positions idéologiques opposées (Bennett & Maton,

2010) qui cristallisent les questions fondamentales de recherche dans un débat stérile. Ce domaine d'études portant sur les effets des technologies numériques bénéficierait notamment d'une base plus théoriquement informée (Bennett & Maton, 2010). Ainsi, dans la lignée des propositions de Bennett, nous posons une question fondamentale : comment les technologies numériques peuvent-elles moduler les capacités cognitives des enfants grandissant dans des sociétés occidentales ?

I.2. L'omniprésence des technologies numériques dans l'environnement des enfants et adolescents

Cette question prend tout son sens dans le contexte de nos sociétés occidentales dans lesquelles les technologies numériques occupent une place centrale, notamment auprès des enfants et adolescents (Rideout, 2016). Aux Etats-Unis, en 2013, environ 72% des enfants de 0 à 8 ans ont déjà utilisé une technologie numérique portative (Rideout *et al.*, 2013), et leur utilisation chez les adolescents a été estimée à 8.5h d'utilisation par jour (Rideout *et al.*, 2010). Des chiffres similaires se retrouvent en Europe. En effet, un questionnaire adressé à 896 parents aux Pays-Bas a rapporté que la quasi-totalité des enfants de 0-7 ans ont eu l'opportunité d'utiliser les technologies à la maison (Nikken & Schols, 2015). Au Royaume-Uni, deux tiers des enfants âgés de 3-4 ans vivent au quotidien avec une tablette tactile (Ofcom, 2014). En France, une étude a rapporté que 66% des enfants d'un an et 87 à 91% des enfants de 2 ans ont déjà utilisé une tablette tactile (Cristia & Seidl, 2015). De façon générale, on observe que les smartphones et tablettes tactiles sont les outils les plus fréquemment utilisés (51 et 44% respectivement) par les enfants et adolescents (Rideout *et al.*, 2013).

Cette utilisation semble ne pas se limiter aux foyers les plus aisés. En effet, Kabali *et al.* (2015) ont récolté des données sur l'exposition et l'utilisation des technologies mobiles comme les smartphones et les tablettes tactiles auprès d'enfants appartenant à une catégorie sociale faible aux Etats-Unis. Sur un échantillon de 350 enfants de 6 mois à 4 ans provenant de foyers avec peu de revenus et d'une communauté minoritaire, 96,6% des enfants avaient déjà utilisé des technologies portables, la plupart ayant débuté avant 1 an. De plus, 83% des ménages étaient équipés de tablettes tactiles, et 77% étaient équipés de smartphones. Ces données suggèrent que les ménages à bas revenus semblent accéder plus régulièrement aux nouvelles technologies en 2015 (Radesky *et al.*, 2015 ; Wartella *et al.*, 2013), documentant un déclin rapide de la fracture numérique (Kabali *et al.*, 2015). Ce déclin de la fracture numérique constaté pour des foyers

avec des enfants et adolescents n'est cependant pas observé pour tous les groupes d'âges. En 2019, un rapport de l'INSEE faisait état d'un taux d'illectronisme (*i.e.* illettrisme électronique) de 67.2% chez les 75 ans et plus, contre 3% seulement chez les 15-29 ans (Legleye & Rolland, 2019).

Toutes ces données suggèrent que l'interaction des enfants avec les technologies numériques est majoritairement intégrée dans leur quotidien. De ce fait, les expériences interactives des enfants et le développement de compétences liées à la technologie dès leur plus jeune âge aura un impact significatif sur leur vie future, autrement dit, sur leur développement (Kaye, 2016 ; Plowman *et al.*, 2012). L'omniprésence des technologies se retrouve également à l'âge adulte, notamment dans le monde professionnel (Van Laar *et al.*, 2017). Développer des compétences numériques pendant l'enfance est donc nécessaire pour préparer la vie adulte (Van de Oudeweetering & Voogt, 2018). Pour ces raisons, Kaye (2016) considère qu'il n'est ni possible, ni bénéfique d'empêcher l'utilisation des technologies par les enfants dans notre société actuelle. Cette omniprésence des technologies dans l'environnement au sein duquel les enfants et adolescents se développent (Geist, 2012 ; NAEYC, 2012) a mené à un intérêt particulier concernant l'impact de l'utilisation de ces technologies sur le développement des capacités cognitives des enfants et adolescents.

I.3. Méfiance et défiance face à la technologie

Devant le grand inconnu et la rapidité avec laquelle les technologies ont envahi notre quotidien, plusieurs auteurs se sont lancés dans une campagne de mise en garde contre ses potentiels effets délétères. En l'absence de recommandations académiques, Serge Tisseron (2012) a tenté d'établir, depuis 2008, des règles à propos de l'utilisation des écrans chez les enfants et adolescents, en proposant la règle des 3-6-9-12, sans faire de distinction entre les différentes plateformes utilisées (télévision, ordinateur, ...). Cette règle, basée sur la simple conviction de l'auteur, propose de proscrire l'exposition à tout type d'écran avant 3 ans, aux jeux vidéo avant 6 ans, à internet avant 9 ans et d'éviter l'utilisation autonome des technologies numériques avant 12 ans. Ces règles, d'abord annoncées comme étant strictement définies à ces âges précis, ont été rééditées sous la forme de balises des 3-6-9-12. Les balises sont des indications plus souples, conseillant de respecter certaines périodes d'âge pour l'utilisation des technologies plutôt qu'une date d'anniversaire spécifique avant laquelle l'exposition serait strictement à proscrire. Serge Tisseron (2018 ; 2021) utilise ces balises pour conseiller un usage

modéré plutôt qu'une interdiction totale d'exposition aux écrans numériques. Néanmoins, l'auteur considère que « tenir l'enfant préscolaire à l'écart des écrans semble être la meilleure façon de bien les utiliser à l'âge scolaire » (Tisseron, 2018, p. 7). Dans son ouvrage, il met ainsi en garde contre l'utilisation d'écrans numériques en invoquant le risque de priver les enfants d'apprentissages cognitifs et relationnels essentiels, et des conséquences graves que pourrait avoir l'utilisation des écrans sur le développement psychomoteur de l'enfant. Cependant, ces risques présumés semblent reposer uniquement sur une conviction marquée et assumée par le « combat » mené par son association 3-6-9-12. Comme le rapporte la Société Française de Pédiatrie, les recommandations d'âges avancées dans l'ouvrage de Tisseron (2018) ne sont basées sur aucune recherche scientifique ou observation épidémiologique (Picherot *et al.*, 2018).

Ce débat et ces prises de positions idéologiques plutôt que scientifiques annoncées par Bennett (2008 ; 2010) se retrouvent également hors de nos frontières françaises, comme l'atteste l'ouvrage de Susan Greenfield (2015). Greenfield suggère alors que l'utilisation d'internet et des jeux vidéo pourrait avoir des effets dévastateurs sur le cerveau, les émotions et le comportement. L'autrice spéculait notamment que l'interaction en ligne pourrait être un déclencheur de l'autisme ou de traits autistiques. Cet ouvrage, largement médiatisé, a rapidement suscité des critiques scientifiques, comme celles de Bell *et al.* (2015). Selon ces derniers, l'ouvrage de Greenfield ne serait fondé sur aucune publication scientifique à l'appui. L'argumentation se baserait uniquement sur des corrélations servant d'argument causal, d'anecdotes ou des études de faible qualité scientifique (Bell *et al.*, 2015). De plus, les affirmations de Greenfield se sont vues contredites par des résultats d'études scientifiques. Par exemple, alors que Greenfield (2015) déclarait que l'utilisation intense de jeux vidéo pouvait mener à une impulsivité accrue, une perte d'attention, et une augmentation de l'agressivité, Bell *et al.* (2015) ont rapporté que les éléments scientifiques suggèrent au contraire une légère amélioration des performances neuropsychologiques induites par les jeux d'action (Bisoglio *et al.*, 2014 ; Powers *et al.*, 2013), et une amélioration des pensées et comportements socialement bénéfiques par l'utilisation de jeux de coopération (Anderson *et al.*, 2010). Concernant les jeux vidéo violents, la faible qualité des études menées et les effets contradictoires ne permettraient pas d'en tirer des conclusions sur un quelconque effet délétère (Elson & Ferguson, 2014).

Bell *et al.* (2015), en se reposant sur la littérature scientifique, indiquent cependant quelques limites liées à l'utilisation des technologies numériques. Plutôt que d'affecter les

capacités des enfants, elles pourraient être source d'effets négatifs lorsqu'elles sont utilisées pour remplacer d'autres activités. Par exemple, une faible activité physique associée avec la consommation passive des technologies numériques pourrait être liée à des risques d'obésité et de diabète (Saunders *et al.*, 2014), de la même façon que l'utilisation des jeux vidéo aux dépens des activités académiques nuit aux performances de l'enfant à l'école (Weis & Cerankosky, 2010). Ainsi, la simple utilisation des technologies numériques ne serait pas en elle-même source d'effets délétères sur la cognition. Ces effets négatifs proviendraient plutôt de la façon dont les technologies numériques sont utilisées par les enfants et adolescents, c'est-à-dire, de l'usage qui est fait de ces technologies. Le mauvais usage peut être lié au temps passé à utiliser une technologie numérique ou à son utilisation lors de moments non appropriés. Par exemple, l'utilisation de tout type de technologie numérique avant le coucher (une télévision, une console de jeux, ou même un ordinateur) peut entraîner des conséquences négatives sur le sommeil des enfants (Van den Bulck, 2004 ; Swing *et al.*, 2010). L'existence de ce débat sur les technologies numériques pourrait reposer sur une confusion de plusieurs niveaux entre les pro- et anti-technologies. Par exemple, le simple fait d'utiliser un type de technologie numérique (l'utilisation) est souvent confondu avec la façon dont elle est utilisée (l'usage). De même, les différents types de technologies numériques, pourtant distincts, sont souvent regroupés sous le terme générique « écrans ». Cette absence de différenciation et ce flou persistant dans la définition du sujet pourrait être la source de divergences qui pourraient finalement ne pas l'être. Sweetser *et al.* (2012) ont différencié les écrans dits « actifs », qui impliquent un engagement cognitif ou physique pendant une activité comme jouer à un jeu vidéo par exemple, par rapport à des écrans dits « passifs », qui impliquent de recevoir passivement de l'information. Nous allons tenter d'éclaircir le débat autour des technologies en se concentrant tout d'abord sur les effets des technologies numériques utilisées de façon passive, comme la télévision.

II - L'exposition passive aux écrans

II.1. Du mauvais usage des technologies numériques passives

De multiples études scientifiques ont ainsi rapporté des effets nuisibles de l'exposition aux écrans numériques sur le développement et la santé des enfants (*e.g.* AAP, 2001). Il a été principalement avancé que l'exposition des enfants de moins 2 ans aux technologies numériques dotées d'un écran devant lesquels l'enfant reçoit passivement des informations,

comme une télévision, pourrait s'avérer négative pour leur développement de façon générale (Brown & Council on Communications and Media, 2011 ; Zimmerman & Christakis, 2005). Pour chaque heure passée devant la télévision, les enfants de moins de 2 ans perdraient 50 minutes d'interaction avec leurs parents et une vingtaine de minutes de jeu créatif (Brown & Council on Communications and Media, 2011). Ces effets négatifs de l'exposition à la télévision ont été retrouvés en école élémentaire (Thompson, 1964) et maternelle (Anderson & Pempek, 2005). Pour explorer les effets des technologies, Harlé et Desmurget (2012) ont réalisé une analyse de la littérature concernant les effets de l'exposition aux écrans numériques sur le développement cognitif de l'enfant. Cette revue de littérature a révélé des effets négatifs sur la réussite scolaire, le développement du langage, le développement de l'attention, et l'agressivité ou l'impulsivité, et sur le sommeil des enfants. La revue de littérature de Harlé et Desmurget (2012) illustre cependant le manque de différenciation entre les différents niveaux, rapportant des effets négatifs de l'exposition aux « écrans » de façon générale, bien que les auteurs aient argumenté la majeure partie des effets rapportés par des études concernant la consommation de télévision, sans couvrir et différencier les différents types de technologie numérique. Les effets rapportés dans leur revue de littérature semblent concorder avec les études s'étant particulièrement intéressées aux effets négatifs des écrans passifs.

Tout d'abord, plusieurs études semblent s'accorder sur des effets négatifs de l'exposition aux écrans numériques passifs sur les apprentissages scolaires. Il a par exemple été avancé que les enfants apprendraient moins de la télévision en comparaison d'expériences de vie réelle équivalentes (Anderson & Pempek, 2005), rendant le temps passé à regarder la télévision moins bénéfique que toute autre activité de vie quotidienne. Concernant les enfants de 2 ans et moins, l'utilisation d'écrans passifs pourrait retarder les compétences en littératie comme la compréhension de la lecture, compromettre les compétences en numératie comme la reconnaissance des nombres, ou encore modifier des fonctions cognitives plus générales comme la mémoire à court terme (Zimmerman & Christakis, 2005). Les effets délétères de la télévision sur les capacités d'apprentissage ont également été rapportés à 4-5 ans (Geist & Gibson, 2000). Une étude américaine a ainsi conclu que le temps passé par les enfants et adolescents à regarder la télévision influençait négativement leurs performances scolaires (Comstock & Paik, 1991). Chaque heure de consommation de télévision augmenterait de 43% le risque qu'un enfant sorte du système scolaire sans diplôme (Hancox *et al.*, 2005 ; Harlé & Desmurget, 2012) et son augmentation d'une heure à l'adolescence suffirait à multiplier par deux le risque d'échec scolaire (Johnson *et al.*, 2007). Ensuite, la consommation de télévision

aurait un effet négatif sur l'attention (Harlé et Desmurget, 2012). Par exemple, il a été démontré que l'exposition passive à la télévision à 1 et 3 ans était associée à des problèmes attentionnels à 7 ans (Christakis *et al.*, 2004). Une heure de consommation quotidienne pour un enfant de moins de trois ans multiplierait par deux les risques de trouble de l'attention à l'école primaire (Zimmerman & Christakis, 2007) et cette même consommation à l'école primaire augmenterait le risque de 50% à l'adolescence (Landhuis *et al.*, 2007). L'utilisation de la télévision induirait également des effets délétères sur le développement du langage et le vocabulaire (Linebarger & Walker, 2005). Chaque heure quotidienne de vidéo appauvrirait le lexique d'enfants entre 8 et 16 mois de l'ordre de 10% (Zimmerman *et al.*, 2007). Le risque d'effets négatifs sur le langage serait multiplié par 6 si l'enfant est exposé quotidiennement à la télévision (Chonchaiya & Pruksananonda, 2008). Ces effets négatifs s'expliqueraient par la perte de mots entendus par l'enfant lorsque la télévision est allumée dans le foyer, pouvant atteindre un déficit de 40% dans une famille française qui consomme en moyenne 6h de télévision au quotidien (Christakis *et al.*, 2009). La consommation de télévision utilisée en arrière-plan induit une perte d'interaction sociale entre l'enfant et les parents, tant qualitativement que quantitativement (Kirkorian *et al.*, 2009), ainsi qu'une baisse significative de mots et d'énoncés produits par le parent qui pourrait nuire au développement du langage (Pempek *et al.*, 2014). Enfin, il est avancé que les écrans favoriseraient les comportements agressifs et l'impulsivité par une exposition aux images violentes qui auraient un impact sur la violence d'une puissance similaire à l'impact de la consommation de tabac sur le cancer du poumon (Bushman & Anderson, 2001 ; Desmurget, 2011 ; Harlé et Desmurget, 2012). Selon Desmurget (2011), l'exposition aux images violentes augmenterait le recours à l'agressivité, habituerait l'enfant à la violence, et favoriserait le sentiment de vivre dans un monde hostile. Le développement de relations sociales de mauvaise qualité proviendrait de la combinaison des effets délétères sur les performances scolaires, les capacités langagières, l'attention et l'impulsivité (Harlé et Desmurget, 2012).

En dehors des effets négatifs sur le développement cognitif, la consommation d'écrans passifs aurait également des effets délétères sur la santé des enfants et adolescents. Principalement, la trop forte consommation d'écrans passifs tels que la télévision aurait un impact direct sur l'obésité pendant l'enfance (Epstein *et al.*, 2008 ; Hancox & Poulton, 2006 ; Robinson, 1999). L'utilisation passive d'écrans serait associée à des troubles de l'humeur et de l'anxiété de façon significative, en comparaison de l'utilisation active d'écrans (Kim *et al.*, 2020).

De plus, l'exposition à tout type d'écran numérique à l'heure du coucher induirait également des difficultés de sommeil (Harlé et Desmurget, 2012). La présence d'un écran numérique, quel qu'il soit, dans la chambre de l'enfant aurait un effet négatif sur la quantité mais également la qualité du sommeil (Owens *et al.*, 1999 ; Zimmerman, 2008). Cet effet serait particulièrement marqué chez les adolescents (Hisler *et al.*, 2020 ; Vernon *et al.*, 2018 ; Woods & Scott, 2016). Par exemple, les adolescents consommateurs de télévision pendant la phase d'endormissement dormiraient en moyenne 45min de moins que ceux qui s'endorment sans (Eggermont & Van den Bulck, 2006).

Au travers de cette revue d'études, nous pouvons souligner que les effets négatifs rapportés pourraient être davantage liés aux usages des technologies numériques passives (*e.g.* utilisation excessive, en remplacement d'activités académiques ou de sommeil) qu'à leur réelle utilisation, en accord avec ce qu'avançaient Bell *et al.* (2015). Ces effets délétères principalement marqués dans les usages impliquent un besoin crucial de recommandations académiques concernant l'encadrement de la consommation des technologies numériques par les enfants et adolescents.

II.2. Les premières recommandations académiques portant sur les effets des technologies numériques

Au-delà des recommandations spéculatives proposées par Tisseron (2008), plusieurs sociétés savantes ont publié des recommandations concernant l'usage des technologies numériques de tout type, en se reposant sur la littérature scientifique. Les premières recommandations de l'American Academy of Pediatrics (AAP, 1999) préconisaient une absence totale d'exposition à tout type écran numérique avant 2 ans, sans discrimination claire entre les différents types de technologies numériques. Cette préconisation a été réaffirmée dans plusieurs autres versions de l'AAP en 2010 (Strasburger & Council on Communications and Media, 2010) et en 2011 (Brown & Council on Communications and Media, 2011). La version de 2010 alertait également sur les risques de comportements agressifs qui avaient été reliés à la violence des médias, mais également la dangerosité de la mise en valeur des comportements sexuels (Brown & Strasburger, 2007 ; Kunkel *et al.*, 2007) et des comportements addictifs comme la consommation de tabac (Glantz *et al.*, 2010 ; Millett & Glantz, 2010 ; Sargent *et al.*, 2005) ou d'alcool (Christenson *et al.*, 2000 ; Ellickson *et al.*, 2005 ; Gerbner, 2001 ; Grube & Waiters, 2005 ; Henriksen *et al.*, 2008 ; Jernigan, 2006 ; Stacy *et al.*, 2004 ; Wellman *et al.*,

2006) trop souvent mise en avant à la télévision. En outre, l'AAP mettait en garde contre les dangers que nous avons évoqués dans la partie précédente, de la surconsommation de télévision qui était notamment liée à l'obésité (Harris *et al.*, 2009 ; Institute of Medicine, 2006 ; Jordan *et al.*, 2008 ; Laurson *et al.*, 2008 ; Lumeng *et al.*, 2006), et qui pourrait être un facteur de décrochage scolaire (Borzekowski & Robinson, 2005 ; Sharif *et al.*, 2010 ; Zimmerman & Christakis, 2005). Ainsi, l'AAP recommandait notamment une consommation de technologies numériques inférieure à 2h par jour, une surveillance accrue des types de programmes visionnés, et la mise en place d'un environnement sans technologie numérique dans la chambre des enfants. Bien que l'AAP ait souhaité centrer son propos autour des écrans numériques de façon générale, les éléments rapportés pour argumenter les dangers dans les usages des technologies semblent principalement se concentrer sur l'exposition à la télévision.

Jusqu'à la fin des années 2010, les recommandations d'usage des technologies numériques ont été marquées par un ensemble d'effets négatifs sans distinction faite entre les différents types de technologies. Or, les principaux dangers semblent résider dans l'utilisation d'écrans passifs comme la télévision qui apporte une multitude d'effets délétères pour les enfants et adolescents. Il a fallu attendre les mises à jour émises en 2013 par l'AAP (Council on communications and media *et al.*, 2013), qui continuait de mettre en garde contre les effets délétères des écrans numériques en ciblant plus explicitement les écrans passifs comme la télévision. Ainsi, il était recommandé de limiter le temps d'écran à 2 heures par jour au maximum et d'éviter tout type d'exposition aux technologies avant 2 ans. En France, les recommandations de l'Académie des sciences de la même année (Bach *et al.*, 2013) se voulaient moins strictes avant 3 ans, en déconseillant l'exposition passive et prolongée à la télévision, qui, étant « un écran non interactif devant lequel l'enfant est passif » (p. 10), n'apportait aucun effet positif. La connotation négative des technologies numériques dans le débat sociétal aurait donc pu trouver sa source dans le mauvais usage des technologies, mais également dans l'utilisation passive de ces écrans numériques qui ne semble pas propice au développement des enfants et adolescents.

III - Un nouveau débat marqué par l'apparition des technologies interactives

L'accessibilité des ordinateurs, de plus en plus grande dès la fin des années 1990 notamment sous forme de tablette sur laquelle l'écran était posé au-dessus d'un clavier plus

petit (Kaye, 2016), a progressivement apporté une bascule dans l'utilisation des technologies numériques entre les années 2000 et 2010. Cette bascule a mené les enfants et adolescents, depuis les années 2000, à passer de moins en moins de temps à utiliser des technologies numériques passives comme la télévision, au profit de l'utilisation de technologies numériques interactives dont le temps d'utilisation a fortement augmenté à la fin des années 2000 (Beyers, 2009). Le débat concernant les effets des écrans numériques sur le développement cognitif s'est donc déplacé vers un tout nouveau type de technologie numérique : les écrans interactifs.

III.1. Les écrans tactiles numériques : une nouvelle révolution

La transition vers l'interactivité des écrans s'est faite en réponse aux difficultés que présentaient les ordinateurs pour les enfants. En effet, bien que plus accessibles, l'utilisation des ordinateurs ne semblait pas assez optimale pour les jeunes enfants. Pour interagir avec un ordinateur, il faut nécessairement passer par l'utilisation d'outils intermédiaires comme un clavier et/ou une souris. Or, l'utilisation du clavier et de la souris nécessite un certain niveau de développement sensorimoteur et cognitif (Geist, 2012). Contrôler ces outils intermédiaires requiert d'avoir atteint une certaine maturité dans le développement sensorimoteur afin de contrôler l'action de sa main et de ses doigts sur la souris pour naviguer et cliquer, ainsi que pour utiliser le clavier. En outre, le découplage spatial entre l'action effectuée sur l'outil intermédiaire (souris ou clavier) et la réponse sur l'écran pourrait également mettre à mal le contrôle de l'action puisque le retour visuel par l'écran ne se trouve pas dans l'espace d'action initial (Kudlinski, 2015). Au-delà de l'interaction sensorimotrice, l'utilisation du clavier pour interagir avec l'ordinateur nécessite que l'enfant puisse déchiffrer et comprendre les symboles, sollicitant des capacités cognitives qui doivent être suffisamment développées (Geist, 2012). Cette problématique inhérente aux contraintes matérielles a rapidement été corrigée par l'arrivée des écrans tactiles numériques qui a mené à une nouvelle génération de tablettes, plus fines, plus légères, et sans clavier (Kaye, 2016).

En 2007, le premier iPhone doté d'un écran tactile, suivi en 2010 du premier iPad, ont marqué le début des technologies « smart », terme employé pour désigner une technologie numérique capable de faire quelque chose qu'une personne intelligente peut faire, comme paramétrer un agenda (Walter Derzko n.d, cité dans Kaye, 2016). Les succès de l'iPhone et de l'iPad forment deux révolutions majeures dans l'utilisation du numérique tactile, qui ont enclenché un développement rapide des technologies tactiles numériques, notamment au travers

des smartphones et des tablettes tactiles numériques, définies comme des appareils électroniques présentant un écran visuel, contrôlé par des gestes et des actions tactiles exécutés avec les doigts ou un stylet (Dubé & McEwen, 2015).

Ces avancées technologiques ont permis de supprimer les barrières qui empêchaient leur utilisation optimale par les jeunes enfants. En effet, à la différence des ordinateurs, les tablettes tactiles numériques sont plus simples d'utilisation car elles permettent le contrôle direct du doigt sur l'interface sans avoir à manipuler un outil tiers comme une souris, un crayon ou un clavier qui nécessitent de plus grandes capacités de contrôle moteur (Merchant, 2015 ; Reychar & Wu, 2015 ; Siegle, 2013 ; Tootell *et al.*, 2013 ; Wang & Shen, 2012). Cette propriété tactile, qui permet une utilisation au travers de gestes simples comme appuyer, glisser, ou tracer avec les doigts, fait de la tablette tactile numérique un outil à succès, en particulier auprès des plus jeunes dont l'utilisation aurait très fortement augmenté dès l'âge de 1 à 2 ans (Merchant, 2015 ; Tootell *et al.*, 2013). Le contrôle de l'interface par de simples gestes nécessite un degré minimal d'instruction formelle, qualifiant cette technologie numérique d'intuitive, accessible, et simple d'utilisation (Aziz, 2013 ; Connell *et al.*, 2015 ; Couse & Chen, 2010 ; Dubé & McEwen, 2015 ; Geist, 2012). L'interface intuitive que la tablette tactile numérique propose, permet donc aux enfants de 2 ans de manipuler les objets sur l'écran très facilement, grâce à des compétences sensorimotrices et cognitives suffisamment développées (Geist, 2012). En d'autres termes, la tablette tactile numérique serait plus appropriée d'un point de vue développemental que l'ordinateur (Geist, 2012). En permettant aux jeunes enfants d'interagir sans contrainte physique ou développementale dès 1 à 2 ans, la tablette tactile favoriserait l'autonomie des plus jeunes en leur permettant de découvrir et apprendre sans l'intervention systématique d'un adulte. Les jeunes enfants sont ainsi en mesure de contrôler leur propre expérience avec la technologie numérique, en ayant par exemple la possibilité de passer d'une application à une autre lorsqu'ils le souhaitent, là où un ordinateur nécessiterait l'intervention d'un adulte (Geist, 2012). Autrement dit, la prise en main rapide et indépendante des tablettes tactiles numériques favoriserait la liberté d'exploration de l'enfant (Couse & Chen, 2010). Enfin, un des atouts majeurs de la tablette tactile numérique réside dans l'utilisation active que nous faisons avec cette technologie numérique, plutôt que passive (Sweetser *et al.*, 2012). Cet engagement actif avec la technologie numérique permet un engagement intense des enfants dans l'activité, par la multimodalité sensorielle (par exemple, grâce à des animations sonores et visuelles pendant une interaction tactile) permise par l'écran interactif (Geist, 2012, Neumann, 2018 ; Roskos *et al.*, 2014). Cette stimulation multimodale soutient l'engagement prolongé dans la tâche et maintient

l'attention des enfants dans l'activité en cours en stimulant les sens visuel, auditif, et tactile (Roskos *et al.*, 2014).

L'arrivée des nouvelles technologies tactiles numériques, présentant des caractéristiques bien différentes des technologies numériques qui existaient jusque-là, ont mené progressivement à une reconsidération de l'avis général sur les écrans numériques, notamment en termes de recommandations.

III.2. Une reconsidération des recommandations académiques

Dès 2013, les premières mises à jour des recommandations ont été publiées, prenant en considération les nouvelles technologies qui pouvaient apporter « d'important effets positifs », notamment à l'école (Council on communications and media *et al.*, 2013). En France, l'Académie des sciences (Bach *et al.*, 2013) s'est également centrée sur les usages de ces nouvelles technologies numériques, en recommandant par exemple une présence humaine dans l'utilisation interactive et occasionnelle des outils numériques entre 2 et 6 ans. Puis, entre 6 et 12 ans, une éducation aux écrans était préconisée à l'école élémentaire, tout en soulignant qu'une utilisation pédagogique des outils numériques pouvait marquer un progrès éducatif important, à l'école comme à la maison. Enfin, concernant les adolescents, l'académie recommandait de faire la distinction entre une pratique excessive qui pourrait avoir des effets délétères, et une pratique contrôlée qui pourrait apporter des bénéfices. En outre, pour la première fois, l'académie mettait en avant que des outils tels que les jeux vidéo pouvaient constituer un support de prise en charge, en aidant des enfants suivant une psychothérapie ou une chimiothérapie, des enfants présentant des difficultés émotionnelles et comportementales, des enfants avec des problèmes médicaux (Griffiths, 2003), ou encore des enfants présentant un trouble du spectre de l'autisme (Durkin, 2010).

Cependant, les recommandations mises à jour semblaient encore trop restrictives pour certains auteurs, comme Christakis (2014) qui avait participé à la rédaction des recommandations de l'AAP en 2011. Selon lui, l'arrivée des interfaces tactiles numériques impliquait de revoir complètement les recommandations. En effet, selon Christiakis (2014), un outil interactif tel qu'une tablette tactile numérique pourrait être utilisée simplement comme un écran passif et avoir les mêmes effets négatifs qu'une télévision. Mais si elle est utilisée activement, comme un outil interactif, alors les effets pourraient être bien différents, semblables

à ceux d'un jouet traditionnel comme des cubes, qui pourrait soutenir le développement sensorimoteur et cognitif de l'enfant. Christakis (2014) propose ainsi de revoir les recommandations concernant l'utilisation de ces nouveaux outils par les enfants de moins de 2 ans. Cet appel reposant sur une utilisation grandissante des technologies interactives chez les plus jeunes a mené à une nouvelle mise à jour des recommandations par l'AAP en 2016 (Council on Communications and Media & MBE, 2016), appuyé en France par la Société Française de Pédiatrie (Picherot *et al.*, 2018) puis par un nouveau rapport de l'Académie des sciences (Adès *et al.*, 2019). Les dernières recommandations émises par les académies ne déconseillent plus l'utilisation des outils numériques à certaines tranches d'âge, mais préviennent des limites dans l'usage de ces technologies. Il est notamment conseillé, comme pour les écrans numériques passifs, d'éviter l'utilisation des technologies numériques interactives avant le coucher (Adès *et al.*, 2019 ; Council on Communications and Media & MBE, 2016) et de garder des temps et lieux de vie dans la maison sans technologies numériques (Council on Communications and Media & MBE, 2016 ; Picherot *et al.*, 2018). Les recommandations académiques conseillent également un usage raisonné à tout âge des technologies numériques, avec une attention accrue dans l'accompagnement des enfants et leur consommation de technologies (Adès *et al.*, 2019).

Au travers de leurs recommandations, les différentes académies appellent les chercheurs à développer davantage d'études concernant la contribution des technologies numériques aux apprentissages scolaires (Adès *et al.*, 2019). Notamment, les auteurs appellent à faire avancer les connaissances sur « les interactions complexes entre les processus cognitifs et l'ensemble des facteurs liés à la nature d'un outil numérique » (Adès *et al.*, 2019, p. 390) qui semblent essentiels pour faire progresser les connaissances dans les applications éducatives de tels outils, mais également dans des applications thérapeutiques auprès d'enfants en difficultés.

III.3. Des bénéfices sur les apprentissages scolaires

En accord avec cet appel académique, de nombreux chercheurs se sont intéressés aux bénéfices que pouvaient apporter les technologies numériques interactives dans un contexte scolaire.

De façon consensuelle, les études ont montré que les tablettes tactiles pouvaient apporter des bénéfices dans les apprentissages scolaires (Berkowitz *et al.*, 2015). Par exemple, Wang *et*

al. (2016) ont montré que l'utilisation de tablettes tactiles permettrait d'apprendre à dire l'heure plus efficacement que d'autres outils traditionnels. L'utilisation des tablettes tactiles pour l'apprentissage des mathématiques a également été mis en avant à plusieurs reprises pour les bénéfices que ce type d'interface pourrait apporter.

McKenna (2012) a ainsi introduit l'utilisation de tablettes tactiles dans une classe d'enfants âgés de 7 à 9 ans qui était comparée à un groupe contrôle utilisant des outils d'apprentissage traditionnels comme le papier-crayon. L'apprentissage des mathématiques était significativement supérieur pour le groupe qui apprenait avec des tablettes tactiles que celui qui utilisait des outils traditionnels. L'utilisation des tablettes tactiles apportaient également des bénéfices pour l'apprentissage de la géométrie (*e.g.* Hu *et al.*, 2015) et pour la résolution de problèmes mathématiques (*e.g.* Agostinho *et al.*, 2015).

D'autres bénéfices sur les compétences scolaires ont été trouvés auprès des populations plus jeunes, concernant les compétences de lecture et d'écriture (*e.g.* Flewitt *et al.*, 2014). En effet, au travers de plusieurs études, Neumann (2014, 2016, 2017, 2018) a montré que l'utilisation des tablettes tactiles pouvait soutenir l'apprentissage de la lecture. Les enfants de 2 à 4 ans qui avaient utilisé régulièrement une tablette tactile à la maison montraient une meilleure connaissance des lettres et des sons que ceux qui avaient utilisé moins fréquemment ces supports numériques (Neumann, 2016). L'utilisation de la tablette tactile numérique pouvait également améliorer certains aspects de l'émergence de l'écriture chez les jeunes enfants (Bigelow, 2013 ; Neumann & Neumann, 2014 ; Patchan & Puranik, 2016). Par exemple, Patchan et Puranik (2016) ont entraîné des enfants âgés de 3 à 6 ans à écrire des lettres majuscules trois fois par semaine pendant huit semaines, au crayon sur papier, au stylet sur tablette, ou au doigt sur tablette. Les résultats de cette étude ont montré que les enfants produisaient davantage de lettres correctement écrites en post-test lorsqu'ils avaient suivi un apprentissage au doigt sur tablette, en comparaison des enfants qui avaient suivi l'apprentissage au stylet sur tablette ou au crayon sur papier.

Enfin, des bénéfices semblent également se retrouver auprès de populations en difficulté, présentant par exemple des perturbations émotionnelles (*e.g.* Haydon *et al.* 2012), une déficience intellectuelle (*e.g.* Alquraini & Gut, 2012), un trouble du spectre de l'autisme (*e.g.* Dixon *et al.*, 2015 ; O'Malley *et al.*, 2013), ou encore des troubles des apprentissages (McMahon & Walker, 2014). Par exemple, Campigotto *et al.* (2013) ont exploré les bénéfices de l'implémentation d'outils tactiles dans deux classes spécialisées auprès d'adolescents de 12

à 21 ans présentant divers types de troubles, comme des troubles des apprentissages, du langage, du comportement, cognitifs, intellectuels, de l'autisme, ou encore un syndrome de Down ou une paralysie cérébrale. Les résultats de l'étude suggéraient que l'utilisation de tels outils pouvait mener à une augmentation de l'intérêt des jeunes en difficultés pour les tâches scolaires, en améliorant la motivation par l'utilisation d'outils attractifs, amusants (Campignotto *et al.*, 2013 ; Schunk, 2012). Outre l'aspect motivationnel de l'interface, Zhang *et al.* (2015) ont observé des bénéfices liés à l'utilisation de tablettes tactiles comme support d'apprentissage par des enfants de 9-10 ans en classe inclusive, présentant des troubles du spectre de l'autisme, des troubles émotionnels ou des troubles des apprentissages. L'utilisation des tablettes tactiles en classe permettait d'améliorer les apprentissages en mathématiques des enfants en difficulté, mais également de rapprocher leurs performances de celles d'enfants typiques puisque l'écart de performance entre les deux types de populations était réduit suite à l'utilisation de ces outils.

Toutes ces études montrent que l'interactivité avec la tablette tactile, notamment par l'interface tactile qu'elle propose, a des effets bénéfiques sur les apprentissages (Agostinho *et al.*, 2015 ; Dubé & McEwen, 2015 ; Huber *et al.*, 2016 ; Moser *et al.*, 2015 ; Wang *et al.*, 2015). Les tablettes tactiles auraient le potentiel de rendre les apprentissages et l'enseignement scolaire plus efficace grâce à l'interaction physique qui pourrait améliorer les apprentissages des enfants (Chandler & Tricot, 2015 ; Xie *et al.*, 2018 ; Wang *et al.*, 2016). Comme le rapportent Xie *et al.* (2018), un apprentissage est plus efficace lorsque l'enfant manipule physiquement le matériel de la tâche d'apprentissage (Glenberg *et al.*, 2007), mais également lorsqu'il s'imagine interagir avec ce matériel (Glenberg *et al.*, 2004 ; Glenberg, 2011). L'interaction sensorimotrice lors d'une tâche d'apprentissage sur tablette tactile contribuerait ainsi à la construction des représentations mentales et des processus cognitifs de l'enfant (Duijzer *et al.*, 2017 ; Wang *et al.*, 2016 ; Xie *et al.*, 2018 ; Yuill & Martin, 2016). L'apprentissage serait donc plus efficace lorsqu'un environnement numérique renforce le lien entre l'expérience physique et les processus cognitifs (Baccaglioni-Frank & Maracci, 2015 ; Wang *et al.*, 2016 ; Xie *et al.*, 2018). Les relations entre expérience physique et cognition ont été le plus souvent abordées au travers des théories de la cognition incarnée et située. Ces théories postulent que l'activité cognitive s'incarne dans une interaction continue entre la cognition et le corps situé dans un environnement (Barsalou, 2008). La cognition serait ainsi nourrie des interactions sensorimotrices avec l'environnement, comme celles permises par l'utilisation de tablettes tactiles numériques. Néanmoins, Bara et Tricot (2017) mettent en garde face à « un effet presque magique » (p. 11) des postulats de la cognition incarnée qui rendrait bénéfique toute

interaction sensorimotrice avec la technologie dans l'apprentissage. Selon les auteurs, bien que l'utilisation du corps dans les apprentissages puisse être bénéfique, la relation entre les interactions sensorimotrices et les bénéfices cognitifs est à modérer. En effet, celle-ci pourrait également s'expliquer au travers de la charge cognitive (Chanquoy *et al.*, 2007) comme le souligne la théorie de l'apprentissage multimédia (Mayer, 2005). En effet, lors d'une tâche d'apprentissage, l'enfant dispose d'un certain nombre de ressources cognitives pour comprendre la tâche et réaliser l'apprentissage. Ces ressources cognitives sont réparties entre la charge essentielle, nécessaire à la compréhension de la tâche, la charge intrinsèque, nécessaire à la réalisation de la tâche, et la charge extrinsèque pour traiter les informations de la tâche non essentielles à sa compréhension (Mayer & Moreno, 2003 ; Sweller *et al.*, 2011). La quantité de ressources à allouer à chaque type de charge cognitive dépend de la conception de la tâche. Ainsi, le type de technologie utilisé pour réaliser une tâche d'apprentissage pourrait moduler cette charge. Par exemple, l'inadaptation des ordinateurs aux jeunes enfants, que nous avons rapportée au début de cette partie, pourrait mener à une charge intrinsèque fortement élevée, nécessaire pour contrôler les gestes sur les différentes entrées de l'ordinateur (clavier, souris). Lorsque les ressources nécessaires à la réalisation de l'apprentissage sont supérieures aux ressources disponibles par l'enfant, une situation de surcharge cognitive se produit, résultant en un apprentissage inefficace (Mayer & Moreno, 2003). A l'inverse, la facilité d'utilisation des interfaces tactiles numériques pourrait soutenir plus efficacement les apprentissages des enfants en réduisant la charge intrinsèque nécessaire à la réalisation de la tâche.

Les effets bénéfiques de l'interaction tactile avec les outils numériques interactifs semblent avoir été largement mis en avant dans un contexte d'apprentissage scolaire. Cependant, ces bénéfices de l'interaction avec un support tactile sur les capacités cognitives semblent être peu étudiés hors de ce contexte spécifique de l'apprentissage. Les facteurs pouvant expliquer de tels bénéfices restent flous, avec, souvent, pour principale justification, « un effet presque magique » (Bara & Tricot, 2017, p. 11) des technologies perçues dans le cadre de la cognition incarnée et située. En réponse à l'appel de l'académie française demandant davantage d'études concernant les interactions complexes entre les processus cognitifs et l'ensemble des facteurs liés à la nature d'un outil numérique (Adès *et al.*, 2019), nous proposons d'étudier les bénéfices et les facteurs sous-jacent de ces bénéfices que pourraient avoir les outils tactiles numériques sur la créativité.

Résumé du chapitre :

Au cours de ce chapitre, nous nous sommes posés une question fondamentale : comment les technologies numériques peuvent-elles moduler les capacités cognitives des enfants grandissant dans des sociétés occidentales ? Il y a dix ans, Bennet (2008, 2010) dénonçait le débat idéologique qui inondait l'espace médiatique, mais également l'espace scientifique, appelant à réaliser davantage d'études scientifiques sur les effets de l'utilisation des technologies numériques. La revue de littérature que nous avons menée nous a amené à distinguer deux facteurs pouvant distinguer les bénéfices des effets délétères concernant l'utilisation des technologies par les enfants et adolescents. D'une part, l'usage des technologies numériques doit être raisonné : alors que certains contextes semblent plus prolifiques (par exemple, en apprentissage scolaire), d'autres semblent avoir des effets négatifs (par exemple, l'utilisation d'écrans numériques avant la phase d'endormissement). D'autre part, les technologies induisant une interactivité comme les tablettes tactiles semblent offrir davantage de bénéfices en comparaison de technologies plus passives comme la télévision, pour les enfants et adolescents typiques (*e.g.* Xie *et al.*, 2018) ou présentant des troubles (*e.g.* Alquraini & Gut, 2012 ; Campigotto *et al.*, 2013). Ces bénéfices semblent particulièrement saillants dans le cadre des apprentissages scolaires, et sont majoritairement expliqués dans le cadre de la théorie de la cognition incarnée et située (*e.g.* Xie *et al.*, 2018). L'utilisation accrue de la sensorimotricité au travers des interfaces tactiles numériques par exemple permettrait d'améliorer les compétences cognitives des enfants et adolescents. Ces bénéfices pourraient néanmoins être expliqués par un effet des outils utilisés qui pourrait moduler la charge cognitive allouée à la tâche d'apprentissage scolaire (Bara & Tricot, 2017). Notamment, l'utilisation d'outils adaptés et plus simple d'utilisation permettraient d'allouer davantage de ressources cognitives à la charge essentielle, nécessaire pour l'apprentissage. Nous proposons d'étudier ces effets en dehors des apprentissages scolaires, en nous intéressant au contexte particulier de la créativité.

CHAPITRE 2 – LA CREATIVITE : ORIGINES, DEFINITION, ET DEVELOPPEMENT CHEZ L’ENFANT ET L’ADOLESCENT

Au cours de ce chapitre, nous allons décrire l'évolution du concept de créativité. Nous commencerons par passer en revue les propositions qui ont historiquement contribué à la définition de la créativité, en la rapprochant notamment de l'intelligence puis de la cognition. Nous détaillerons ensuite les différents facteurs liés à la créativité dans une approche multivariée. Nous finirons par une synthèse des études développementales relatives à la créativité.

I - Créativité et cognition

I.1. La créativité : du don divin à l'intelligence

La créativité est un concept qui a suscité l'intérêt des philosophes depuis l'antiquité, époque à laquelle la créativité était considérée comme un don divin, permettant au poète d'exprimer les idées créatives insufflées par les dieux. Bien que cette conception ait été portée par Platon, son disciple Aristote a été le premier à détacher le phénomène créatif du mysticisme, en avançant l'idée que la créativité était tirée de l'individu même, sans aucune intervention divine (Albert & Runco, 1999 ; Cropley, 1999 ; Lubart *et al.*, 2003). Cette nouvelle conception a été oubliée pendant l'obscurantisme des siècles suivants et n'a été reprise qu'au XVIII^e siècle, avec l'apparition des débats philosophiques. Duff (1767) a tenté de définir le génie créatif comme une capacité innée, impliquant une imagination associative qui permet de combiner les idées du sujet au jugement et à l'évaluation qu'il fait lui-même de ces idées, ainsi qu'aux valeurs esthétiques dirigeant cette recherche d'idée. Au siècle suivant, Francis Galton (1879) a été le premier à examiner, de façon introspective, le fonctionnement créatif en observant un enchaînement d'associations mentales, reliant les idées de l'esprit conscient à l'esprit inconscient. Un an plus tard, William James (1880) a souhaité mettre en avant la nouveauté de l'idée créative, en faisant apparaître la notion d'originalité. Celle-ci était vue par James comme étant l'élément déterminant le génie créatif, et comme étant dépendante de la capacité d'associations d'idées. La créativité n'était donc plus considérée comme un don appartenant à certaines personnes, mais se placerait sur un continuum entre l'individu peu créatif et le génie (Galton, 1883).

L'essor des propositions concernant la créativité se situe au XX^e siècle, marquant une rupture dans l'étude de la créativité qui était jusqu'à lors étudiée comme une imagination ou une capacité inventive donnée à certains génies. Dans la première partie du XX^e siècle, la définition de la créativité a été rapprochée de la notion d'intelligence, soulignant les premiers liens entre créativité et cognition. Dans une série de travaux, Ribot (1900) a été le premier à rapprocher l'inconscient à l'intelligence et à l'émotion dans la pensée créative. Alfred Binet, considérant que la pensée créative par association constituait une partie de l'intelligence, a proposé d'intégrer cette dimension à l'échelle d'intelligence élaborée avec Simon, dans laquelle des items étaient proposés pour mesurer spécifiquement l'imagination créative (Binet & Simon, 1905). Freud (1908) proposait de définir la créativité comme le résultat d'une tension entre

réalité consciente et pulsion inconsciente, permettant aux artistes d'exprimer des désirs inconscients par des moyens culturellement acceptables. Pour reprendre les propositions concernant l'association d'idées de Galton et James, Spearman (1931) ajoutait que l'origine de la créativité se trouvait dans la capacité intellectuelle à former des correspondances entre des idées différentes. Plus précisément, l'origine de la créativité résulterait de l'interaction entre connaissance, intelligence et imagination.

Dès 1950, notamment grâce aux travaux de Guilford sur l'intelligence (1950) et la créativité (1967), ainsi que son appel à davantage d'études centrées sur ce sujet, s'est ouvert un nouveau champ d'étude consacré plus spécifiquement à la créativité (Leboutet, 1970), considérée alors comme une dimension de l'intelligence. Ce nouveau champ d'étude vise à étendre les travaux sur l'intelligence et se base de façon centrale sur les aspects cognitifs de la créativité. Guilford (1956, 1967) considérait que la créativité requerrait plusieurs capacités intellectuelles, et élaborait en 1956 puis 1967, la théorie factorielle de l'intelligence (Structure of Intellect) selon laquelle des opérations intellectuelles seraient appliquées à différents types d'informations pour arriver à des productions diverses. Pour Guilford (1956), la pensée créative était constituée de 5 opérations intellectuelles, catégorisées sous les éléments cognitifs comprenant la cognition (l'aspect découverte) et la mémoire (faisant appel aux connaissances), ainsi que les éléments productifs définis comme les pensées convergente (rechercher la meilleure réponse) et divergente (la recherche des possibles), et enfin l'évaluation (afin de juger la valeur de nos idées). Ces opérations intellectuelles appliquées aux informations collectées sur l'environnement menaient à des productions plus ou moins créatives, différentes les unes des autres. La créativité reste encore récemment rapprochée de différents aspects liés à l'intelligence comme le quotient intellectuel (QI, *e.g.* : Lubart, 2003 ; Lubart & Georgsdottir, 2004a ; Runco & Albert, 1985).

I.2. Définition de la créativité

La multiplication des études sur la créativité suite à l'appel de Guilford (1949) a mené la plupart des chercheurs à s'accorder sur une définition consensuelle. La créativité serait définie comme « la capacité à réaliser une production qui soit à la fois nouvelle et adaptée au contexte dans lequel elle se manifeste » (Amabile, 1996 ; Barron, 1988 ; Besançon & Lubart, 2015 ; Lubart, 1994 ; MacKinnon, 1962 ; Ochse, 1990 ; Simonton, 2000 ; Sternberg, 1988 ;

Sternberg et Lubart, 1991 ; 1995 ; 1996 ; Lubart *et al.*, 2003, 2015). La production créative, de nature diverse (verbale, graphique, ...), doit être adaptée au contexte dans la mesure où elle doit respecter un certain nombre de critères relatifs au domaine considéré, pour ne pas être hors sujet. Pour être qualifiée de créative, la production doit également être nouvelle, c'est à dire, qu'elle doit se démarquer de ce que l'individu ou d'autres personnes ont déjà réalisé. Sternberg *et al.* (2002) précisent qu'un changement, qu'il soit minime ou au contraire très important, peut être considéré comme nouveau. Bien que cette définition consensuelle se centre sur la dualité entre nouveauté et adaptation, l'importance relative de ces deux éléments dépend également de la nature des tâches proposées : là où un ingénieur favoriserait l'adaptabilité, un artiste mettrait plutôt en avant la nouveauté (Lubart *et al.*, 2003). La définition de la créativité connaît des variations en fonction des cultures (Kristeller, 1983 ; Li, 1997 ; Lubart & Georgsdottir, 2004b ; Maduro, 1976 ; Niu & Sternberg, 2002 ; Sinclair, 1971). Néanmoins, la notion de nouveauté, autrement appelée pensée originale ou originalité, semble être une notion transculturelle associée à la créativité (Lim & Plucker, 2001 ; Niu & Sternberg, 2001 ; Rudowicz & Yue, 2000 ; Soh, 1999 ; Tan, 2000). L'originalité correspond aux aspects de la production évalués et sélectionnés comme nouveaux, reposant sur les connaissances du référentiel du sujet, c'est à dire ses propres connaissances, ou celles de son groupe social par exemple (Lubart & Georgsdottir, 2004b ; Mouchiroud & Lubart, 2001). Les différences culturelles et interindividuelles dans l'évaluation d'une idée ou production créative résideraient ainsi dans le référentiel de connaissances propre à chacun, plutôt que dans la définition même de la créativité. Autrement dit, une personne considère une production ou une idée comme originale parce que, dans ses expériences ou celles de son groupe social, la production est considérée comme nouvelle, tandis que la même production ou idée dans une culture différente ou jugée par une personne tierce, pourrait ne pas être considérée comme originale.

I.3. Pensée convergente et divergente

La dualité de la pensée serait le mécanisme à la base de la créativité et a été mis en avant à plusieurs reprises dans l'histoire de la psychologie de la créativité. Comme le résume Cropley (1999), plusieurs auteurs avaient déjà différencié deux types de pensée opposés dans la créativité. Rothenberg (1988) introduisait à ce sujet l'idée de pensée janusienne, en référence aux deux visages du dieu romain Janus qui regardait dans deux directions simultanément, lui permettant de traiter diverses informations qui ne se produiraient pas normalement ensemble.

Mais c'est à Guilford (1950) que l'on doit la distinction cruciale des deux types de pensée à l'œuvre dans la pensée créative. Guilford (1950) a fait une distinction entre la pensée convergente et la pensée divergente (elles étaient alors nommées « productions » convergentes et divergentes). Tel qu'il les définit, la pensée convergente se rapprocherait de l'intelligence conventionnelle, rationnelle et analytique, tandis que la pensée divergente serait considérée comme la base cognitive de la créativité, associée à l'imagination, l'invention et l'innovation. Autrement dit, la pensée convergente serait orientée vers la recherche d'une réponse unique, la plus appropriée possible, en fonction des informations disponibles. Elle serait principalement utilisée dans des situations où nous devons donner une réponse déjà stockée en mémoire, ou qui doit être générée à partir de ce qui est déjà connu, grâce à des stratégies de recherche logique, de reconnaissance, et de décision (Cropley, 1999). Par contraste, la pensée divergente impliquerait la production de réponses nouvelles et multiples à partir des informations disponibles dans le contexte de la tâche. Ces réponses sont non-conventionnelles pour l'individu, c'est-à-dire qu'elles n'existaient pas auparavant dans l'expérience du sujet produisant la réponse. Selon cette définition initiale, les pensées convergente et divergente mèneraient à la production de connaissances, mais diffèreraient par leur nature et seraient séparées, avec plus ou moins de concurrence, l'un produisant la singularité et l'autre la variabilité (Cropley, 1999 ; Getzels & Jackson, 1962).

C'est à partir de l'étude de Facaoaru (1985) que les pensées convergente et divergente ont commencé à être unifiées et non plus étudiées séparément. Selon cette étude portant sur la créativité appliquée en sciences et technologies, Facaoaru (1985) montrait que les ingénieurs dont les tests de créativité soulignaient une douance, produisaient une combinaison de faits logiques (la singularité) et de nouvelles idées et suggestions non attendues (la variabilité). Ces résultats ont également été observés dans les recherches sur la réussite scolaire ou universitaire, montrant que les étudiants les plus doués produisent à la fois des idées singulières et variées (Cropley, 1999). Ces études ont permis de montrer que ni la production de singularité, ni la production de variabilité ne mènent seules à la nouveauté, mais que les deux sont nécessaires à sa production. La dualité entre pensée convergente et pensée divergente s'inscrit ainsi dans la définition consensuelle de la créativité : la pensée divergente, originale, correspond au mécanisme de production de la nouveauté tandis que la pensée convergente, logique, s'inscrit dans la mesure d'adaptation au contexte (Besançon et Lubart, 2015 ; Lubart *et al.*, 2015).

Bien que Guilford (1950, 1968) se soit principalement consacré au rôle joué par les facteurs cognitifs dans la créativité, il soulignait également l'importance considérable de la « personnalité créative », idée centrale des premières recherches sur la créativité (Barron, 1963, 1969). D'autres auteurs (Bal, 1988 ; Sternberg & Lubart, 1991) ont également argumenté que les facteurs cognitifs comme la dualité de pensée convergente-divergente n'étaient pas suffisants pour expliquer les différents niveaux de créativité (entre experts et novices par exemple). Autrement dit, l'aspect cognitif n'agirait pas de façon isolée. La prise en compte de multiples facteurs a mené à l'approche multivariée de la créativité.

II - L'approche multivariée de la créativité

Depuis les années 1980, l'approche multivariée de la créativité est devenue une théorie dominante dans l'explication du phénomène créatif. Selon cette approche, la créativité reposerait sur des combinaisons particulières de plusieurs facteurs liés à l'individu. Les facteurs cognitifs tels que décrit précédemment (intelligence, pensée convergente et divergente) sont donc considérés au même titre que d'autres facteurs, dont les traits de personnalité par exemple. La nature des facteurs considérés et leurs interactions ou le niveau minimum de présence d'un facteur, varient selon les propositions théoriques (Lubart, 1999).

Woodman et Schoenfeldt (1990) proposent ainsi que la créativité résulterait d'une interaction complexe entre trois composantes, à savoir les antécédents de la personne et de la situation (e.g., son statut social, ses expériences passées), les caractéristiques propres à la personne (e.g., les aspects cognitifs, conatifs), et les caractéristiques propres à la situation (e.g., l'environnement culturel, les influences sociales).

Selon Amabile (1996), la créativité serait constituée d'interactions complexes entre la motivation (intrinsèque ou extrinsèque), les connaissances et compétences sur le sujet, et les processus cognitifs liés à la créativité. Selon la conception d'Amabile (1996), le niveau d'un individu dans ces trois composantes déterminerait sa créativité, et chaque composante serait nécessaire, c'est à dire que la créativité ne peut pas s'exercer si une des trois composantes est absente.

Selon Sternberg & Lubart (1995), la créativité reposerait sur six types de ressources : le contexte environnemental, la motivation, l'intelligence, la connaissance, les styles cognitifs et la personnalité. Toutes ces ressources seraient en interaction les unes avec les autres. Selon les

auteurs, la créativité ne résulterait pas d'un niveau de fonctionnement total atteint pour chaque ressource, mais d'un seuil minimal en dessous duquel la créativité serait impossible. Par exemple, il serait impossible de réaliser un produit créatif à propos d'un sujet particulier sans un minimum de connaissances préalables sur ce même sujet, peu importe le niveau de fonctionnement des autres composantes (Csikszentmihalyi, 2006). Des auteurs considèrent ainsi que la créativité ne s'exerce qu'à partir du moment où le sujet a acquis un ensemble de connaissances sur le domaine concerné (Ericsson *et al.*, 1993 ; Feldhusen, 1995 ; Wiley, 1998). L'interaction entre les six types de ressources permettrait une compensation partielle entre elles, telle qu'une forte motivation peut compenser un faible contexte environnemental par exemple. Une composante agirait toujours en interaction avec au moins un autre type de ressource, et des niveaux élevés de plusieurs ressources en même temps pourraient multiplier la créativité. Cette multiplication provoquée par un ensemble de facteurs réunis de façon optimale serait à l'origine des génies créatifs.

L'approche multivariée considère finalement la créativité comme résultante d'une combinaison interactive entre les facteurs cognitifs, conatifs, émotionnels, et environnementaux (Batey & Furnham, 2006 ; Besançon & Lubart, 2015 ; Lubart *et al.*, 2003, 2015), dressant des profils propre à chaque individu, mis en lien avec les caractéristiques spécifiques de la tâche (Lubart *et al.*, 2003). Les facteurs cognitifs ayant déjà été intégrés historiquement à la créativité, nous passons en revue les trois autres principales catégories de facteurs.

III - Les facteurs de créativité évoqués dans l'approche multivariée

III.1. Facteurs conatifs

Comme rapporté par Cropley (1999), Guilford a également mis un accent considérable sur la « personnalité créative ». Les traits de personnalité permettraient de faciliter l'utilisation des composantes cognitives pour transformer les idées abstraites en une production finale réelle (Mumford & Gustafsson, 1988). Cet aspect a été pris en compte par des auteurs comme Gough (1961, 1979), MacKinnon (1962) ou Roe (1952) qui ont tenté de mettre en lumière des implications des traits de personnalité et des motivations dans la créativité. Dans ces études, plusieurs traits semblaient corrélés à la créativité, comme la confiance en soi (Barbot, 2008 ; Buege, 1993 ; Huntsman, 1982 ; Rizzi *et al.*, 2020 ; Warger & Kleman, 1986), l'indépendance du jugement, ou encore la prise de risque. Feist (1998) ajoute que les personnes plus créatives

que la moyenne ont tendance à être plus ouvertes aux expériences, à avoir plus confiance en elles, à être moins conventionnelles et moins consciencieuses que la majorité de la population. Rogers (1954) considérait la créativité comme indissociable à la liberté d'esprit (le « self actualisation »), vision partagée par Maslow (1968) qui considérait la créativité comme un moyen de réaliser ses potentialités grâce à l'acceptation de soi et le courage. Toutes ces recherches ont conduit Lubart *et al.* (2003, 2015) à identifier six traits principaux, qui présentent des relations significatives avec la créativité : la persévérance (Rossman, 1931), la tolérance à l'ambiguïté (Furnham, 1994 ; Vernon, 1970), l'ouverture à de nouvelles expériences (McCrae, 1987 ; Feist, 1998, 1999), l'individualisme, la prise de risque (Lubart & Sternberg, 1995), et le psychotisme¹ (Eysenck, 1995 ; Woody & Claridge, 1977). Dans une autre approche liée aux aspects conatifs, Amabile (1996) et Hennessey *et al.* (1989) ont exploré les liens entre la créativité et la motivation intrinsèque, c'est-à-dire la nature et la force du désir à s'engager dans une activité créative. En ce sens, Runco (1998) affirme que les états internes favorisent la production créative, qu'ils soient positifs ou négatifs (Lubart *et al.*, 2003).

III.2. Facteurs émotionnels

C'est par les premiers travaux de Freud (1908) sur la créativité que l'intérêt pour les liens entre créativité et émotion est né. Selon Freud (1908), les productions créatives permettraient d'exprimer des émotions. Par extension, une idée créative pourrait également être sélectionnée pour sa valeur émotionnelle (Hammershøj, 2021). Les émotions pourraient placer les individus dans un état plus ou moins propice à la créativité, comme avancé par Runco (1998). En effet, l'association entre deux concepts distants cognitivement mais proches émotionnellement serait rendue possible par les expériences émotionnelles (Lubart & Getz, 1998). Ainsi, plusieurs facteurs émotionnels ont été mis en lumière grâce à des approches naturalistes (*i.e.* par l'observation des démarches et productions d'artistes en contexte) et expérimentales (*i.e.* par le test des effets d'un état émotionnel sur la performance créative). Isen (1999) a été parmi les premiers à s'intéresser systématiquement au rôle des émotions dans la créativité. Conformément à son hypothèse, elle a montré que les participants placés dans un état émotionnel positif produisaient davantage de solutions à un problème que les participants placés

¹ Eysenck (1995) utilise le terme "psychotisme" comme référence au caractère rare, improbable des idées, faisant référence au mécanisme de faible gradient associatif, commun à tous, mais particulièrement extrême dans les pathologies psychotiques (Mednick, 1962)

dans un état émotionnel neutre (Isen *et al.*, 1987). Isen *et al.* (1987) ont proposé deux pistes d'explications à leurs résultats. D'une part, l'émotion positive favoriserait l'attention du sujet (notamment par la sécrétion de dopamine) et permettrait ainsi au sujet de percevoir plus facilement les différents aspects et qualités des objets présents dans la tâche, entraînant des combinaisons multiples entre les éléments. D'autre part, l'émotion positive pourrait faciliter l'accès en mémoire aux idées positives, celles-ci étant présentes en plus grand nombre que les idées négatives, améliorant à nouveau les possibilités de combinaisons (Isen *et al.*, 1987). Cependant, ces propositions n'étaient pas consensuelles, puisque Kaufmann (1995) et Kaufmann et Vosburg (1997) tendaient à montrer qu'une émotion négative serait plus encline à favoriser la créativité dans une situation de résolution de problèmes, qu'une émotion positive qui viendrait plutôt contrarier cette résolution de problème. Ils ont argumenté cette proposition avec la théorie du calibrage cognitif de Schwarz (1990) qui explique que les processus cognitifs sont réglés pour répondre aux exigences situationnelles signalées par nos sentiments, appuyant l'idée selon laquelle le critère de satisfaction du sujet serait plus élevé dans un état émotionnel négatif que positif. En effet, l'émotion positive signalerait au sujet un arrêt des efforts cognitifs, tandis qu'une émotion négative le pousserait davantage à l'effort, favorisant ses capacités de pensée divergente. Plus tard, Vosburg (1998) a observé les effets des émotions positives et négatives dans une approche différente, montrant que l'état émotionnel positif tendrait effectivement à produire davantage d'idées (en nombre) alors que l'état émotionnel négatif mènerait à une diminution d'idées produites, par une optimisation des critères de sélection. Ces observations semblent avoir été confirmées par des résultats similaires (Adaman & Blaney, 1995 ; Hirt *et al.*, 1997).

III.3. Facteurs environnementaux

D'autres études ont porté sur les facteurs environnementaux qui peuvent se lire à plusieurs niveaux, allant de l'environnement social incluant la culture, à un l'environnement direct du sujet incluant l'utilisation de technologies ou le mouvement (Lubart *et al.*, 2003).

L'environnement social serait susceptible de jouer un rôle important dans le domaine créatif (Rouquette, 2007), comme le milieu culturel (Lubart, 1990 ; Simonton, 1984, 1997). En effet, la culture peut, par exemple, favoriser certaines formes ou sujets de créativité, comme les interdire (Mar'i & Karayanni, 1983), ou influencer la créativité en fonction des croyances et attitudes prônées par la culture (Krippner, 1967 ; Adams, 1986).

L'environnement direct du sujet semble également important, que ce soit dans l'environnement familial ou dans l'environnement scolaire. Dans la sphère familiale, l'éducation parentale serait également importante pour la créativité. Ochse (1990) défendait l'idée selon laquelle les aspects contraignants du cadre familial favoriseraient la créativité. Selon sa conception, pour favoriser la créativité de l'enfant, ce dernier doit apprendre à surmonter des difficultés et à être indépendant. C'est ce qui expliquerait, selon lui, ses observations montrant un taux élevé de personnes créatives provenant de milieux défavorisés ou dans des foyers avec un faible soutien parental (Lubart *et al.*, 2003 ; Ochse, 1990). À l'inverse, Rogers (1954) suggérait la nécessité d'un environnement familial nourrissant et non critique pour permettre le développement du potentiel créatif de l'enfant. Harrington *et al.* (1987) ont confirmé cette suggestion en mettant en évidence le rôle de cet environnement au cours de l'éducation parentale et des interactions parent-enfant, dans le développement de la créativité, par exemple lorsque les parents respectaient les opinions de leurs enfants et les encourageaient à les exprimer. Cette idée est défendue par d'autres auteurs ayant montré qu'un contexte stable avec une structuration souple permettant des modifications de règles pourrait favoriser l'expression et le développement de la créativité (Lubart & Lautrey, 1998 ; Mumford & Gustafson, 2007). Étant donné les divergences portant sur les liens entre l'éducation parentale et la créativité, Lubart et Lautrey (1998) ont étudié les règles parentales gouvernant la vie de l'enfant, en lien avec la créativité. Ils ont étudié trois types d'environnement : des environnements rigides (*i.e.* règles strictes), souples (*i.e.* règles imposées sujettes à modification), ou laxistes (*i.e.* règles faibles ou non-existantes). Ils ont observé que ni l'environnement rigide, ni l'environnement laxiste ne favorisait la créativité, l'environnement souple étant le plus favorable en apportant à la fois des contraintes par les règles imposées, mais également des perturbations dues à la souplesse de ces règles. Le cadre éducatif serait également déterminant pour l'expression de la créativité chez l'enfant dans des contextes scolaires (Sternberg & Lubart, 1991, 1993).

Cet environnement direct peut s'élargir à l'environnement scolaire, qui semble constituer un frein à la créativité, notamment en raison des évaluations qu'elle impose (Clifford, 1988 ; Clifford & Chou, 1991) et à son environnement très structuré autour du cadre éducatif, imposant des normes et se concentrant sur l'apprentissage de règles (Clifford, 1988 ; Clifford & Chou, 1991 ; Torrance, 1968). Certains aspects, comme la personnalité de l'enseignant, pourraient cependant favoriser significativement les performances créatives de l'enfant (Dudek *et al.*, 1993). De même, certains types de pédagogie pourraient favoriser le développement de

la créativité chez l'enfant. Dans une étude longitudinale, Besançon et Lubart (2008) ont par exemple montré une performance créative significativement supérieure d'enfants dans une école pratiquant la pédagogie Montessori (*i.e.* une pédagogie mettant en avant l'autonomie dans un apprentissage individuel), en comparaison d'enfants scolarisés dans une école pratiquant une pédagogie traditionnelle.

Nous proposons que l'environnement d'action pourrait également constituer un facteur important. En effet, la pédagogie Montessori utilise de façon centrale la sensorimotricité pour les apprentissages. Les résultats positifs obtenus sur la créativité des enfants pourraient tenir d'une plus grande utilisation de la sensorimotricité qui pourrait favoriser la créativité. Cette idée a déjà été proposée par quelques études (Pagona & Costas, 2008 ; Cheung, 2010) qui suggéraient l'existence d'un lien entre l'éducation physique à l'école et la créativité motrice. Au travers de diverses activités motrices, les enfants parvenaient à produire des mouvements plus créatifs. Dans l'étude de Pagona et Costas (2008), les bénéfices observés sur les performances créatives suite au programme suivi pendant un an en comparaison d'un groupe contrôle pouvaient s'observer neuf ans plus tard, vers 18 ans. Cet effet bénéfique de l'éducation physique à l'école pouvait également s'observer pour des enfants en situation de handicap (Jay, 1991 ; Sherill, 1986). Par exemple, pratiquer des activités de danse à l'école semblait améliorer les capacités d'imagination d'enfants présentant des troubles du langage (Jay, 1991). En dehors des cours spécifiques d'éducation physique, Jeanneret *et al.* (2012) ont suggéré que favoriser le mouvement à l'école de façon générale pouvait être bénéfique pour la créativité d'enfants typiques. Dans cette étude, les enfants scolarisés dans des classes favorisant le mouvement présentaient des scores plus élevés que les enfants scolarisés dans des classes traditionnelles. Toutes ces études soulignent que les activités pédagogiques centrées sur la sensorimotricité pourraient être une source majeure de bénéfices pour la créativité (Besançon & Lubart, 2008 ; Jeanneret *et al.*, 2012).

L'approche multivariée de la créativité permet ainsi de faire état des nombreux facteurs constitutifs de la créativité. Etudier le rôle de ces facteurs dans l'émergence des capacités créatives nécessite de se tourner vers des études développementales de la créativité.

IV - Les outils d'évaluation de la créativité

Afin d'évaluer la créativité des enfants et adolescents, plusieurs outils d'évaluation ont été développés. Tandis que certains tests visent à évaluer la créativité au sens large, couvrant de multiples domaines créatifs, d'autres se sont plus particulièrement intéressés à la créativité graphique. Nous présenterons dans un premier temps les tests utilisés de façon générale dans les études développementale de la créativité, puis nous nous intéresserons aux tests utilisés plus spécifiquement dans l'évaluation de l'originalité des dessins.

IV.1. Description des tests dans les études développementales

L'étude développementale de la créativité s'est étalonnée autour des principaux tests que nous allons évoquer dans cette partie. Trois mesures principales dans l'évaluation de la créativité semblent se distinguer dans ces tests : la fluence (*i.e.* le nombre de réponses appropriées), la flexibilité (*i.e.* la variabilité des thèmes dans les réponses) et l'originalité (*i.e.* la nouveauté des réponses). Certains tests mesurent également l'imagination (*i.e.* la capacité à imaginer des scènes, de la fantaisie) et l'élaboration (*i.e.* le nombre de détails dans les réponses). Ces mesures peuvent être réalisées au travers de différentes tâches, les plus communes étant des tâches spécifiques de pensée convergente et de pensée divergente. Nous passons en revue les principaux tests utilisés dans la littérature concernant le développement de la créativité chez l'enfant et l'adolescent.

- Le « Torrance Test of Creative Thinking » (TTCT) initialement publié par Torrance en 1966 est probablement le test le plus connu. Ce test se base sur l'évaluation de la pensée divergente, constitué d'une section verbale (« Thinking Creatively with Words ») et d'une section non verbale, ou figurale (« Thinking Creatively with Pictures »). Le test propose 7 tâches verbales (« Asking » ; « Guessing Causes » ; « Guessing Consequences » ; « Product Improvement » ; « Unusual Uses » ; « Unusual Questions » ; « Just Suppose ») et 3 tâches non verbales (« Picture Construction » ; « Picture Completion » ; « Lines/Circles »). Par exemple, la tâche verbale « Product Improvement » consiste à trouver le plus de façons possibles de rendre un jouet plus amusant. Concernant les tâches non verbales, nous pouvons citer pour exemple la tâche de « Picture Completion » dans laquelle le participant doit utiliser 10 figures incomplètes pour créer et nommer un objet ou une image. Les mesures de

créativité réalisées au travers de toutes ces tâches sont des mesures de fluence, de flexibilité, d'originalité et d'élaboration.

- Le « Wallach-Kogan Creativity Test » (WKCT), de Wallach et Kogan (1965), apparaît également à cette période, mettant en avant un environnement de jeu et une absence de limite de temps dans la procédure. Ce test contient trois subtests verbaux (« Instances » ; « Alternate Uses » ; « Similarities ») et deux subtests figuraux (« Pattern Meaning » ; « Line Meanings »). La créativité est mesurée par la fluence, la flexibilité, l'originalité et l'élaboration. Le test verbal « similarities » propose par exemple aux enfants de dire de quelle façon des paires d'objets sont similaires (*e.g.* un train et un tracteur). Dans le test figural « Pattern Meaning », les enfants sont amenés à suggérer des interprétations à partir de 8 dessins abstraits.

- Le TTCT et le WKCT sont tous deux composés d'une tâche mesurant l'utilisation alternative d'objets, « Unusual Uses » ou « Alternative Uses ». Ces tâches ont inspiré l'« Alternative Uses Test » (AUT) de Guilford (1967). Ce test incite le participant à donner le plus d'utilisations alternatives possibles d'un objet en explorant les utilisations originales, non traditionnelles de l'objet, par exemple en utilisant un trombone comme marque-pages ou comme barrette à cheveux. Les réponses sont évaluées en termes de fluence et de flexibilité.

- Le Remote Associates Test (RAT) de Mednick (1962) est un test rapide, comportant 30 items pour 40 minutes de passation, durant lesquelles le participant devra trouver un mot pour relier trois autres mots sans aucun lien apparent. Le score à ce test ne s'évalue pas par la fluence, la flexibilité ou l'originalité, mais correspond à la somme des bonnes réponses.

- Le « Test of Creative Thinking – Divergent Production » (TCT-DP) de Urban et Jellen (1996) est un test de dessin uniquement. Les participants sont amenés à faire un ou plusieurs dessins à partir de figures incomplètes qui leur sont présentées. Les mesures communes de créativité (fluence, flexibilité et originalité) ne sont pas utilisées pour ce test. L'évaluation des dessins produits se fait sur une échelle comportant 14 critères, dont par exemple, les complétions de figure, la vitesse, ou encore l'utilisation non conventionnelle d'une figure.

- Le « Creativity Assessment Packet » (CAP) développé par Williams (1993) est communément utilisé pour déterminer l'éligibilité à des programmes scolaires pour des enfants spécialement doués. Ce test est composé de 3 instruments de

mesure : le test de pensée divergente, le test de sentiment divergent et une échelle de cotation pour les professeurs ou parents. Dans le test de pensée divergente, les sujets sont amenés à compléter 12 figures non terminées dans un laps de temps défini, et sont mesurés en termes de fluence, de flexibilité, d'originalité, d'élaboration et de titre donné à la figure. Dans le test de sentiment divergent, les sujets répondent à 50 déclarations sur une échelle de Likert et sont cotés avec la curiosité, la complexité, l'imagination et la prise de risque.

- Le « Torrance Test of Thinking Creatively in Action and Movement » (TCAM) de Torrance (1981) permet de mesurer la pensée créative d'enfants dès 3 ans sans passer par la verbalisation. Le test propose 4 tâches (« How Many Ways? » ; « Can You Move Like? » ; « What Other Ways? » ; « What Might It Be? ») mesurées par la fluence, l'originalité et l'imagination. Le test « How many ways? » permet d'observer la capacité de l'enfant à se mouvoir de différentes façons sur le sol. La 2^e tâche, « Can You Move Like? », incite l'enfant à se mouvoir comme un animal ou un arbre. « What Other Ways? » propose à l'enfant de mettre un gobelet à la poubelle de différentes façons. Enfin, « What Might It Be? » incite l'enfant à proposer de multiples utilisations variées d'un gobelet en papier.

- L' « Evaluation du Potentiel Créatif » (EPoC) de Lubart *et al.* (2011) permet de mesurer le potentiel créatif des enfants au travers d'épreuves verbales et figurales de pensée convergente dans lesquelles l'enfant produit une solution unique intégrant différents éléments, et de pensée divergente dans lesquelles l'enfant produit de nombreuses idées à partir d'un stimulus.

IV.2. L'évaluation de l'originalité dans les tâches de dessin et ses limites

Les tests présentés et utilisés dans les études développementales de la créativité visent à évaluer la créativité au sens large, à partir de multiples mesures réalisées sur différents domaines créatifs, le plus souvent, verbal et figural. Parmi les tests utilisés pour l'étude développementale de la créativité, certains ont été plus spécifiquement conçus afin d'évaluer la créativité des enfants au travers d'une tâche de dessin, dont les plus utilisés sont, à notre connaissance, le TCT-DP, les tâches figurales du TTCT, ou encore les épreuves figurales de l'EPoC. Cependant, comme le rapportent Lubart *et al.* (2010), lorsque plusieurs de ces tests sont utilisés auprès d'un même échantillon d'enfants, les scores ne montrent qu'une

convergence modérée, c'est-à-dire, un faible lien corrélationnel entre les différentes mesures. Lubart *et al.* (2010) soulignent, en s'appuyant sur leur analyse, que les différentes catégories de mesures utilisées dans les tests créatifs (en guise d'exemple, 14 critères de mesures sont définis dans le TCT-DP), sont, de façon systématique, liés à 2 critères fondamentaux de la créativité que sont l'originalité et l'adaptation des productions à la tâche.

Cependant, bien que l'adaptation des productions graphiques à la tâche puisse être contrôlée par la procédure expérimentale en elle-même, en définissant explicitement le contexte et le sujet de production à réaliser, la mesure de l'originalité pose davantage de problèmes. En effet, la mesure de l'originalité des dessins est le plus souvent définie par l'évaluation subjective de juges (qui sont, qui plus est, le plus souvent, des chercheurs non-naïfs), ou encore par des statistiques d'apparition d'idées au sein de l'échantillon testé. La première évaluation reflète un problème redondant dans les recherches sur la créativité, lié à l'interférence subjective des juges. En effet, la créativité implique nécessairement une composante subjective. Notamment, comme nous l'avons précédemment défini, la composante d'originalité correspond aux aspects considérés par le sujet comme étant nouveaux, en fonction de son référentiel de connaissances, impliquant à la fois des connaissances communes comme celles de son groupe social, mais également ses propres connaissances relatives à des expériences subjectives par exemple (Lubart & Georgsdottir, 2004b ; Mouchiroud & Lubart, 2001). Ainsi, bien que plusieurs juges d'un même groupe social (des universitaires par exemple) puissent aisément s'accorder sur ce qu'ils considèrent ou non comme original selon leur conception commune, menant à des scores interjuges plutôt satisfaisants, il est peu probable que le référentiel de connaissance des enfants mène à une évaluation similaire de ce qui est ou n'est pas original. La mesure de l'originalité effectuée par des juges devrait ainsi soit être évaluée par des pairs afin de limiter, a minima, l'interférence relative aux connaissances non partagées entre les différents groupes, soit trouver une méthode alternative pour arriver à une mesure moins subjective. Le deuxième type de mesure, reposant sur une évaluation statistique, semble être une mesure bien plus objective. En revanche, elle comporte également une limite majeure, liée à la procédure expérimentale elle-même. En effet, si l'originalité est déterminée par un seuil statistique d'apparition d'idée (par exemple, 4% dans l'article de Lubart *et al.*, 2010), alors manipuler la taille d'échantillon permettra de modifier à la guise du chercheur, quelles idées peuvent être considérées comme originales et lesquelles ne le sont pas. Cette mesure est donc majoritairement dépendante du design expérimental utilisé et repose, une fois encore, sur le degré de connaissances partagées avec les individus d'un même échantillon.

Au delà des méthodes de mesure de l'originalité, le choix des consignes données à l'enfant pour la tâche est également d'une importance cruciale. Ainsi, demander par exemple à un enfant de produire un dessin « différent de ceux que les autres enfants produiraient » (Lubart *et al.*, 2010, p. 389.) pourrait s'avérer contre-productif. Cette consigne pourrait par exemple mener l'enfant à inhiber certaines idées qu'il pourrait penser -à tort- que ses pairs sont en mesure d'avoir. Ce type de consigne implique également un degré important de compétence de l'enfant lié à la théorie de l'esprit et au développement métacognitif. L'enfant doit en effet, dans ce type de procédure, être capable d'imaginer ce que ses pairs peuvent considérer ou non comme original par rapport à sa propre évaluation de ses idées. De plus, étant donné que l'originalité repose en partie sur des connaissances communes aux individus d'un même groupe social, il est probable que la majorité des idées originales produites par un même groupe d'enfant soient similaires, rendant difficile l'auto-évaluation de l'originalité de l'enfant par rapport à ses pairs.

Ainsi, un test de créativité graphique devrait pouvoir contrôler l'adaptabilité au contexte par sa procédure en délimitant explicitement le sujet du dessin, tout en laissant libre court à l'originalité subjective propre à chaque enfant, plutôt que de la contraindre par la consigne ou le type de mesure opéré. La procédure de dessin proposée par Karmiloff-Smith (1990) semble en accord avec ces critères. En effet, Karmiloff-Smith (1990) a proposé une tâche de dessin initialement dévolue à l'étude de la flexibilité des représentations que peut avoir un enfant d'un certain objet. Suivant cet objectif, Karmiloff-Smith (1990) a souhaité comparer des dessins d'un bonhomme, d'une maison, ou d'un animal, à des dessins d'un même sujet modifié. A cette fin, plusieurs consignes ont été testées (« draw an X you invent », « a pretend X », etc) afin de trouver la situation incitant au plus de modifications par rapport au premier dessin non modifié. Parmi les multiples consignes proposées, Karmiloff-Smith (1990) a rapporté que la méthode permettant d'inciter le plus de modifications dans le dessin de l'enfant consistait à demander à l'enfant de « dessiner un X qui existe », puis de « dessiner un X qui n'existe pas », X faisant référence au sujet de la consigne : un bonhomme, une maison, ou un animal.

Plusieurs études ont appliqué cette procédure au dessin créatif, afin d'investiguer les capacités de modifications créatives, avec, par exemple, des enfants TSA (*e.g.* Scott & Baron-cohen, 1996) ou encore pour étudier les effets du jeu de rôle sur la créativité d'enfants typiques (Mottweiler & Taylor, 2014). Bien que la consigne semble être adaptée à la mesure du dessin créatif, la cotation de l'originalité adossée à cette procédure se heurte aux mêmes limites que celles rapportées précédemment. Par exemple, dans l'étude de Mottweiler et Taylor (2014), la

mesure d'originalité reposait sur un jugement de codeurs qui devaient noter le dessin sur une échelle allant de 1 (non créatif) à 5 (très créatif). Comme nous l'avons évoqué, cette cotation implique une subjectivité trop grande de la part des codeurs adultes. En reprenant la méthode de Karmiloff-Smith (1990), une mesure plus objective de l'originalité pourrait être appliquée en cotant les modifications opérées sur chaque dessin qui n'existe pas en comparaison du dessin qui existe, pour chaque enfant. De cette façon, la procédure permettrait de contrôler l'adaptabilité au contexte par la définition du sujet impliquée dans la consigne (le dessin d'un bonhomme par exemple), tout en mesurant l'originalité propre à chaque enfant de façon objective à l'aide d'une consigne incitant à produire de la nouveauté.

V - Le développement de la créativité de l'âge préscolaire à l'adolescence

Torrance (1962, 1963, 1967, 1968) a été le premier à décrire le développement de la créativité comme suivant une progression globalement croissante, entrecoupée de 3 périodes de déclin. Ces trois chutes dans le développement créatif mesurées par Torrance avec le TTCT surviendraient à 5-6 ans, 9-10 ans et 13-14 ans, et ont été observées dans de multiples pays dont certains étaient de différentes cultures, comme les Etats-Unis et l'Inde. Cependant, bien que la plupart des études s'accordent à reconnaître un développement globalement croissant entrecoupé de périodes de chutes, elles ne font pas consensus sur les âges précis de déclin de la créativité (Barbot *et al.* 2016 ; Barbot & Rogh, 2020 ; Lau & Cheung, 2010 ; Said-Metwaly, 2021). L'absence de consensus est particulièrement marquée concernant l'âge précis auquel surviendraient les chutes de créativité décrites par Torrance (Lubart *et al.*, 2003 ; Lubart & Georgsdottir, 2004b). En effet, bien que certaines études aient observées des périodes de déclin strictement similaires à celles proposées par Torrance (e.g., Raina, 1980), d'autres ont montré des périodes d'augmentation et de chute qui diffèrent de celles observées par Torrance (e.g., Barbot *et al.*, 2016 ; Camp, 1994 ; Sherwood & Strahan, 1985). Pour analyser ces divergences, nous passons en revue les principales études portant sur le développement de la créativité, qui se sont centrées autour des trois périodes d'intérêt observées par Torrance : le passage du préscolaire au scolaire, la fin de la période élémentaire, et le passage du collège au lycée.

V.1. Du préscolaire au scolaire

La première chute de créativité identifiée par Torrance surviendrait vers 5-6 ans, et serait liée à un changement de niveau scolaire, les enfants entrant à cet âge dans le cycle scolaire élémentaire. Cette idée est soutenue par Gardner (1982) qui a indiqué un déclin de la créativité lors de l'entrée en école élémentaire, contrastant avec le haut niveau de créativité observé pendant toute la période préscolaire. En effet, Chae (2003) a illustré cette augmentation linéaire de la créativité pendant la période préscolaire, en évaluant 1366 enfants âgés de 4 à 6 ans avec le TCT-DP. Cependant, lors du passage à l'école élémentaire, l'environnement scolaire imposerait trop de normes et mettrait en valeur un apprentissage de règles, aux dépens de la créativité (Clifford, 1988 ; Clifford & Chou, 1991 ; Torrance, 1962, 1963). Ces observations ont été confirmées par Urban (1991) qui a observé, à l'aide du TCT-DP utilisé auprès de 272 enfants, une période de déclin de la créativité située entre 5 et 6 ans. Il rapporte, en accord avec Gardner (1982), que les enfants de niveau préscolaire présentaient des scores de créativité significativement plus élevés que ceux des enfants de CP, de l'ordre de deux fois plus élevés (Urban, 1991 ; Urban & Jellen, 1996). En Egypte, cette chute de créativité semble être observée à une période similaire. Sayed et Mohamed (2013) ont ainsi observé une chute de la créativité à 6 ans, avec le TCT-DP utilisé auprès de 901 enfants. L'âge précis concernant cette période de déclin semble cependant varier légèrement selon le type de test utilisé. Par exemple, en utilisant le TCAM et une tâche verbale pour évaluer 42 enfants préscolaires aux Etats-Unis, Daugherty (1993) a observé une période de déclin plus précoce, de 3 à 5 ans, suivi d'une augmentation à 6 ans.

V.2. La fin de la période élémentaire

La deuxième période de déclin créatif décrite par Torrance surviendrait vers 9-10 ans, et serait une nouvelle fois liée à l'environnement scolaire, notamment par une volonté de l'enfant de se conformer aux règles. Il y aurait à cet âge, un évitement de la pensée non-conventionnelle, divergente (Torrance, 1968, 1976). Ces propositions sur la diminution de la pensée divergente à cet âge ont été validées par Darvishi et Pakdaman (2012) auprès de 400 enfants en Iran et par Besançon et Lubart (2008) auprès de 211 enfants observés en France. En utilisant des subtests du TTCT, ils ont observé une augmentation des scores de pensée divergente de 6 à 9 ans, qui chutaient ensuite à 9-10 ans. Cette diminution temporaire à 9-10 ans a également été observée par Lubart et Georgsdottir (2004), ainsi que Lubart et Lautrey

(1995) et était immédiatement suivie d'une nouvelle période d'augmentation de la pensée divergente, à 10-11 ans (Darvishi & Pakdaman, 2012).

Cependant, d'autres études rapportent une période de chute de la créativité plus élargie, et davantage centrée sur le changement de cycle scolaire. Par exemple, Lau et Cheung (2010) ont observé, avec le WKCT utilisé auprès de 2476 enfants, une croissance plutôt qu'une chute de la créativité, entre 8-9 et 10-11 ans, correspondant aux classes de CM1 et de CM2, suivie d'une chute de la créativité entre 10-11 ans et 12-13 ans, correspondant à la période entre le CM2 et la 5^e, c'est-à-dire le passage de l'école élémentaire au collège. Cette différence semble être corroborée par les données de l'étude longitudinale de Claxton, Pannells, et Rhoads (2005) portant sur le développement de la pensée divergente de 9 à 15 ans. Plus précisément, en utilisant le CAP, ils ont identifié une chute du facteur d'originalité vers 11-12 ans (correspondant à l'entrée au collège), mais pas des autres facteurs (fluence, flexibilité et élaboration). En analysant les normes des 5 versions du TTCT de 1974 à 2008, Kim (2011) a également observé cette chute de la créativité à l'entrée au collège. Plus précisément, en rassemblant les données de 272 599 sujets de plusieurs pays, données utilisées pour dresser les normes du TTCT, Kim (2011) a montré que les scores de fluence et d'originalité diminuaient significativement à 11-12 ans.

Toutefois, cette chute ne semble être observée que sur les tests de pensée divergente. Sak et Maker (2006) ont rapporté une augmentation de la créativité de 841 élèves entre 6 et 9 ans, qui continuait à 9-10 ans plutôt que de chuter. Cette étude évaluait la créativité dans une tâche de résolution de problèmes mathématiques et l'augmentation observée à 9-10 ans pourrait donc être liée spécifiquement à la pensée convergente plutôt que divergente. Cette observation pourrait être corroborée par l'étude de Lin et Shih (2016) qui ont évalué la pensée divergente avec une version chinoise du TTCT, et la pensée convergente avec une version chinoise du Remote Associate Test (RAT) auprès de 92 enfants. Ils ont en effet observé une tendance à la baisse de la pensée divergente entre 8 et 10 ans, tandis qu'ils notaient une augmentation de la pensée convergente, résultant en une tendance générale sans différence entre les âges, c'est-à-dire sans pic de croissance ou chute de créativité.

V.3. Du collège au lycée

Enfin, la dernière période de déclin rapportée par Torrance aurait lieu vers 13-14 ans et serait marquée par le passage, aux Etats-Unis, en High-School². En France, cette troisième période se situerait plutôt au passage entre le collège et le lycée, vers 15 ans (Lubart *et al.*, 2003). Torrance (1967) indique que cette troisième période de déclin créatif pourrait une nouvelle fois être liée à l'environnement scolaire et social. Pendant cette nouvelle période de transition, les adolescents doivent faire face au stress et aux exigences changeantes de leur environnement scolaire, ce qui aurait pour conséquence d'exacerber la pression à la conformité couplée à une sensibilisation accrue des règles et du besoin d'acceptation. Ces facteurs amèneraient les enfants à produire davantage de réponses correctes, appropriées, qui restent en accord avec les normes et attentes sociales, en négligeant la pensée divergente (Gralewski *et al.*, 2016 ; Kim, 2011). En utilisant le TCT-DP auprès de 1522 enfants en Pologne, Jastrzębska et Limont (2017) ont confirmé cette période de chute à 13 ans, correspondant à l'entrée au Collège dans le système scolaire polonais. Ils ont également identifié une seconde période de chute pendant l'adolescence, à 16 ans. Cette deuxième chute durant l'adolescence a été confirmée par Gralewski *et al.* (2016) à 16 ans, lors de la transition entre le collège et le lycée dans le système éducatif polonais (Gralewski *et al.*, 2016 ; Jastrzębska et Limont 2017).

V.4. Des facteurs de développement multiples

Les différentes chutes de créativité identifiées semblent se situer, en accord avec les propositions de Torrance, autour de changements de cycles scolaires (*i.e.* Krampen, 2012). Cependant, l'environnement scolaire ne semble pas être le seul facteur à prendre en compte dans l'étude de la créativité et chaque période de chute de la créativité ne serait pas nécessairement lié au même facteur. Les études développementales ont ainsi identifié deux autres facteurs qui pourraient venir influencer le développement de la créativité des enfants et des adolescents.

Tout d'abord, l'idée d'un facteur métacognitif semble émaner des études développementales. En effet, des auteurs suggèrent que la chute de créativité à 9-10 ans serait liée à la capacité d'évaluer la pertinence des idées en termes d'originalité (Charles & Runco,

² High-School correspond, dans le système éducatif français, au Lycée. Aux Etats-Unis, la période de High-School est de 4 ans.

2000 ; Runco & Charles, 1997). Selon cette idée, Runco & Charles (1997) suggèrent l'existence d'un processus différent entre l'évaluation de ses propres idées originales et celles d'autrui, de telle sorte que la capacité d'évaluer l'originalité des idées des autres se développerait avant la capacité d'évaluer ses propres idées, menant à des difficultés de production de l'idée originale, par une faible efficience de l'évaluation de l'originalité de l'idée. Autrement dit, la capacité métacognitive d'évaluation des idées ne serait pas suffisamment développée à 9-10 ans pour pouvoir s'autoévaluer en termes d'originalité.

Toutefois, ce facteur métacognitif pourrait être lié au simple développement des capacités d'évaluation qui provoquerait une inhibition du développement de la fluence et de l'originalité (Sak & Maker, 2006). En effet, plusieurs auteurs semblent s'accorder sur le rôle joué par le développement cognitif dans le développement de la créativité (Lubart & Georgsdottir, 2004a ; Lubart & Lautrey, 1996 ; Georgsdottir *et al.*, 2002 ; Rieben, 1978). Selon ces auteurs, une baisse de créativité, notamment sur l'aspect de flexibilité créative, surviendrait lorsque d'autres aspects cognitifs, comme le raisonnement, sont à leur pic de développement. Par exemple, la chute de créativité à 9-10 ans pourrait être liée au pic de développement des capacités de pensée logique (i.e le raisonnement, la capacité de résolution de problème). Selon cette idée, les chutes de créativité s'expliqueraient par la perspective de Karmiloff-Smith (1994) sur le développement cognitif, suggérant que l'acquisition de nouvelles compétences cognitives pourraient provoquer des chutes temporaires d'autres aspects du développement cognitif, suivies de périodes de récupération une fois les nouvelles compétences consolidées.

Les différents facteurs avancés pour expliquer les chutes de la créativité n'expliquent cependant pas le développement globalement progressif, ni les périodes de rebondissement de la créativité. D'autres facteurs pourraient ainsi impacter le développement de la créativité. Par exemple, le développement des fonctions exécutives (Kleibeuker *et al.*, 2013) pourrait jouer un rôle central dans la créativité, comme en atteste la mesure de la flexibilité utilisée dans plusieurs tests de créativité, ou l'utilisation de la mémoire de travail dans l'évaluation des idées originales. Les évolutions sociétales, culturelles et environnementales, comme l'apparition de nouvelles technologies dans l'environnement des enfants et adolescents, pourraient également impacter les différents facteurs de créativité et jouer un rôle dans son développement (Amabile, 1983 ; Csikszentmihalyi, 1988 ; Perkins, 1981 ; Sternberg & Lubart, 1991 ; Sternberg & Lubart, 1995 ; Williams, 1972). Comme nous l'avons vu au chapitre 1, l'environnement technologique dans lequel les enfants et adolescents grandissent peut apporter un degré accru d'expériences

sensorimotrices par l'utilisation d'écrans tactiles, porteur de bénéfices cognitifs en contexte d'apprentissage, qui pourrait également impacter le développement de la créativité. Dans la lignée des quelques études ayant montré des bénéfices créatifs d'une pédagogie centrée sur la sensorimotricité (Besançon & Lubart, 2008 ; Jeanneret *et al.*, 2012 ; Lubart *et al.*, 2019), nous proposons d'explorer une nouvelle piste, qui pourrait apporter des éléments de réponse sur ces périodes réaménagement de la créativité dans le développement des enfants et adolescents : celle d'une vision évolutive de la créativité, dans laquelle la sensorimotricité occupe une place centrale.

Résumé du chapitre :

La créativité est source d'intérêt pour les chercheurs depuis l'antiquité. Plusieurs propositions ont été faites au fil des décennies pour tenter de la conceptualiser. Ces tentatives ont amené à la définir consensuellement comme « une production nouvelle et adaptée au contexte dans lequel elle se manifeste » (Amabile, 1996 ; Barron, 1988 ; Lubart, 1994 ; MacKinnon, 1962 ; Ochse, 1990 ; Simonton, 2000 ; Sternberg, 1988 ; Sternberg et Lubart, 1991 ; 1995 ; 1996 ; Lubart *et al.*, 2003, 2015 ; Zenasni, 2003). Le processus et le développement de la créativité se composeraient, dans une approche multivariée, d'une interaction de multiples facteurs, cognitifs, conatifs, émotionnels et environnementaux. Plusieurs évaluations de la créativité ont été développées en se basant essentiellement sur la dualité de pensée convergente-divergente et en évaluant principalement les aspects de fluence, de flexibilité et d'originalité, comme le TTCT de Torrance (1966). Ces évaluations ont été utilisées dans une étude développementale de la créativité, et ont permis l'observation d'un développement de la créativité globalement croissant, avec des périodes de réaménagements. Celles-ci semblent survenir lors du passage du préscolaire au scolaire (5-6 ans), à la fin de la période élémentaire ou lors du passage au collège (9-12 ans) et lors du passage du collège au lycée (15-16 ans). Pour expliquer ce phénomène, plusieurs pistes ont été avancées, notamment celle d'un effet de l'environnement social normé par les différents changements de cycle scolaires, mais également par des facteurs de développement cognitif. Néanmoins, les facteurs amenant les différentes périodes de rebondissement et le développement globalement croissant restent méconnus. Alors que la pédagogie centrée sur la sensorimotricité semble améliorer la créativité (Besançon & Lubart, 2008 ; Jeanneret *et al.*, 2012 ; Lubart *et al.*, 2019), l'utilisation croissante des technologies tactiles numériques impliquant une interaction sensorimotrice pourrait également moduler la créativité. Afin d'explorer cette voie, nous proposons d'explorer la piste évolutive de la créativité, dans laquelle la sensorimotricité occupe une place centrale.

CHAPITRE 3 – LES BASES EVOLUTIVES DE LA CREATIVITE : DE LA VARIATION A LA SELECTION

La vision évolutive de la créativité repose sur le principe consensuel d'essai-erreur (Dietrich & Haider, 2015) selon lequel, pour aboutir à une production créative, nous faisons de multiples essais pour arriver à une seule production (ou idée) que nous retenons. Ce principe, comme le soulignent Dietrich et Haider (2015), est l'équivalent du processus variation-sélection à l'œuvre dans les systèmes biologiques de l'évolution (Kronfeldner, 2010). Par analogie, Dietrich et Haider (2015) proposent d'établir un rapprochement entre le processus de variation-sélection et la pensée convergente et divergente ; la pensée convergente nécessitant une sélection pour produire la réponse la plus appropriée, et la pensée divergente générant de multiples variations différentes à partir d'un élément (Sio & Ormerod, 2009). Nous utiliserions le couplage variation-sélection pour aboutir à une idée créative, un couplage directement tiré de l'évolution biologique, autrement appelé l'algorithme évolutif (Dietrich & Haider, 2015). Dans ce chapitre, nous allons expliquer comment opère le couplage variation-sélection dans la description de l'évolution biologique, puis comment ce couplage a été utilisé pour expliquer le processus créatif.

I - Le couplage variation-sélection dans l'évolution biologique

L'évolution biologique des espèces repose sur un couplage essentiel de variation-sélection (Lewontin, 1970). La variation, première partie du couplage, permet de générer une pluralité de caractères ou de comportements. La sélection, seconde partie du couplage, permet de retenir les caractères ou comportements les plus avantageux et adaptés pour l'organisme par rapport à son environnement.

Selon Darwin (1859, 1871), la variation des caractères ou comportements se ferait de façon aléatoire, non dirigée, cette idée étant traduite par l'expression de « variation aveugle ». Futuyma (1998) considère la variation des caractères comme aléatoire dans la mesure où un environnement, qu'il soit avantageux ou non, n'influence pas les probabilités qu'une mutation particulière survienne. Autrement dit, on ne sait pas à l'avance, dans ce processus, quelles variations biologiques produites seront ensuite sélectionnées : la variation est aveugle. Selon le courant darwinien, la sélection ne peut pas imposer une direction à la variation. Le terme aveugle suppose donc qu'il n'y a aucune corrélation entre les facteurs causant la variation et ceux qui contribuent à la sélection : variation et sélection sont découplés. La sélection ne se produit qu'*a posteriori*, c'est-à-dire, après que le processus de variation soit terminé. Ils constituent deux processus indépendants l'un de l'autre, tels que « les facteurs responsables de la perpétuation sélective des variations sont totalement indépendants de ceux responsables de la génération originale de ces mêmes variations » (Toulmin, 1972, p. 337). Dans le courant darwinien, on considère donc qu'il n'y a pas de couplage entre la variation et la sélection : des variations sont produites aléatoirement, sans aucun lien avec les critères de sélection, puis certaines sont conservées et d'autres sont rejetées, c'est un système variationnel.

En opposition à l'évolution aveugle défendue par le darwinisme et pensée dans un système variationnel, l'évolution biologique telle que proposée par Lamarck (1838) est, à l'inverse, totalement dirigée, et pensée dans un système transformationnel. Selon la perspective lamarckienne, les facteurs amenant de nouvelles caractéristiques biologiques déterminent le cours de l'évolution sans l'intervention d'un quelconque processus de sélection *a posteriori* pour opérer un tri entre les variations adaptées et celles non adaptées à l'environnement. Du point de vue lamarckien, l'évolution biologique n'est donc pas basée sur un processus de variation aveugle détaché d'une sélection *a posteriori*. Elle est, au contraire, pensée comme un système dans lequel le succès de l'adaptation est garanti dès le départ. Ce courant conçoit donc

l'évolution biologique comme étant un processus totalement dirigé, c'est-à-dire, d'un point de vue algorithmique, un processus doté d'un couplage total (à 100%) entre la sélection et la variation : les facteurs de production des variations sont également les facteurs de sélection de ces mêmes variations. Dietrich & Haider (2015) soulignent que ce modèle évolutif lamarckien exclut toute notion d'individualité ou de variabilité. L'évolution, du point de vue lamarckien, est strictement influencée par l'environnement, et agit sur tous les individus de la même façon et au même moment, les différentes variations n'étant vues que comme du bruit dans cet algorithme évolutif.

En résumé, le courant darwinien implique que la sélection des caractères biologiques par l'environnement se fait *a posteriori*, sans guider la variation des mutations qui surviennent au niveau individuel, tandis que le courant lamarckien suggère que la sélection des gènes adaptés à l'environnement guide la variation des caractères biologiques, de la même façon pour tous les individus. Cette idée de couplage variation-sélection inhérente à l'évolution biologique a été reprise pour tenter d'expliquer le processus d'essai-erreur de la pensée créative.

II - La créativité conçue comme un système de variation-sélection

II.1. Le modèle BVSR : un précurseur

En s'inspirant directement de l'analogie entre la résolution de problème par essai-erreur et le principe de sélection naturelle appliqué à l'évolution (Ashby, 1952 ; Baldwin, 1906 ; Pringle, 1951), Campbell (1960) a proposé un modèle variationnel de la créativité. En se basant sur la conception évolutive de Darwin (1859, 1871), il a suggéré de comprendre la créativité comme un processus de variation aveugle (« Blind Variation », BV), suivi d'une rétention sélective (« Selective Retention », SR), proposant ainsi le modèle de « Blind Variation and Selective Retention » (BVSR). Dans le modèle initialement établi et enrichi par Campbell (1960, 1974) et Popper (1972, 1974, 1975, 1984), puis Martindale (1990) et Simonton (1997, 1999, 2003, 2007, 2010, 2011, 2013), la formation d'hypothèses, ou d'idées créatives serait basée sur un système de variation aveugle. La variation des idées créatives serait donc totalement aveugle et aléatoire, comme dans l'évolution biologique des caractères du système variationnel : plusieurs idées seraient générées (variation), de façon totalement aléatoire et sans connaissance d'un but à atteindre (aveugle). Puis, une idée particulière serait sélectionnée et retenue par l'environnement, *a posteriori*, comme l'idée créative la plus adaptée (rétention

sélective). Ainsi conçue, la variation correspondrait à la génération de nouveauté, c'est-à-dire la création ou modification d'hypothèses, tandis que la rétention sélective correspondrait à la sélection de l'idée la plus adaptée, c'est-à-dire sélectionner ou non une hypothèse particulière parmi d'autres. En ce sens, le processus créatif correspondrait à une génération et une évaluation d'idées sur une base d'essai-erreur (Kronfeldner, 2010). Toutefois, l'utilisation d'un système variationnel reposant sur une génération totalement aléatoire d'idées, a été critiqué et a suscité la controverse du modèle BVSR. En effet, il a été principalement avancé que nous pouvons générer des idées créatives dirigées par un but, par exemple, lorsque nous cherchons une solution à un problème, ce qui ne peut pas être en accord avec un modèle de la créativité basé sur l'évolution darwinienne qui suppose une génération d'idées totalement aléatoire. Reprenons la définition consensuelle de la créativité, une production nouvelle et adaptée au contexte (Amabile, 1996 ; Barron, 1988 ; Lubart, 1994 ; MacKinnon, 1962 ; Ochse, 1990 ; Simonton, 2000 ; Sternberg, 1988 ; Sternberg & Lubart, 1991, 1995, 1996 ; Lubart *et al.*, 2003, 2015). Pour qu'une production soit nouvelle, nous faisons appel à la variation d'idées. Mais l'aspect d'adaptation au contexte implique nécessairement, dès le départ de l'activité, une certaine connaissance d'un but à atteindre afin de calibrer notre génération d'idées par rapport à la situation. Le rôle de la sélection dirigeant la variation rapprocherait donc la créativité de l'évolution lamarckienne plutôt que darwinienne. Cependant, la créativité n'est pas strictement la même pour chaque individu. Il est peu probable que tous les êtres humains aient la même idée créative dans une situation identique. Fondamentalement, la créativité ne peut pas non plus être considérée comme un système transformationnel. La pensée créative ne semble donc se situer ni dans le darwinisme, ni dans le courant lamarckien, c'est-à-dire qu'elle ne serait ni complètement indépendante (*i.e.* totalement aveugle) du processus de sélection, ni entièrement déterminé (*i.e.* totalement dirigé) par celui-ci (Dietrich & Haider, 2015 ; Kronfeldner, 2010 ; Lewontin, 1970). Le processus créatif semble plutôt se situer entre ces deux extrêmes, comme un processus de variation partiellement dirigé (Richerson & Boyd, 2005), *a priori* plutôt qu'*a posteriori*, par la sélection (Boyd & Richerson, 1985 ; Richerson & Boyd, 2005 ; Kronfeldner, 2010 ; Martindale, 1999 ; Mumford, 1999 ; Read, 2006 ; Schooler & Dougal, 1999). La sélection permettrait donc de diriger la variation par un but à atteindre, permettant la variation d'idées originales par rapport au contexte de la production créative. Au regard de ces critiques, la proposition initiale de Campbell (1960) a depuis évolué, notamment au travers de la conception de la créativité proposée par Dietrich et Haider (2015) dans laquelle le couplage partiel de la variation-sélection occupe une place centrale dans le processus d'essai-erreur.

II.2. Le couplage variation-sélection appliqué à la créativité selon le modèle de Dietrich et Haider (2015)

La créativité, communément décrite comme un processus d'essai-erreur, semble donc s'intégrer dans l'algorithme évolutif que constitue le couplage variation-sélection, comportant à la fois des variations d'idées différentes et un couplage liant la génération d'idées à leur sélection (Dietrich & Haider, 2015 ; Kronfeldner, 2010). Plus précisément, comme le défendent Dietrich et Haider (2015), la production d'idées nouvelles (variation) serait guidée *a priori* par le type, ou le contexte, du problème créatif à résoudre (sélection). C'est autour de ce couplage que réside l'évolution majeure de la proposition de Dietrich et Haider (2015) en comparaison de la proposition initiale de Campbell (1960) dans laquelle le couplage, totalement indépendant de la sélection, ne prenait pas en compte le contexte du problème créatif à résoudre, puisque la variation était définie comme étant aveugle. Cette nouvelle conception de la créativité correspond à la définition consensuelle proposée au chapitre 2, selon laquelle le produit créatif est défini comme quelque chose de nouveau et adapté au contexte, c'est-à-dire une variation originale partiellement dirigée par le contexte du problème créatif, sélectionnée et confrontée au monde pour ne sélectionner que la variation de l'idée la plus adaptée.

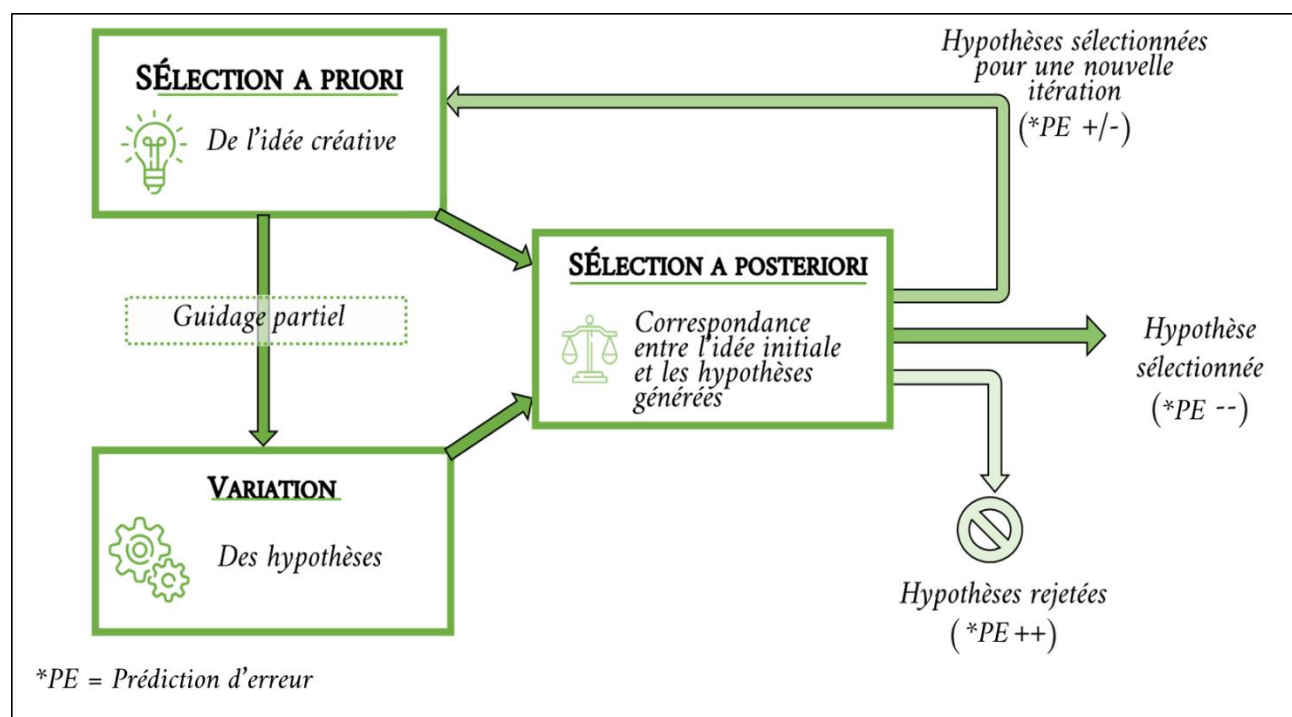


Figure 1. Schématisation du processus de variation-sélection de l'idée créative selon la description de Dietrich et Haider (2015).

Cette conception récente sur laquelle nous nous basons permet d'expliquer le cheminement précis nous permettant de produire une idée créative. Dietrich (2019a) explique à ce sujet que, lorsque nous tentons de résoudre un problème créatif, nous sommes dans une situation comportant une part de nouveauté, d'inconnu. Nous ne savons pas à l'avance comment résoudre ce problème. Nous devons donc générer des hypothèses (*i.e.* des variations) qui seront partiellement guidées par un but à atteindre (*i.e.* la sélection *a priori*) teinté des paramètres du problème créatif comme le contexte dans lequel résoudre le problème. Etant donné la nouveauté de la situation, nous ne pouvons pas savoir à l'avance si l'une de ces hypothèses sera la plus appropriée et adaptée au contexte, nous devons donc en essayer plusieurs. Certaines hypothèses seront rejetées, d'autres seront gardées pour une nouvelle itération du processus, dans le but d'arriver à une idée finale, la plus originale et appropriée au contexte. C'est ici que se situe la sélection *a posteriori*, qui permet de choisir la ou les idées les plus créatives de ce mécanisme fonctionnant par essai-erreur. Les idées qui s'approchent le plus de la prédiction initiale, c'est-à-dire avec la plus grande adéquation entre le but à atteindre et l'hypothèse générée seront sélectionnées pour une nouvelle itération. L'idée créative est finalement retenue lorsque la différence (*i.e.* la prédiction d'erreur) entre la prédiction initiale et le but à atteindre est nulle. La figure 1 schématise notre synthèse de cette description du processus créatif. Comme le défend Dietrich (2013), face à un problème, nous évoluons vers la solution. Cependant, la boucle de variation-sélection telle que nous l'avons décrite n'est pas suffisante pour expliquer le fonctionnement prédictif et les multiples itérations du système d'essai-erreur. Pour expliquer le détail du processus créatif, nous allons décrire le fonctionnement de la prédiction utilisée dans le contrôle moteur.

Résumé du chapitre :

La créativité peut être conçue comme un processus s'organisant autour du couplage variation-sélection. Campbell (1960) a emprunté le système variationnel initialement décrit par Darwin (1859, 1871) pour proposer le modèle BVSR dans lequel la variation permet de générer des idées créatives de façon totalement aveugle, c'est-à-dire, sans savoir *a priori* si les idées générées seront adaptées au contexte. Cependant, la définition de la créativité comprend un aspect d'adaptation au contexte qui nécessite que la variation soit partiellement guidée par la sélection. La variation des idées serait donc guidée *a priori* par les critères de sélection dépendant du type de problème créatif à résoudre. Dietrich et Haider (2015) proposent ainsi de concevoir la créativité comme le résultat de variations d'hypothèses partiellement dirigées par un but à atteindre sélectionné *a priori*. Ce couplage variation-sélection serait intégré à un processus itératif d'essai-erreur, dans lequel le couplage variation-sélection serait répété jusqu'à ce que les idées comportant le moins d'erreur, c'est-à-dire le moins d'écart par rapport à ces critères, soient sélectionnées. Pour comprendre le détail de ce processus, nous devons décrire le fonctionnement prédictif utilisé dans le contrôle moteur de l'action.

CHAPITRE 4 - LE SYSTEME PREDICTIF : DU CONTROLE SENSORIMOTEUR A LA CREATIVITE

Puisque nous situons notre travail sur la créativité, défini comme un système liant la variation d'hypothèses à la sélection d'idées au travers d'un fonctionnement par essai-erreur, il nous faut encore décrire le processus qui permet de lier la variation à la sélection au travers de multiples itérations. Pour Dietrich et Haider (2015), la variation-sélection de l'idée créative ne peut se faire qu'en se basant sur un processus de prédiction nécessaire à un fonctionnement par essai-erreur. Ce système de prédiction puise ses racines dans le contrôle sensorimoteur de l'action. Au cours de ce chapitre, nous définirons la prédiction puis nous décrirons son fonctionnement dans le contrôle sensorimoteur au travers des modèles internes de l'action. Enfin, nous décrirons plus particulièrement le mécanisme avancé par Dietrich et Haider (2015) pour expliquer comment le système de prédiction sensorimotrice peut rendre compte du processus créatif.

I - La prédiction en tant que processus de l'évolution

Cette origine évolutive de la créativité basée sur la sensorimotricité rejoint l'idée avancée par plusieurs auteurs (Koziol *et al.*, 2012 ; Koziol & Lutz, 2013 ; Pezzulo, 2011 ; Pezzulo & Castelfranchi, 2007, 2009 ; Stout, 2010) selon laquelle la cognition humaine se serait développée au cours du temps, à partir des mécanismes de contrôle sensorimoteur, suivant un processus évolutif (Koziol *et al.*, 2012). L'évolution aurait ainsi facilité le développement des capacités prédictives d'anticipation et de simulation dans un but premier de contrôle de l'action (Koziol *et al.*, 2012), afin de guider les actions physiques nécessaires à la survie. Par exemple, si un prédateur parvient à attraper sa proie, c'est parce qu'il a pu prédire les conséquences de ses propres mouvements et ceux de sa proie dans l'environnement. Ces capacités prédictives initialement dévolues au contrôle de l'action en cours auraient évoluées, par un phénomène d'exaptation, pour être appliquées à d'autres fonctions cognitives comme la créativité. Les processus prédictifs d'anticipation sont considérés aujourd'hui par certains auteurs comme fondamentaux pour toutes les activités humaines (Berthoz, 2015).

Ainsi, selon Dietrich et Haider (2015), la créativité utiliserait, de façon centrale, les capacités prédictives. La prédiction est un processus neurocognitif général, hérité de l'évolution, faisant du cerveau un système de prédiction (Bar, 2007, 2009 ; Friston & Stephan, 2007 ; Grush, 2004 ; Llinás, 2001 ; Pezzulo *et al.*, 2008). Cette capacité à prédire le futur est considérée comme la fonction cérébrale la plus commune (Llinás, 2001). En effet, afin d'interagir avec le monde, nous faisons continuellement des prédictions, de façon continue et automatique, même lorsque nous ne sommes pas engagés dans une tâche : le cerveau produit activement des prédictions qui anticipent les événements futurs (Buckner & Carroll, 2007 ; Moulton & Kosslyn, 2009) puis compare ces prédictions à leur réalisation effective. Nous pouvons constater ce mécanisme au quotidien au travers des illusions d'optique : le cerveau se repose sur les prédictions de ce qu'il s'attend à voir, et crée un effet de surprise lorsqu'il y a une erreur de prédiction (Bar, 2007 ; Grush, 2004 ; Mehta & Schaal, 2002 ; Rao & Ballard, 1999). Cette capacité prédictive serait à la base de l'apprentissage. Notre cerveau réalise une prédiction d'un événement qui est comparé à la réalisation effective de ce même événement. Le degré d'erreur de la prédiction détermine l'apprentissage : s'il y a plus d'erreur qu'attendu, alors cette erreur sera enregistrée et utilisée pour réduire celle de la prédiction future, permettant ainsi un apprentissage. Lorsqu'il n'y a plus d'erreur, l'événement est acquis et l'apprentissage cesse (Rescorla & Wagner, 1972 ; Schultz, 2000).

Des études neuroanatomiques soutiennent cette idée d'erreur prédictive comme mécanisme à la base des apprentissages. Par exemple, en utilisant l'électroencéphalogramme (EEG), il a été observé qu'une onde composant le potentiel évoqué (PE), la négativité liée à l'erreur (ERN), est générée entre 50 et 100 ms avant que l'erreur soit faite (Taylor *et al.*, 2007), illustrant un système de prédiction d'erreur. De la même façon, il a été constaté qu'une augmentation de la libération de dopamine dans la zone tegmentale ventrale coïncidait avec le renforcement de l'apprentissage (Schultz, 2000). Plus précisément, c'est le signal dopaminergique qui, par une anticipation de la récompense, produirait les ERN dans le cortex cingulaire antérieur (Holroyd & Coles, 2002). Le cerveau utiliserait ce système de prédiction pour tout type de tâches, de la perception visuelle à la mémoire, en passant par les fonctions exécutives et la créativité. La créativité reposerait de ce fait, sur un réseau neuronal déjà impliqué dans de multiples activités cognitives, ne permettant pas de localiser d'aires neuronales précises de la créativité (Arden *et al.*, 2010 ; Dietrich & Kanso, 2010 ; Sawyer, 2011). Dietrich (2019a) illustre cette conception par la métaphore suivante : il est facile de trouver un pays comme la France avec une carte ou un satellite, mais on ne peut pas trouver tous les français de cette façon. La créativité se basant essentiellement sur un mécanisme prédictif, elle emprunterait donc un ensemble de réseaux neuronaux également utilisés pour d'autres activités cognitives (Dietrich, 2015, 2019a, 2019b). Cette idée rejoint celle de Bink & Marsh (2000) sur le rôle des facteurs cognitifs de l'approche multivariée de la créativité que nous évoquions au chapitre 2. Ces auteurs avançaient que la créativité serait simplement fondée sur les processus cognitifs utilisés au quotidien (Bink & Marsh, 2000), comme la mémoire de travail ou l'inhibition. Ces fonctions cognitives seraient ainsi impliquées autant pour les activités cognitives quotidiennes que pour la créativité.

Selon l'hypothèse de Dietrich, le processus créatif serait une émanation du système de prédiction issu du contrôle moteur de l'action. Nous allons expliquer le fonctionnement de ce système prédictif au travers des modèles internes du contrôle moteur de l'action aussi bien réalisée qu'imaginée.

II - Prédiction et modèles internes de l'action

La notion de modèles internes permet d'illustrer le fonctionnement des capacités prédictives dans le contrôle de l'action sensorimotrice. Le terme modèle réfère à la modélisation

par le cerveau des interactions entre les systèmes sensoriels et moteurs ainsi que leur interaction avec l'environnement. Cette modélisation est interne, c'est-à-dire qu'elle est intériorisée par le cerveau et implémentée au sein de réseaux neuronaux spécifiques.

II.1. Présentation des modèles internes

Les modèles internes sont aujourd'hui considérés comme essentiels pour le contrôle précis de notre corps (Lebon *et al.*, 2013 ; Wolpert, 1997). Ils se construisent et se mettent à jour continuellement grâce aux retours sensoriels des actions effectuées et aux conséquences sensorielles attendues dans l'environnement (Flanagan & Wing, 1997 ; Kawato *et al.*, 1987 ; Wolpert & Ghahramani, 2000 ; Wolpert *et al.*, 1995). Le champ des modèles internes couvre tous les liens qui existent entre les entrées sensorielles (i.e. afférences) comprenant les informations à propos du corps et de l'environnement, et la sortie motrice correspondant à l'exécution motrice de l'action (i.e. efférence). Comme indiqué dans la Figure 2., les modèles internes se déclinent en deux catégories : les modèles directs, ou prédictifs, et les modèles inverses, ou contrôleurs (Wolpert, 1997 ; Miall & Wolpert, 1996 ; Wolpert *et al.*, 1998). Les modèles directs sont utilisés dans le calcul des conséquences sensorimotrices de l'action prédite, intégrées à la planification de l'action (Wolpert & Kawato, 1998 ; Gallistel, 1980 ; Wolpert & Ghahramani, 2000). Ceux-ci fournissent la prédiction des conséquences sensorielles du mouvement à partir de l'état initial du système et d'une copie de la commande motrice, appelée copie d'efférence (Holst & Mittelstaedt, 1950 ; Lebon *et al.*, 2013 ; Festinger & Canon, 1965 ; Angel, 1976 ; Prablanc *et al.*, 1986). Les modèles directs peuvent se scinder en deux parties : les modèles directs dynamiques et sensoriels. Le modèle direct dynamique est utilisé pour prédire l'état futur du corps à partir de l'état initial fourni par la copie d'efférence. Le modèle direct sensoriel permet, à partir de la prédiction réalisée dans le modèle dynamique, de calculer la sortie sensorielle estimée (Lebon *et al.*, 2013). Le modèle direct permet donc dans son ensemble de fournir une prédiction sensorielle, utilisée pour estimer les conséquences sensorielles à venir, à partir de plans moteurs de l'action à réaliser ou en cours de réalisation. Cette estimation est utilisée dans un comparateur confrontant les caractéristiques du mouvement prédit à celles du mouvement réalisé. Au cours de l'action, le comparateur permet de faire le lien entre les commandes motrices et les retours sensoriels du corps, grâce à des réafférences permettant de comparer le mouvement en cours de réalisation avec sa prédiction préalable. Les modèles inverses permettent de convertir les conséquences sensorielles attendues

précédemment en commandes motrices. Ils permettent ainsi de relier l'intention de l'action aux commandes motrices, c'est-à-dire à la planification motrice : ils ont un rôle de contrôle (Desmurget & Grafton, 2000 ; Wolpert & Kawato, 1998 ; Wolpert *et al.*, 1998). Basé sur l'état initial et l'état final prédit, ils génèrent la commande motrice adaptée permettant d'aller de l'un à l'autre. Cette commande motrice est copiée (copie d'efférence) et envoyée au modèle direct pour produire une nouvelle prédiction. Les modèles directs et inverses agissent donc en complémentarité. Le modèle inverse calcule les plans moteurs qu'il envoie au modèle direct par une copie d'efférence. Grâce à celle-ci, le modèle direct produit des prédictions sur les états futurs, servant de boucle de correction au modèle inverse (Figure 2).

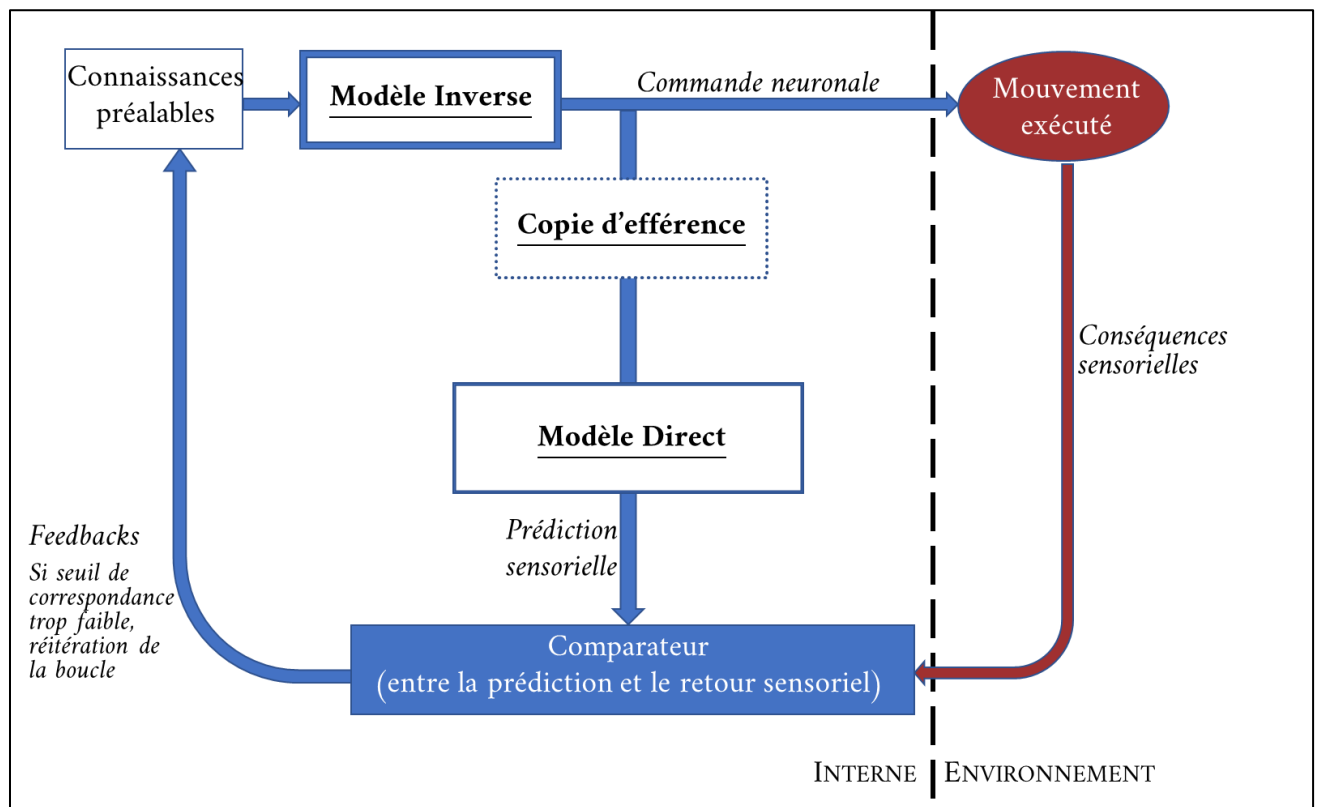


Figure 2. Schéma des modèles internes de l'action utilisés dans le contrôle de l'action en cours, inspiré de Lebon et al. (2013).

II.2. La prédiction, élément central des boucles de contrôle des modèles internes

Les modèles internes ainsi décrits sont utilisés dans un système à double boucle, fonctionnant selon deux modes de contrôle distincts : le contrôle en feedback (contrôle rétroactif), et le contrôle en feedforward (contrôle par anticipation). Le premier mode de

contrôle décrit un contrôle par afférence, autrement appelé contrôle rétroactif ou contrôle en boucle fermé. Lorsqu'on effectue une action sur un objet, ce mode de contrôle permet de faire appel à des connaissances déjà établies par le passé pour paramétrer les divers éléments moteurs comme la force à exercer sur l'objet pour le tenir. Si les caractéristiques de l'objet se trouvent modifiées, alors le mode de contrôle en feedback permettra des réafférences sensorielles permettant de s'adapter aux nouvelles caractéristiques de l'objet. La boucle de feedback permet donc l'adaptation des caractéristiques motrices à l'action en comparant le retour sensoriel du mouvement réalisé avec le mouvement et le retour sensoriel prédits. Cependant, ce système à lui seul n'est pas suffisant pour le contrôle de l'action en cours et nécessite un système de prédiction pour outrepasser les longs délais de feedback sensoriels qui peuvent résulter de la transduction et de la conduction neuronale (Downing, 2009 ; Grush, 1997 ; Miall & Wolpert, 1996). La boucle feedforward est donc utilisée pour prédire les caractéristiques sensorimotrices nécessaires à l'interaction avec l'objet, ce qui permet de s'affranchir des délais de feedback sensoriel en apportant une prédiction des conséquences sensorielles des commandes motrices. Cette boucle d'anticipation permet également d'augmenter la vitesse de traitement en réduisant la quantité d'informations à traiter : ayant déjà traité ces informations de façon simulée, les modèles internes n'ont pas besoin de décoder à nouveau toutes les informations, facilitant également leur interprétation (Bubic *et al.*, 2010 ; Diedrichsen *et al.*, 2007 ; Gross *et al.*, 1999 ; Hesslow, 2002 ; Rao & Ballard, 1999). La prédiction permet de simplifier le processus sensorimoteur à la simple comparaison entre la prédiction sensorielle et le retour sensoriel réel (Colder, 2011). Les modèles internes sont donc également impliqués dans la prédiction de l'action. Ils permettent à la fois la réalisation de la boucle de contrôle en feedback, et de prédire sa réalisation par la boucle de contrôle en feedforward. Cette prédiction de l'action se réalise notamment au travers d'émulateurs des modèles directs (Grush, 2004).

II.3. L'émulation, générateur de prédiction sensorielle des modèles directs

Comme nous l'avons évoqué au début de ce chapitre, les capacités prédictives auraient trouvé leur origine dans ce besoin de compenser les longs délais de feedbacks neuronaux (Desmurget & Grafton, 2000) puis auraient évolué de façon opportuniste pour être utilisées dans la prédiction d'événements futurs. Pour résoudre le problème de latence lié à la transduction et la conduction neuronale en réalisant des prédictions, le système sensorimoteur repose sur des émulateurs, permettant de simuler le système d'afférence sensorielle, c'est-à-

dire, de prédire le feedback sensoriel à venir (Grush, 2004). C'est grâce à l'émulateur que la vitesse de traitement sensorimotrice peut aller au-delà de la vitesse de traitement de l'action réalisée et de la perception de ses conséquences (Kawato & Wolpert, 1998 ; Rao & Ballard, 1999). Le système d'émulation se situe dans les modèles directs et permet d'anticiper les conséquences sensorielles de l'action à venir. Cette anticipation est calculée à partir de la copie d'efférence envoyée par les modèles inverses qui apportent la représentation du but de l'action, c'est-à-dire l'information sur l'état final souhaité (Bubic *et al.*, 2010 ; Diedrichsen *et al.*, 2007 ; Grush, 2004 ; Mehta & Schaal, 2002 ; Pezzulo *et al.*, 2008 ; Wolpert *et al.*, 2003).

Plus précisément, les régions cortico-motrices envoient une copie d'efférence aux régions sensorielles, comme le cortex postérieur. La nature du codage prédictif est sensorielle : nous prédisons ce que nous sommes sur le point de percevoir, et non ce que nous sommes sur le point de faire. Les régions sensorielles enregistrent le plan d'action avec la carte sensorielle du corps, afin de convertir ce plan en une prédiction des conséquences sensorielles de l'action prévue (Frith, 1992), c'est la partie dynamique du modèle direct. L'émulateur procède ensuite à une émulation de cette copie d'efférence sur la carte sensorielle du corps, c'est la partie sensorielle des modèles directs. Cette émulation, réalisée grâce à la complémentarité des modèles internes, permet de produire une prédiction des conséquences sensorielles du plan moteur qui sera comparée aux retours de l'environnement, générant une erreur prédictive sur laquelle une nouvelle itération pourra se reposer. L'erreur prédite ainsi générée permet de mettre à jour la commande motrice du modèle inverse qui résultera en une nouvelle copie d'efférence et une nouvelle prédiction, jusqu'à réduire l'erreur au seuil minimum, c'est-à-dire, jusqu'à la convergence des modèles inverses et directs (Wolpert *et al.*, 1995, 2003).

II.4. Des connaissances implicites aux connaissances explicites

Pour réaliser une action et des prédictions, les modèles internes se basent sur un système de connaissances dual, composé des systèmes de connaissances implicite et explicite, au travers desquels nous traitons et nous nous représentons l'information sensorielle prise sur notre monde (Dienes & Perner, 1999 ; Reber, 1996 ; Schacter & Buckner, 1998).

L'émulateur fonctionne sur la base des connaissances implicites, ou procédurales. C'est un système de connaissances entièrement inconscient, basé sur l'expérience ou la compétence motrice (Dienes & Perner, 1999 ; Reber, 1996 ; Schacter & Buckner, 1998). Les circuits

neuraux réalisant les prédictions implicites ont été identifiés dans les ganglions de la base (Houk *et al.*, 1995) et le cervelet (Wolpert *et al.*, 2003). Les connaissances implicites correspondent à des connaissances relatives aux procédures motrices à appliquer, comme des plans moteurs. Elles se constituent à partir d'expériences sensorimotrices passées dont les procédures ont été enregistrées pour être utilisées à nouveau lorsqu'une situation similaire se présente. Lorsque le plan moteur appliqué à la nouvelle situation correspond au plan moteur retrouvé de l'expérience passé, nous avons un renforcement des connaissances procédurales. Au contraire, si le résultat de l'action diffère de la prédiction de l'émulation basée sur les plans moteurs passés, alors les connaissances procédurales dans ce type de situation sont mises à jour et remplacées par la nouvelle expérience. Au quotidien, conduire un véhicule nécessite de nombreuses connaissances procédurales qui permettent à notre corps de coordonner de multiples mouvements. Grâce à ces connaissances procédurales dont nous n'avons pas conscience du détail, nous parvenons par exemple à actionner l'embrayage tout en actionnant le levier de vitesse, sans même y penser. Cette connaissance procédurale s'acquiert par l'apprentissage de la conduite qui devient ainsi automatique par le rappel de plans moteurs pré-enregistrés.

Cependant, l'apprentissage automatique ne résulte pas seulement du système de connaissances implicites. Arriver à une automatisation nécessite une communication efficace entre les deux systèmes de connaissances, implicites et explicites. D'une part, les connaissances explicites sont nécessaires au préalable de l'acquisition de connaissances procédurales. Pour acquérir l'automatisation de la conduite par exemple, nous devons au préalable utiliser un système de connaissances explicite pour diriger nos actions et les réaliser consciemment. Dans notre exemple sur la conduite automobile, l'utilisation de connaissances explicites pourrait se traduire par la conscience accrue portée à trouver le levier de vitesse dans l'habitacle. D'autre part, les connaissances procédurales peuvent être transférées au système de connaissances explicites, c'est-à-dire rendues explicites pour créer des connaissances déclaratives, utilisables en dehors du contexte sensorimoteur initial d'acquisition. Les connaissances déclaratives peuvent ainsi être obtenues en sollicitant l'information procédurale stockée dans les modèles internes (Pezzulo, 2011).

Selon Jeannerod (2009), c'est par cet échange entre connaissances explicites et implicites que nous avons conscience de nos propres actions. Prendre conscience de ses propres actions, ce que les auteurs nomment l'agentivité (Gallagher, 2000), nécessite une comparaison

entre l'idée initiale de l'action à réaliser qui dépend de connaissances explicites, et la prédiction du résultat final de l'action qui dépend de connaissances implicites (Gallagher, 2006 ; Kiefer & Harpaintner, 2020 ; Soliman *et al.*, 2013). La communication entre les deux systèmes de connaissances passe par la prédiction du système moteur qui permet de prévoir les étapes de l'action à venir (implicite) pour correspondre à l'état visé de façon consciente (explicite) (Blakemore *et al.*, 2000 ; Frith, 1992 ; Shin *et al.*, 2010). Lorsque le plan moteur est exécuté trop rapidement, sans que le lien causal ait été fait explicitement par la prédiction sensorimotrice, nous ne pouvons pas prédire ce que nous allons voir et ressentir. Par exemple, nous nous surprenons souvent au quotidien par notre réussite à rattraper, par réflexe, un objet qui tombe. Nous sommes surpris de notre mouvement et avons l'impression que nous ne l'avons pas produit intentionnellement (Frith, 1992). La communication entre les deux systèmes de connaissances implicites et explicites permet ainsi l'agentivité qui est sous-tendue par la prédiction sensorimotrice et qui nous permet de prendre conscience de nos propres mouvements, grâce au lien causal établi entre l'état initial et l'état final de notre corps (Wegner, 2003).

Les connaissances explicites générées à partir des connaissances implicites permettent de simuler une action sans la réaliser. Le système de contrôle moteur que nous avons décrit ne permet de réaliser des prédictions que lors d'une action en cours de réalisation. Cependant, le système de contrôle moteur peut également être utilisé consciemment, en dehors d'un retour de l'environnement, dans le cas d'une action imaginée : la simulation devient explicite.

III - La simulation de l'action imaginée

En l'absence de retours sensoriels réels, l'action est simulée. Détacher la représentation de l'action en dehors de sa réalisation effective est au centre de la théorie de simulation motrice proposée par Jeannerod (2001), comme une réactivation des représentations motrices sans réelle exécution de l'action. Pour que la simulation motrice puisse se détacher de la commande motrice provoquant l'exécution du mouvement, un processus d'inhibition interviendrait au niveau de la commande motrice. L'inhibition serait ainsi un processus majeur, nécessaire pour la simulation de l'action, permettant de différencier la simulation de l'exécution réelle de l'action (O'Shea & Moran, 2017 ; Ridderinkhof *et al.*, 2011). En effet, plusieurs études ont suggéré que le processus d'inhibition pourrait être étroitement lié aux processus de simulation

motrice afin de garder un seuil de commande motrice suffisamment inférieur au seuil d'activation (Jeannerod, 2001 ; Stinear, 2010 ; Guillot *et al.*, 2012). Selon O'Shea & Moran (2017), cette idée implique que les processus d'inhibition sont produits dans l'intention motrice pendant la simulation (Ridderinkhof *et al.*, 2014), et qu'ils jouent un rôle à la fois pour guider les processus moteurs et pour empêcher leur exécution réelle. Le cadre de la simulation motrice, étant détaché des retours de l'environnement, est d'un intérêt particulier pour le problème qu'elle pose, à savoir comment le processus de variation-sélection opère en l'absence de retour de l'environnement, et donc, en l'absence de comparateur.

Les caractéristiques de ce type de simulation motrice du système explicite peuvent être étudiées au travers d'un exemple particulier de simulation, qui est l'imagerie motrice.

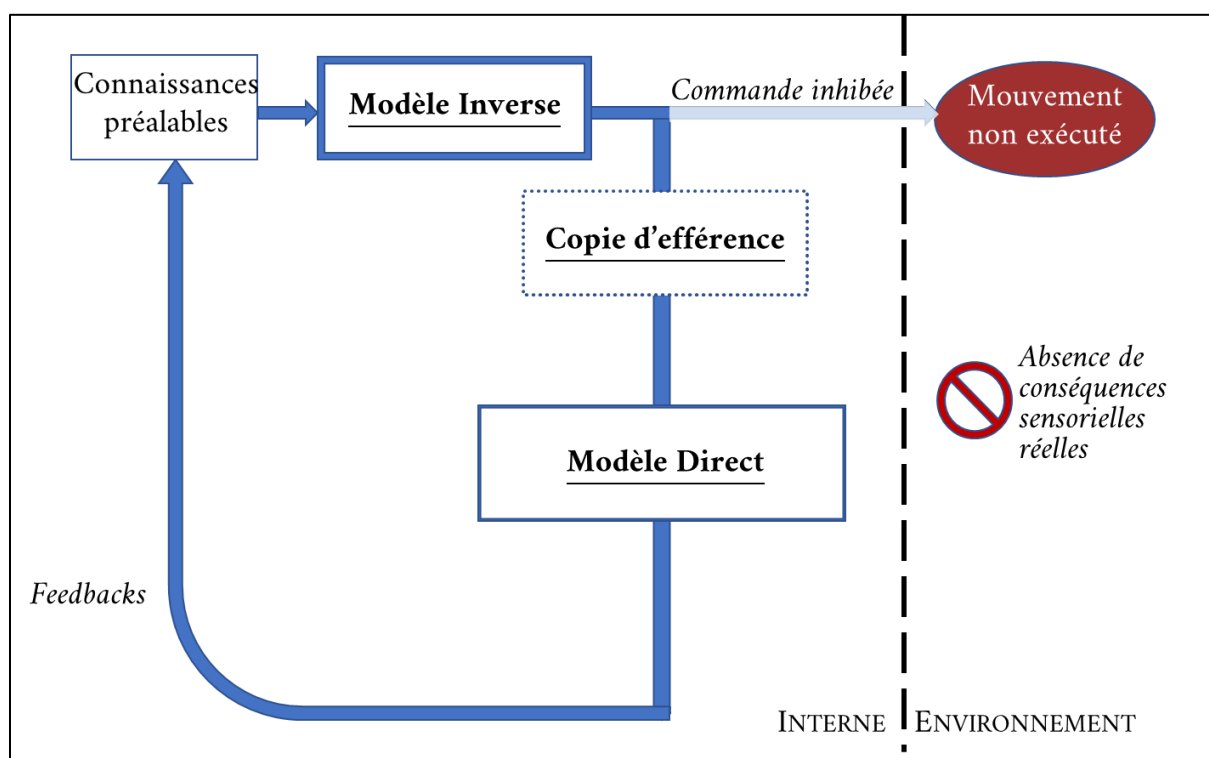


Figure 3. Schéma de des modèles internes de l'action utilisés dans le contrôle de l'action simulée, inspiré de Lebon *et al.* (2013).

Lorsqu'on évoque une simulation de la représentation motrice sans arriver à son exécution réelle, on parle communément du processus d'imagerie motrice (Jeannerod, 1994). L'imagerie motrice serait ainsi impliquée dans la programmation et la préparation de l'action sans toutefois être exécutée, empruntant les mêmes mécanismes et activant les mêmes systèmes

moteurs que lors d'une exécution réelle de l'action (Decety & Ingvar, 1990 ; Jeannerod, 2001, 2003a ; Johnson, 2000 ; Prinz, 1994). La théorie de la simulation motrice de Jeannerod (2001) explique que, grâce à une simulation des centres moteurs efférents, nous pouvons imaginer une action motrice sans la réaliser. L'imagerie motrice permet ainsi de mobiliser le système moteur dans une simulation d'action d'une partie (*i.e.* l'écriture) ou de l'ensemble du corps (*i.e.* la marche), de façon intentionnelle. De cette façon, nous pouvons, par exemple, nous imaginer en train de faire des activités diverses comme écrire ou marcher. Grush (2004) précise que les systèmes sensoriels peuvent également être simulés, de la même façon qu'ils prédisent les conséquences sensorielles d'une action en cours. De ce fait, lorsqu'on s' imagine une action, par exemple marcher d'un point A à un point B, l'entièreté de la boucle de contrôle en feedforward des modèles internes serait simulée, partant d'une représentation de l'état final estimé par les modèles inverses, et permettant aux modèles directs, grâce à la copie d'efférence (Grush, 2004), d'estimer les conséquences sensorielles du mouvement simulé.

A la différence de leur utilisation lors d'une action en cours de réalisation, les modèles internes utilisés ici en simulation ne comportent plus de boucle de feedback de l'environnement et ils sont utilisés de façon consciente. Par conséquent, l'imagination d'une action ne peut se baser que sur un ensemble de connaissances acquises antérieurement, qui, par la simulation, permettront de prédire les conséquences sensorielles d'une situation connue, déjà rencontrée dans le passé. Puisque cette action est totalement imaginée, la simulation de l'action ne permet pas aux modèles internes d'utiliser un comparateur entre l'action prédite et l'action réalisée. Il n'y a, dans la simulation de l'action, aucune erreur prédictive générée pour de nouvelles itérations d'essai-erreur. La figure 3 schématise l'utilisation des modèles internes de l'action utilisés en simulation. Cette boucle de prédiction permet ainsi l'utilisation d'un système moteur détaché de l'action en cours, cette fois généré consciemment, intentionnellement. Cette capacité d'imagination intentionnelle semble être soutenue par les études neuroanatomiques. En effet, la génération des représentations motrices impliquerait un large réseau de structures neuronales (Anquetil & Jeannerod, 2007 ; Georgopoulos, 2000 ; Jeannerod, 2003a ; 2003b ; 2006 ; Jeannerod & Jacob, 2005) impliquées dans le contrôle moteur (Borroni *et al.*, 2008 ; Brown *et al.*, 2006 ; Catmur *et al.*, 2007) et la planification motrice (Grafton & Hamilton, 2007 ; Williams *et al.*, 2007).

Comme nous l'évoquions au début de ce chapitre, le système prédictif utilisé initialement dans la prédiction sensorimotrice serait également utilisé pour d'autres fonctions

cognitives comme l'imagination ou la créativité. Nous avons vu comment le processus de prédiction s'articule pour le contrôle de l'action en cours, nous allons à présent expliquer comment il peut être appliqué à la créativité dans un système de prédiction explicite.

IV – L'analogie des modèles internes

Dietrich et Haider (2015) proposent de concevoir la créativité comme un processus reposant sur le système de contrôle moteur. Les modèles internes utilisés pour le contrôle de l'action en cours de réalisation permettraient d'expliquer une partie du fonctionnement du couplage variation-sélection nécessaire à la production de créativité. En effet, les modèles internes de l'action mobilisés dans le contrôle de l'action sensorimotrice forment un mécanisme prédictif fonctionnant par essai-erreur. Appliqué à la créativité, ce système, pourrait permettre de générer et d'évaluer des idées créatives, au même titre qu'il permet de générer et d'évaluer des actions dans le cadre du contrôle moteur. Le fonctionnement des modèles internes pourrait ainsi être considéré, comme le suggèrent Dietrich et Haider (2015) comme l'analogue neuronal du couplage variation-sélection impliqué dans le processus créatif et présenté au chapitre 3. Cette analogie, schématisée dans la figure 3, pourrait se décrire comme suit :

- Le modèle inverse, qui assure la sélection du mouvement final dans le cadre du contrôle moteur, permettrait, par analogie, de sélectionner *a priori* le but créatif à atteindre dans le cadre de la créativité.
- Le modèle direct, considéré comme un testeur d'hypothèses dans le contrôle moteur par sa capacité à réaliser des prédictions sur les conséquences sensorielles attendues du mouvement, pourrait, par analogie, jouer le rôle du système de variation dans le cadre de la créativité. Le modèle direct permettrait ainsi de générer différentes hypothèses pour réaliser le but visé, c'est-à-dire, de prédire les moyens d'atteindre le but créatif.
- Le couplage de ces deux modèles permet, dans le cadre du contrôle de l'action, d'apporter une prédiction d'erreur entre les conséquences sensorielles générées et le mouvement final sélectionné. Par analogie, ce couplage permettrait de produire, dans le cadre de la créativité, une prédiction d'erreur entre l'idée créative sélectionnée *a priori* (la sélection) et la façon d'atteindre cette idée (la variation).

Ainsi, le couplage variation-sélection du processus créatif pourrait fonctionner de la même façon que le couplage entre modèle direct et modèle inverse du contrôle moteur, générant une erreur prédictive, qui, lorsqu'elle est trop élevée, ne permet pas de produire l'idée créative, à la fois nouvelle et adaptée au contexte. Ce couplage présente cependant des particularités lorsqu'il est appliqué au cadre de la créativité.

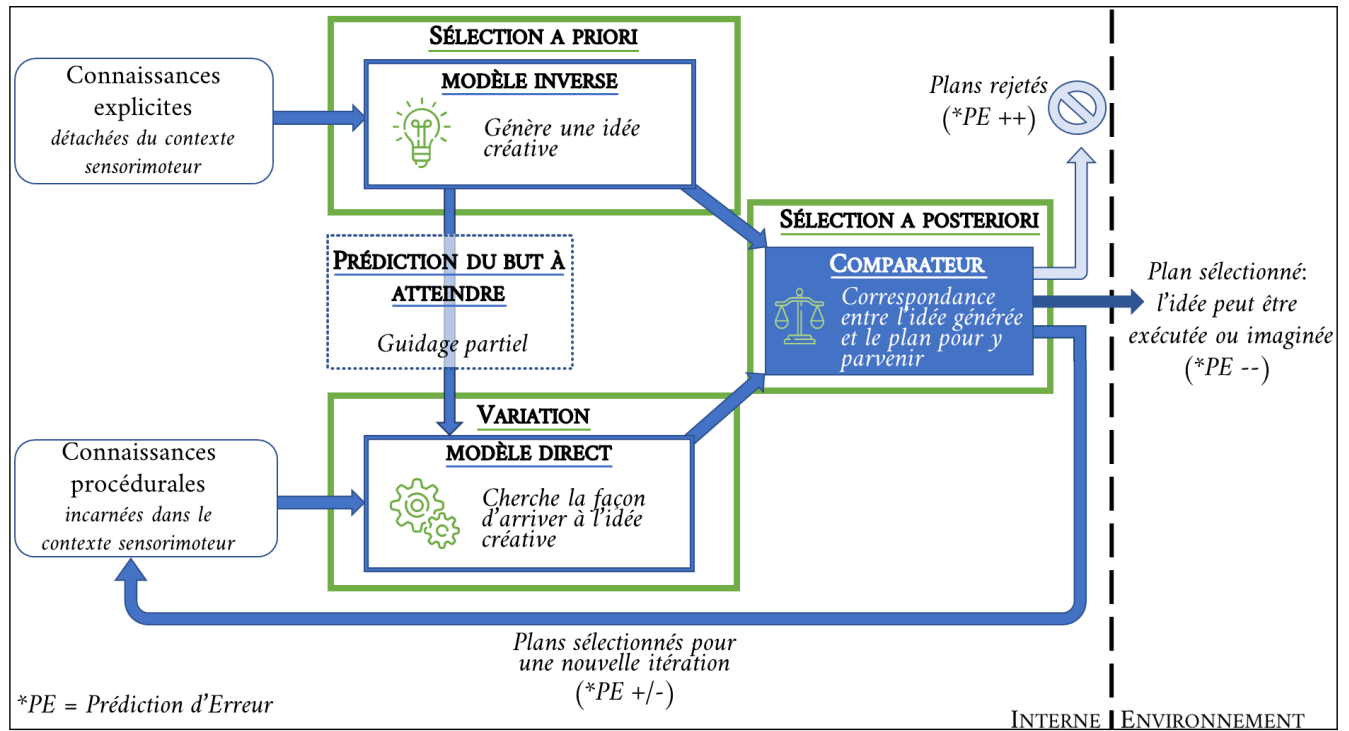


Figure 4. Schématisation de l'analogie entre la boucle variation-sélection (en vert) et les modèles internes de l'action (en bleu) utilisés dans le processus créatif, selon les propositions de Dietrich et Haider (2015).

V - Relier la variation à la sélection

Comme nous l'avons défini au chapitre 2, pour qu'une production soit créative, elle doit être adaptée au contexte dans lequel elle se manifeste, mais elle doit également être nouvelle, originale, c'est-à-dire, inconnue dans notre expérience passée ou notre base de connaissances. La créativité peut donc se définir comme une variation partiellement dirigée par la sélection (cf. Chapitre 3). L'analogie entre prédiction et créativité ne peut ainsi se situer ni purement dans la simulation explicite qui impliquerait un système larmarckien totalement dirigé *a priori* par des connaissances passées, ni totalement dans l'émulation qui impliquerait un système darwinien

avec une variation d'hypothèses totalement aveugle, triées et retenues *a posteriori* par l'environnement (cf. Chapitres 3 et 4). La créativité ne pourrait donc se situer que dans la communication entre les deux systèmes de connaissances implicites et explicites des modèles internes. Le lien entre la sélection et la variation reposerait sur un dialogue entre ces deux systèmes de connaissances qui permettrait de générer une idée créative en deux étapes. La première étape se situerait dans le système explicite et permettrait de générer un but à atteindre (*i.e.* une idée) pour diriger partiellement la variation. La seconde étape se situerait dans un système implicite et permettrait, au travers de multiples hypothèses, de trouver comment atteindre le but prédit afin de réaliser ces idées créatives. Ainsi, le système explicite correspondrait à la partie consciente de la génération de créativité, c'est-à-dire, le contexte et l'intention de produire une idée créative par la génération du but prédit. Le système implicite correspondrait à la façon d'arriver à l'idée créative, comprenant de multiples formes intermédiaires dont nous n'avons pas conscience.

V.1. La sélection : un système de simulation explicite

Selon Dietrich et Haider (2015), le système explicite utilisé en simulation semble être le plus approprié pour permettre l'expression du processus créatif au niveau de la sélection de l'idée.

Tout d'abord, le système explicite, à l'inverse du système implicite, offre un espace pour manipuler les informations à partir du cortex préfrontal. Cet espace permet la génération de prédictions explicites dans une situation aux solutions inconnues dans l'expérience passée, autrement dit, dans un espace créatif, permettant de générer de la nouveauté. L'utilisation du système explicite permettrait donc de générer, à partir d'un contexte, une prédiction explicite de but à atteindre pour résoudre un problème dont nous n'avons pas la solution, et de le maintenir séparé des connaissances antérieures (implicites) sur la situation (Cowan, 2001 ; Dietrich & Haider, 2015 ; Miller & Cohen, 2001 ; Dienes & Perner, 1999), afin de générer de la nouveauté. De cette façon, nous serions capables d'imaginer ou prédire les effets d'événements que nous ne pouvons pas produire avec notre corps (Dietrich & Haider, 2015). En d'autres termes, le système explicite permettrait la projection d'un but dans l'espace inconnu du contexte créatif. Par analogie, nous pourrions imaginer la prédiction du but à atteindre comme une sonde spatiale, envoyée dans un espace inconnu pour guider notre voyage. La

prédiction du but à atteindre agit ainsi comme une balise lumineuse à suivre pour les variations d'idées.

Le système explicite permet de détacher la créativité de l'action en cours. Comme décrit au chapitre 4, le système explicite offre la possibilité de générer une prédiction d'un but à atteindre qui ne nécessite pas de se référer à l'action en cours, ni aux connaissances implicites (Anderson & Lebiere 1998). La prédiction du but à atteindre générée dans un système explicite permet de prédire une idée à réaliser, même si elle n'est pas réalisable dans l'environnement sous sa forme actuelle, en écartant le besoin de recourir à sa production dans l'environnement pour recevoir une réponse adaptative *a posteriori*. La prédiction du but à atteindre générée *a priori* par le système explicite permet ainsi une entrée prédictive dans le comparateur, qui sera confrontée au système de variations, sans avoir à réaliser l'idée dans l'environnement.

V.2. La variation : un système d'émulation implicite

A l'inverse de la sélection, la variation serait portée par le système de connaissances procédurales utilisé en émulation. A partir de l'idée générée au préalable dans le processus de sélection, le système d'émulation chercherait au travers des plans moteurs enregistrés dans les connaissances procédurales, comment arriver à produire l'idée créative. L'émulateur, en se basant sur des connaissances procédurales, permet de trouver comment relier l'état initial (la situation) au but prédit (l'idée créative). Il permet de définir les moyens procéduraux pour atteindre le but prédit, autrement dit, de dresser une feuille de route pour atteindre cette idée créative.

L'émulateur utilisé dans un système implicite permet ainsi de faire de multiples itérations qui sont comparées à l'idée prédite. Chaque itération comparée au but prédit permet de rejeter les plans moteurs non viables lorsque l'erreur prédictive est trop grande, ou de les garder pour une nouvelle itération lorsque l'erreur prédictive est satisfaisante. Ces multiples itérations en chaîne permettent ainsi de réduire l'erreur prédictive, par le mécanisme d'essai-erreur, permettant d'arriver à une forme viable de plan moteur pour atteindre l'idée prédite lorsque le système atteint une erreur prédictive nulle.

VI – Les afférences sensorielles, essence de créativité

Selon le modèle proposé par Dietrich et Haider (2015), la créativité consisterait à « prédire un but [explicite] et à générer une émulation [implicite] pour le réaliser » (p. 14). En ce sens la créativité consiste à trouver « l'algorithme permettant de lier le but visé au problème par le biais d'une série de plan moteurs » (Dietrich & Haider, 2015, p. 14).

Puisque la créativité repose sur l'analogie des modèles internes, alors les afférences sensorielles, utilisées de façon centrale pour le contrôle moteur, devraient jouer un rôle fondamental dans le processus créatif. En effet, dans le contrôle moteur, les afférences sensorielles sont utilisées pour valider ou invalider le programme moteur sélectionné en comparant les prédictions sensorielles et les afférences réelles (cf. Chapitre 3). Par analogie, dans la créativité, les afférences sensorielles réelles seraient utilisées pour valider ou invalider chaque hypothèse générée, en comparant les afférences sensorielles prédites dans la variation d'hypothèses et les afférences réelles utilisées pour générer un but relatif au contexte créatif. Le processus créatif se réalise donc nécessairement sur un ensemble d'afférences sensorielles, qu'elles soient réelles ou prédites. Celles-ci alimenteraient aussi bien la prédiction du but à réaliser que la façon de l'atteindre. Les afférences sensorielles disponibles dans la situation viendraient alimenter le système de simulation explicite afin de générer une prédiction du but qui soit adaptée au contexte. Les afférences sensorielles prédites alimenteraient également le système d'émulation implicite qui permet de trouver comment produire l'idée créative de façon originale au travers de prédictions des conséquences sensorielles. Les afférences sensorielles sont ainsi l'essence du processus permettant d'arriver à une idée créative, c'est-à-dire, une idée originale et adaptée au contexte dans lequel elle se manifeste (Lubart *et al.*, 2003, 2015).

L'analogie des modèles internes souligne ainsi l'importance des afférences sensorielles dans le processus créatif. Les afférences sensorielles sont équivalentes au carburant permettant de faire fonctionner ce mécanisme prédictif. La créativité reposant sur ce même mécanisme prédictif, les afférences sensorielles pourraient être considérées comme l'essence de la créativité.

Résumé du chapitre :

Le lien entre la variation et la sélection est rendu possible au travers du mécanisme prédictif utilisé dans le contrôle de l'action sensorimotrice. Ce mécanisme de contrôle de l'action sensorimotrice aurait évolué de façon opportuniste (par exaptation) pour être utilisé, par le cerveau, dans de multiples tâches cognitives, comme la créativité (Dietrich & Haider, 2015 ; Koziol *et al.*, 2012 ; Pezzulo, 2011). Les modèles internes du contrôle de l'action permettent de décrire le fonctionnement de ce processus prédictif dans le contrôle de l'action. Guidés par la commande motrice des modèles inverses, les modèles directs permettent de générer une prédiction des conséquences sensorielles relatives à l'action en cours. Les conséquences sensorielles prédites sont ensuite comparées au retour sensoriel réel. Cette comparaison génère un degré d'erreur entre les conséquences sensorielles prédites et celles réellement observées pour nourrir les modèles inverses dans une nouvelle itération du processus (Lebon *et al.*, 2013). La prédiction sensorielle permet de simplifier le processus sensorimoteur à la simple comparaison entre la prédiction sensorielle et le retour sensoriel réel, ce qui facilite le traitement et l'interprétation des informations. La prédiction sensorielle est rendue possible par l'émulateur qui, à partir de la copie d'efférence, permet de convertir les commandes motrices initiales en conséquences sensorielles, puis de simuler l'action prévue sur la carte sensorielle du corps (Grush, 2004). Dietrich et Haider (2015) ont proposé de concevoir la créativité comme une analogie des modèles internes de l'action. Selon cette analogie, le modèle inverse serait utilisé pour sélectionner, *a priori*, le but créatif à atteindre, tandis que le modèle direct permettrait de générer différentes hypothèses pour atteindre le but visé. La comparaison entre le but générée et les hypothèses générées pour y parvenir permettraient de générer une prédiction d'erreur entre l'idée à atteindre (*i.e.* la sélection *a priori*) et le moyen d'y arriver (*i.e.* la variation), qui, lorsqu'elle est nulle, permet de sélectionner définitivement l'idée créative à produire (*i.e.* la sélection *a posteriori*). Ce couplage entre l'idée à atteindre et la façon de la réaliser est rendu possible par la communication entre les systèmes explicites et implicites qui permettent à la fois de générer une idée créative nouvelle, inconnue, tout en définissant les moyens procéduraux pour réaliser cette idée. Au centre de ce couplage, œuvrent les afférences sensorielles qui pourraient être considérées comme un des facteurs agissant sur la production créative. Celles-ci apportent les informations essentielles sur le contexte à la sélection *a priori* des modèles inverses, et sont utilisées pour générer les différentes variations d'hypothèses.

CHAPITRE 5 – AGIR SUR L’AFFERENCE SENSORIELLE

POUR MODULER LA CREATIVITE AU COURS DU

DEVELOPPEMENT

Dans le chapitre précédent, nous avons expliqué l’analogie entre les modèles internes de l’action et la créativité, telle que proposée par Dietrich et Haider (2015). Cette analogie suggère que les afférences sensorielles jouent un rôle majeur dans le processus créatif. Autrement dit, la créativité pourrait être pensée comme un système incarné. Au cours de ce chapitre, nous commencerons par décrire la perspective incarnée et située de la créativité, considérant la créativité comme un processus enraciné dans le système d’afférences et d’efférences sensorimotrices. Puisque nous nous intéressons plus particulièrement à la production créative chez l’enfant et l’adolescent, il est alors fondamental de considérer l’évolution des capacités de traitement sensoriel. Nous décrirons comment les capacités de traitement de l’afférence sensorielle évoluent avec l’âge, de l’enfance à l’adolescence. Enfin, nous expliquerons comment les outils numériques peuvent être utilisés pour moduler l’afférence sensorielle.

I – Créativité et cognition incarnée

La prédiction sensorielle semble être un mécanisme généralisé pour toute tâche cognitive (Pezzulo, 2011), et notamment la créativité. Comme nous l'évoquions au chapitre précédent, ce mécanisme prédictif est issu, par exaptation, du contrôle de l'action sensorimotrice et garde ainsi un enracinement profond dans le système sensorimoteur (Gallagher, 2006 ; Kiefer & Harpaintner, 2020 ; Soliman *et al.*, 2013). Les mécanismes prédictifs impliqués dans la simulation de l'action que nous avons décrits au chapitre 3 seraient des traces de la cognition incarnée (Pearson *et al.*, 2015). L'enracinement de la créativité dans les mécanismes de prédiction sensorimotrice permet de la définir comme étant un processus cognitif incarné. Comme nous l'avons décrit au chapitre 1, la cognition incarnée, en opposition à l'approche cognitive classique, défend l'idée que toute connaissance se base sur les interactions sensorimotrices du sujet avec son environnement, c'est-à-dire, repose sur un système d'afférences et d'efférences sensorimotrices (Wilson, 2002). Les afférences et efférences sensorielles joueraient ainsi un rôle majeur dans les processus cognitifs comme la créativité (Dietrich & Haider, 2015), incarnée dans le corps en action au travers des modèles internes de l'action (Gallese & Metzinger, 2003 ; Grush, 2004 ; Jeannerod, 2001, 2006 ; Pezzulo, 2011 ; Wolpert *et al.*, 2003). La créativité dépendrait alors, au même titre que les apprentissages scolaires décrits au chapitre 1, « de la manière dont l'individu va coordonner son activité cognitive avec les ressources perceptives, motrices et environnementales » (Bara & Tricot, 2017, p. 6). Selon le modèle théorique de Dietrich et Haider (2015), la créativité peut ainsi être considérée dans une perspective incarnée (ou enracinée) de la cognition (Barsalou, 2008 ; Matheson & Barsalou, 2018 ; Matheson & Kenett, 2020) dans laquelle la créativité « serait générée en simulant mentalement des futures actions possibles » (Matheson & Kenett, 2020, p. 2), reposant sur un système de connaissances qui pourrait également déterminer la portée des possibles (Binder *et al.*, 2009 ; Zioga *et al.*, 2020). Bien que la cognition incarnée soit un courant théorique développé et répandu, l'étude de la créativité dans cette perspective est relativement nouvelle, comme l'attestent les nombreux essais théoriques élaborés au cours des 10 dernières années (Baber *et al.*, 2019 ; Choi & DiPaola, 2013 ; Dietrich & Haider, 2015 ; Glăveanu, 2014 ; Griffith, 2021 ; Kemp, 2018 ; Kristensen, 2004 ; Leschziner & Brett, 2019 ; Malinin, 2016, 2019 ; Snowber, 2019 ; Stanciu, 2015 ; Van der Schyff *et al.*, 2018). De ce fait, les études empiriques sont encore rares à ce propos mais tendent à émerger, avec une idée générale qui semble s'accorder sur un consensus autour d'une influence du corps et de

l'environnement sur la créativité (*e.g.* Byrge & Tang, 2015 ; Dennis, 2013 ; Fielding & Murcia, 2022 ; Frith et al., 2020 ; Kontos *et al.*, 2021 ; Kuo & Yeh, 2016 ; Leung *et al.*, 2012 ; Oppezzo & Schwartz, 2014 ; Palmiero & Piccardi, 2020 ; Slepian & Ambady, 2012). Par exemple, en établissant une revue systématique des études portant sur la créativité dans une perspective incarnée, Frith et al. (2020) ont notamment rapporté que la quasi-totalité des études rapportait un effet positif du mouvement sur la créativité, et qu'aucune étude ne montrait d'effet négatif. Ces effets positifs pouvaient se retrouver dans plusieurs types d'activité comprenant des mouvements, dont des gestes, de la danse, des postures corporelles, des manipulations d'objets ou encore des activités de dessin.

La perspective incarnée de la créativité, ainsi que la proposition de Dietrich et Haider (2015) selon laquelle la créativité est liée au processus sensorimoteur, sont également appuyées par des études récentes en neuroimagerie suggérant que la créativité serait implémentée dans les régions motrices (Matheson *et al.*, 2017 ; Matheson & Kenett, 2020, 2021 ; Murali & Händel, 2022 ; Tian *et al.*, 2018 ; Wu *et al.*, 2015). Comme nous l'avons mentionné au chapitre 4, les études en neuroimagerie ont notamment montré que les régions motrices, comme le cortex prémoteur, étaient utilisées pour simuler de multiples possibilités d'action (Pezzulo & Cisek, 2016 ; Watson & Buxbaum, 2015), qui seraient nécessaires pour générer de la créativité (Matheson & Kenett, 2020). La réalisation d'une tâche créative impliquerait une plus grande activité des régions motrices (Benedek *et al.*, 2014, 2018 ; Fink *et al.*, 2009 ; Matheson & Kenett, 2020), en comparaison d'une tâche similaire non créative (Aziz-Zadeh *et al.*, 2013). L'activation de ces régions motrices a été aussi bien observée dans des tâches verbales que non verbales (Gonen-Yaacovi *et al.*, 2013). Le domaine de l'improvisation témoigne des liens entre sensorimotricité et créativité, comme dans la danse (*e.g.* Łucznik, 2015 ; Kimmel *et al.*, 2018), le théâtre (*e.g.* Méndez Martínez & Fernandez-Rio, 2020), ou la musique. L'improvisation musicale a notamment apporté une contribution majeure concernant le rôle des régions sensorimotrices dans la créativité. De nombreuses études en neuroimagerie témoignent d'une forte activation des régions sensorimotrices lors de l'improvisation musicale (Bashwiner & Bacon, 2019 ; Bashwiner *et al.*, 2016 ; Beaty, 2015 ; Bengtsson *et al.*, 2007 ; Berkowitz & Ansari, 2010 ; Limb & Braun, 2008 ; López-González & Limb, 2012 ; Pinho *et al.*, 2014). Cette activation des régions sensorimotrices ne dépendait pas d'une différence de séquence motrice entre les notes jouées en improvisation et celles jouées par le groupe contrôle, qui étaient similaire en nombre et en termes de distribution spatiale, relatant un effet d'activation des régions sensorimotrices liées à la créativité (Limb & Braun, 2008).

Les études dans le domaine de l'improvisation musicale ont également montré l'importance de l'intégration sensorimotrice pour la créativité (Aziz-Zadeh *et al.*, 2013 ; Beaty, 2015 ; Boasen *et al.*, 2018 ; Boccia *et al.*, 2015). En effet, l'intégration sensorielle serait centrale à la génération des idées créatives (Kenett *et al.*, 2018 ; Matheson *et al.*, 2017). Cette idée a également été avancée par Tian *et al.* (2018) qui ont montré que la créativité pouvait être affectée par les capacités d'intégration visuelle. Plus précisément, améliorer les afférences sensorielles pourrait améliorer la créativité. A l'aide de la réalité virtuelle, Fleury *et al.* (2020) ont comparé les performances créatives d'individus dans un train virtuel placé dans un tunnel. Dans la condition expérimentale, les participants pouvaient voir les lampes défiler par la fenêtre, suggérant que le train était en mouvement. Dans la condition contrôle, le train était à l'arrêt. Les résultats ont montré de meilleures performances créatives pour les participants qui étaient placés dans la condition en mouvement en comparaison de la condition contrôle, soulignant un effet des informations sensorielles sur le processus créatif. A notre connaissance, une seule étude chez l'enfant a établi des liens entre intégration sensorielle et créativité. En comparant un groupe d'enfants de 6 à 10 ans pratiquant de la danse à un groupe contrôle du même âge, Palmiero *et al.* (2019) ont montré que cette activité pouvait améliorer la carte topologique du corps qui, en conséquence, menait à une augmentation de la créativité graphique testée avec le TTCT.

Ces études réalisées chez l'adulte et chez l'enfant, soulignent l'importance de l'intégration sensorimotrice dans le processus créatif. Selon cette perspective, l'étude des capacités créatives de l'enfant offre un contexte particulièrement intéressant pour appréhender les relations entre sensorialité et créativité. En effet, les capacités d'intégration sensorielles évoluent tout au long de l'enfance et de l'adolescence et contraignent les capacités prédictives de l'action sensorimotrice de l'enfant. Avant d'étudier les relations entre sensorialité et créativité chez l'enfant et l'adolescent, nous allons successivement présenter le développement des capacités d'intégration puis de prédiction sensorielle.

II – L'évolution des capacités d'intégration sensorielle au cours du développement

Nous allons décrire dans cette partie comment évoluent les capacités d'intégration des afférences sensorielles avec l'âge, puis comment ces capacités d'intégration sensorielle modulent les capacités prédictives.

II.1. Le développement du traitement de l'afférence sensorielle dans le contrôle de l'action chez l'enfant

Comme nous l'avons décrit au chapitre 4, pour générer des prédictions, les modèles internes reposent sur le traitement d'afférences sensorielles, notamment visuelles et proprioceptives (Assaiante *et al.*, 2014 ; Fourkas *et al.*, 2006 ; Guilbert *et al.*, 2021 ; Shenton *et al.*, 2004 ; Sober & Sabes, 2003). Le primat et le degré d'indépendance des différentes sources d'afférences évolue tout au long de l'enfance et de l'adolescence, avec deux étapes clés, vers 7 ans et 8-9 ans.

Avant 7 ans, les informations visuelles et proprioceptives ne sont pas traitées avec la même importance. Les auteurs notent, avant cet âge, un primat de l'afférence visuelle sur l'afférence proprioceptive. En effet, la faiblesse du traitement de l'information proprioceptive observé jusqu'à au moins 7 ans empêche les enfants d'intégrer les retours proprioceptifs avec précision pour corriger leurs mouvements en cours (Bairstow & Laszlo, 1981 ; Contreras-Vidal, 2006 ; Laszlo & Bairstow, 1984), entraînant une sous-utilisation des informations proprioceptives pour le contrôle du mouvement (Babinsky *et al.*, 2012a ; King *et al.*, 2012). Des études ont ainsi montré que l'intégration des informations proprioceptives dans le contrôle du mouvement était difficile à 6-7 ans, en comparaison d'autres modalités visuelles (Contreras-Vidal, 2006 ; King *et al.*, 2012). Les enfants de 6-7 ans privilégieraient les réafférences visuelles pour le contrôle de l'action en cours plutôt que les informations proprioceptives (Bard & Hay, 1983 ; Van Roon *et al.*, 2008). Cependant, la capacité de traitement de l'information proprioceptive s'améliore fortement entre 4 et 6-7 ans (King *et al.*, 2012 ; Laszlo & Bairstow, 1980 ; Shumway-Cook & Woollacott, 1985 ; Sigmundsson *et al.*, 2000 ; Von Hofsten & Rösblad, 1988), permettant aux enfants à partir de 7 ans d'intégrer les afférences proprioceptives dans le fonctionnement des modèles internes de l'action. Molina *et al.* (2008) ont ainsi démontré qu'un renforcement des afférences proprioceptives permettait d'améliorer les capacités de simulation des conséquences proprioceptives dès 7 ans.

L'enfant commence donc à utiliser les informations proprioceptives à partir de 7 ans pour corriger le mouvement en cours de réalisation. Cette source proprioceptive ne peut cependant pas être traitée avec autant de précision que l'information visuelle (Chicoine *et al.*, 1992 ; Laszlo & Bairstow, 1984). A cet âge, les différents types d'afférences sensorielles sont toujours traitées de façon indépendantes, ce qui pourrait avoir comme principale conséquence,

d'augmenter la charge cognitive nécessaire pour traiter chaque source d'information séparément (Mayer & Moreno, 2003 ; Sweller *et al.*, 2011). Notamment, le retour visuel est toujours utilisé de façon prédominante pour corriger le mouvement en cours de réalisation. Les différentes sources d'informations sensorielles sont traitées de façon indépendantes jusqu'à 8-9 ans, âge auquel une bascule surviendrait entre une dépendance majoritaire aux informations visuelles vers un traitement multisensoriel des différentes sources d'informations traitées de façon optimale (Chicoine *et al.*, 1992 ; Gori *et al.*, 2008). Cette bascule dans l'intégration sensorielle à 8-9 ans permet une transition du contrôle de l'action reposant massivement sur des retours visuels traités indépendamment de la modalité proprioceptive, qui serait progressivement remplacé entre 8-9 ans et 10 ans par un contrôle prédictif multisensoriel de l'action reposant autant sur les informations visuelles que proprioceptives (Bard & Hay, 1983 ; Chicoine *et al.*, 1992 ; Contreras-Vidal, 2006 ; Ferrel-Chapus *et al.*, 2002 ; Gori *et al.*, 2008 ; Hay, 1978, 1979 ; Van Roon *et al.*, 2008 ; Von Hofsten & Rösblad, 1988). L'amélioration des capacités d'intégration de l'information visuelle et proprioceptive seraient ainsi à l'origine d'une amélioration considérable du contrôle prédictif de l'action à partir de 8-9 ans (Bard & Hay, 1983 ; Chicoine *et al.*, 1992 ; Contreras-Vidal, 2006 ; Ferrel-Chapus *et al.*, 2002 ; Hay, 1978 ; 1979 ; Molina *et al.*, 2008 ; Smits-Engelsman & Duysens, 2008 ; Von Hofsten & Rösblad, 1988).

L'intégration des afférences proprioceptives dans la prédiction sensorielle a notamment été mis en évidence dans les travaux sur l'imagerie motrice, en faisant varier le poids des informations proprioceptives (Gentili *et al.*, 2004 ; Papaxanthis *et al.*, 2002a, 2002b ; Slifkin, 2008). Guilbert, *et al.* (2016) ont étudié l'impact de la modification de l'afférence proprioceptive sur les capacités de simulation des enfants de 5 à 9 ans. En utilisant un cartable lesté à 5% du poids de l'enfant, les auteurs ont observé que la contrainte de poids impactait différemment les capacités de simulation de l'enfant en fonction de leur âge. Le poids supplémentaire diminuait la performance des enfants de 5 ans, qui présentent à cet âge des difficultés de traitement des informations proprioceptives. Cet effet négatif disparaissait à 7 ans, en raison de l'amélioration de l'intégration proprioceptive observée à cette période. Enfin, lorsque les enfants étaient en capacité d'intégrer autant les afférences proprioceptives que visuelles vers 9 ans, ils pouvaient bénéficier de cette modification de l'afférence proprioceptive. Cette étude montre que les capacités prédictives sont autant liées à l'utilisation croissante du retour proprioceptif qu'à son traitement optimal avec d'autres modalités.

II.2. Le développement des capacités de prédiction

Les capacités prédictives dépendent du traitement des informations sensorielles qui se développe tout au long de l'enfance et de l'adolescence et qui contraint la mise en œuvre des modèles internes de l'action (Caeyenberghs, Tsoupas, *et al.*, 2009 ; Caeyenberghs, Wilson, *et al.*, 2009 ; Choudhury *et al.*, 2007a, 2007b ; Guilbert *et al.*, 2013, 2018 ; Skoura *et al.*, 2009 ; Smits-Engelsman & Wilson, 2013). Comme nous l'évoquions précédemment, la créativité étant conçue comme un système prédictif incarné reposant sur les modèles internes de l'action, elle devrait être dépendante de l'évolution des capacités de prédiction sensorielle des enfants. Le développement du contrôle moteur prédictif et le recours croissant à son utilisation est une conséquence directe du développement de la capacité à utiliser et intégrer différentes sources d'afférences sensorielles, notamment visuelles et kinesthésiques, entre 5 et 10 ans (Bard & Hay, 1983 ; Chicoine *et al.*, 1992 ; Contreras-Vidal, 2006 ; Ferrel-Chapus *et al.*, 2002 ; Guilbert *et al.*, 2019 ; Van Roon *et al.*, 2008 ; Von Hofsten & Rosblad, 1988). Les capacités prédictives semblent ainsi se développer de 5 à 10 ans et s'articulent autour de 3 périodes distinctes. Tout d'abord, le contrôle prédictif serait déjà présent avant 7 ans, bien qu'immature. Ensuite, il nécessiterait une période de réaménagement entre 7 et 8 ans, avant d'arriver à maturité vers 9-10 ans (Hay, 1979 ; Martel *et al.*, 2020). Nous allons décrire ces trois périodes successivement.

Les capacités d'anticipation, antérieures à la prédiction et qui se différencient de celle-ci par l'absence de boucle de simulation, existent dès la naissance. En effet, des capacités précoces d'anticipation de l'action ont été observés chez les nouveau-nés de quelques semaines (Von Hofsten, 1980) qui avaient la capacité de produire des gestes d'atteinte manuelle orientée vers des objets. A quelques mois, les nourrissons ont la capacité d'anticiper des modifications de l'équilibre interne suite à la réalisation d'un mouvement, et d'adapter leur posture en conséquence (Jover & Mellier, 2005). Aux alentours de 9 mois, les très jeunes enfants sont en capacité d'ajuster de façon anticipée, l'ouverture de la main en fonction de la taille de l'objet (von Hofsten & Rönqvist, 1988). Ces mouvements observés dès la naissance suivent une programmation initiale sans aucune modification du mouvement en cours (Assaiante *et al.*, 2000), comme le montre l'absence d'utilisation des réafférences visuelles par des bébés âgés de 9 à 16 mois pour planifier ou corriger le mouvement en cours (Babinsky *et al.*, 2012b). Ces mouvements entièrement proactifs, ou balistiques, semblent s'observer jusqu'à l'âge de 7-8 ans (Assaiante *et al.*, 2000 ; Grasso *et al.*, 1998 ; Jover & Mellier, 2005 ; von Hofsten, 1980 ; von

Hofsten & Woollacot, 1989 ; Witherington *et al.*, 2002). En effet, les études chez l'enfant rapportent des données similaires, marquées par une absence d'utilisation de retour sensoriel pour modifier ou corriger le mouvement en cours de réalisation, qu'il soit visuel (Babinsky *et al.*, 2012b ; Bard & Hay, 1983) ou proprioceptif (Contreras-Vidal, 2006 ; Goble *et al.*, 2005 ; Hay *et al.*, 2005).

Pour résumer, les jeunes enfants réalisent des mouvements entièrement proactifs jusqu'à 7-8 ans (*i.e.* Grasso *et al.*, 1998), qui ne peuvent pas être modifiés pendant la réalisation de l'action. Autrement dit, jusqu'à l'âge de 7-8 ans, les enfants sont en capacité d'anticiper les conséquences sensorielles mais pas d'intégrer les retours sensoriels réels au sein du comparateur. Ce n'est qu'après cet âge clé que les enfants parviennent à intégrer les réafférences sensorielles pour modifier l'action en cours de réalisation, garantissant une utilisation plus efficace des modèles internes prédictifs utilisés dans la créativité. En effet, à partir de 7-8 ans, les enfants sont en capacité d'utiliser les afférences sensorielles pour corriger leurs mouvements. Ce changement à 7-8 ans se retrouve notamment dans les nombreuses études portant sur l'écriture manuscrite, qui ont montré une utilisation prédominante du retour sensoriel pour contrôler le geste d'écriture à 7-8 ans (Guilbert *et al.*, 2019 ; Vinter & Chartrel, 2010 ; Zesiger *et al.*, 2000), qu'il soit visuel (Chartrel & Vinter, 2006, 2008) ou proprioceptif (Meulenbroek & Van Galen, 1988).

Ce changement à 7-8 ans est annonciateur d'une période de réaménagement entre 7 et 10 ans qui assure une transition entre un contrôle moteur intégré à l'action en cours de réalisation et reposant entièrement sur le retour sensoriel, vers un mode de contrôle prédictif, basé sur l'exécution de programmes moteurs (Blöte & Hamstra-Bletz, 1991 ; Chartrel & Vinter, 2006, 2008 ; Guilbert *et al.*, 2019 ; Meulenbroek & Van Galen, 1988 ; Vinter & Chartrel, 2010 ; Zesiger *et al.*, 2000). A partir de 7-8 ans, la transition opérée pour privilégier le contrôle prédictif rend temporairement le contrôle de l'action en cours moins fiable (Martel *et al.*, 2020). L'amélioration du contrôle moteur prédictif après 7-8 ans se retrouve par exemple dans les études sur l'écriture manuscrite. Ces études ont notamment mis en avant que les programmes dédiés à la production des lettres sont stockés en mémoire pour être utilisés de manière prédictive (Zesiger *et al.*, 2000), utilisant le retour sensoriel uniquement dans le but de confirmer la bonne exécution du plan moteur préalablement sélectionné (Danna & Velay, 2015 ; Guilbert *et al.*, 2019 ; Palmis *et al.*, 2017).

Le contrôle moteur prédictif continue de se développer jusqu'à 9-10 ans où les enfants atteignent des performances qui se rapprochent progressivement de celles d'un l'adulte. En revanche, une période de réaménagement survient lors de l'adolescence, lié à une croissance accrue, principalement entre 10.5 et 16 ans chez les filles, et entre 13 et 18 ans chez les garçons (Rogol *et al.*, 2002). Cette période de transition entre l'enfance et l'âge adulte implique des changements morphologiques structurels et fonctionnels (Morris & Udry, 1980 ; Rogol *et al.*, 2002) qui modifient la représentation du corps et le contrôle moteur (Choudhury *et al.*, 2007a ; Viel *et al.*, 2009). Les informations proprioceptives, kinesthésiques, et tactiles (Cardinali *et al.*, 2009 ; Goodwin *et al.*, 1972 ; Massion, 1992 ; Roll *et al.*, 1991) serviraient à mettre à jour le schéma corporel de façon inconsciente, au travers des expériences sensorimotrices (Assaiante *et al.*, 2005 ; Miall & Wolpert, 1996 ; Wolpert & Ghahramani, 2000). Cependant, la période de forte croissance entraîne une désynchronisation du schéma corporel avec le corps, menant à une période de négligence des informations proprioceptives en favorisant temporairement l'utilisation des afférences visuelles (Assaiante, 2012 ; Mallau *et al.*, 2010 ; Viel *et al.*, 2009). La période adolescente est ainsi considérée comme une période de « négligence proprioceptive dans l'intégration sensorielle » (Viel *et al.* 2009, p. 25) ou une période de « déficit transitoire dans l'intégration [...] de l'information proprioceptive » (Cignetti *et al.*, 2013). Nous avons vu dans cette partie que le développement des capacités prédictives utilisées pour la créativité dépend du traitement de l'information sensorielle. Modifier l'afférence sensorielle, en entrée du système de prédiction, permet de moduler tout le processus des modèles internes. Comme nous l'expliquons au chapitre précédent, le processus créatif reposant sur les modèles internes, utiliserait de façon centrale les afférences sensorielles afin de générer des idées créatives. L'accès et le traitement des afférences sensorielles disponibles pendant une tâche créative pourrait moduler le processus créatif des enfants et des adolescents. L'outil tactile numérique permet de placer l'enfant dans des contextes offrant une variation de l'afférence sensorielle.

III - L'étude de l'intégration sensorielle chez l'enfant à partir des technologies interactives

La modification des afférences sensorielles au cours d'une tâche de créativité est rendue possible par l'utilisation d'outils. L'être humain utilise des outils pour réaliser de nouvelles créations depuis ~2.6 millions d'années (Plummer, 2004 ; Susman, 1991). Comme le rapportent Matheson et Kennett (2020), « la capacité de simuler les futures actions possibles et de les

sélectionner de façon dirigée par un but, soutient l'utilisation créative d'outils qui est centrale au comportement humain » (p. 15). Les régions motrices seraient également utilisées pour simuler les possibilités d'utilisation d'un objet (Cousijn *et al.*, 2014), ces régions étant identifiées dans le réseau d'utilisation d'outils (Gallivan *et al.*, 2013). Autrement dit, simuler des actions potentiellement réalisables avec des outils permettrait de les utiliser de façon créative (Matheson & Kennett, 2020). Les nouvelles technologies interactives, et notamment la tablette tactile numérique, offrent des possibilités particulièrement intéressantes pour étudier les afférences sensorielles à l'œuvre dans une tâche créative. A ce jour, les afférences sensorielles ont particulièrement été étudiées dans le contexte de l'écriture manuscrite. Il a notamment été rapporté que l'utilisation d'une tablette tactile au doigt et au stylet pouvait apporter une modification des afférences sensorielles en comparaison du papier.

Lorsque le corps agit directement sur la tablette tactile en utilisant directement le doigt plutôt qu'en utilisant un outil intermédiaire, l'expérience haptique se trouve enrichie en maximisant les afférences sensorielles, notamment tactilo-kinesthésiques. Cet enrichissement d'afférences a été exclusivement étudié chez le jeune enfant, comme dans l'étude de Patchan et Puranik (2016). Dans cette étude, les enfants âgés de 3 à 6 ans écrivaient davantage de lettres correctes après un apprentissage sur tablette tactile au doigt, en comparaison de l'apprentissage réalisé au stylet sur tablette ou au stylo sur papier. En revanche, aucune étude à notre connaissance n'a exploré les effets de l'utilisation au doigt de la tablette tactile chez l'enfant d'âge scolaire ou l'adolescent. Inversement, l'utilisation de la tablette tactile au stylet permet de diminuer les informations haptiques disponibles pendant la tâche. Patchan et Puranik (2016) ont montré que l'utilisation d'un stylet sur tablette tactile diminuait les retours haptiques dû à un effet glissant du stylet au contact de la tablette. Cet effet de réduction des afférences haptiques lié à l'utilisation du stylet sur tablette tactile se retrouve autant chez les enfants de 5-6 et 7-8 ans que chez l'adolescent de 14-15 ans ou les adultes de 19 à 24 ans, qui présentaient tous une diminution de la lisibilité des lettres écrites au stylet sur tablette en comparaison de celles écrites au crayon sur papier (Alamargot & Morin, 2015 ; Gerth *et al.* 2016).

Toutefois, bien que l'utilisation du stylet sur tablette tactile semble avoir des effets négatifs sur l'écriture, les enfants à partir de 7-8 ans sont en capacité de compenser la perte de retour proprioceptif induite par l'effet glissant du stylet sur la tablette tactile (Guilbert *et al.*, 2019). La compensation de cette perte serait rendue possible par le développement des capacités prédictives que nous avons décrites précédemment. En effet, alors que les plus jeunes semblent

totallement perturbés par l'utilisation du stylet sur tablette tactile, les enfants plus âgés parviennent à compenser la perte de feedback proprioceptif, en produisant des lettres plus grandes (amplification du mouvement) et en écrivant plus rapidement (augmentation de la vélocité). Alamargot et Morin (2015) ont par exemple montré que les enfants de 7-8 ans font davantage de pauses pendant leur mouvement, tandis que les enfants de 10-11 ans augmentent la pression sur le stylet et la vitesse du mouvement pour maximiser l'entrée proprioceptive. Ces stratégies de compensation reflètent les deux périodes charnières du développement des capacités prédictives à 7-8 et 10-11 ans, qui reposent sur un développement des capacités d'intégration sensorielles que nous avons décrit à la partie précédente (Alamargot & Morin, 2015 ; Guilbert *et al.*, 2019 ; Gerth *et al.*, 2016).

Les modifications des afférences proprioceptives consécutives à l'utilisation du doigt et du stylet utilisés sur tablette tactile est d'un intérêt particulier concernant l'étude de la créativité. En effet, les modèles internes permettraient de générer et d'évaluer des idées nouvelles dans un espace créatif, par un mécanisme d'essai-erreur (Dietrich & Haider, 2015). L'émulateur des modèles directs permettrait de générer différentes hypothèses pour atteindre le but prédictif envoyé par les modèles inverses, qui seraient ensuite comparées à ce but initial. La comparaison permettrait de générer une erreur prédictive, utilisée pour une nouvelle itération de la boucle, jusqu'à ce que l'idée générée soit suffisamment nouvelle et adaptée au contexte dans lequel elle se manifeste (Amabile, 1996 ; Barron, 1988 ; Lubart, 1994 ; MacKinnon, 1962 ; Ochse, 1990 ; Simonton, 2000 ; Sternberg, 1988 ; Sternberg & Lubart, 1991, 1995, 1996 ; Lubart, *et al.*, 2003, 2015). Le processus créatif ainsi défini reposerait donc nécessairement sur un système d'afférences sensorielles permettant de nourrir le processus prédictif. Les variations des afférences sensorielles lors de l'utilisation de l'interface tactile numérique au doigt ou au stylet permettraient ainsi de moduler la créativité de la production réalisée.

IV – Créativité et dessin sur tablette tactile

Quelques études ont exploré les effets que pouvaient avoir l'utilisation d'outils tactiles numériques sur la créativité, en se concentrant majoritairement sur les enfants d'âge préscolaire et scolaire (Fielding & Murcia, 2022). Celles-ci ont principalement établi que l'utilisation d'applications éducatives permettait de favoriser la créativité nécessaire aux apprentissages scolaires (Behnamnia *et al.*, 2020a, 2020b ; Marsh *et al.*, 2015, 2018, 2021), et que l'utilisation

de ces supports pouvait favoriser la créativité dans le dessin collaboratif d'enfants de 5-6 ans, en comparaison de l'utilisation d'un support papier (Sakr, 2018, 2019). Les tablettes tactiles utilisées dans une situation de jeu pourraient également favoriser l'exploration et la créativité (Yelland & Gilbert, 2018). Cet effet se retrouvait également chez des adolescents de 13-14 ans (Kim *et al.*, 2016). Dans cette étude, les participants devaient dessiner sur tablette tactile numérique ce qu'ils comprenaient de la leçon du jour, à partir d'un texte par exemple, afin de les communiquer auprès de leurs pairs. Les tests réalisés auprès des 262 adolescents ont rapporté que l'utilisation de cet outil pour dessiner et interagir avec les pairs en classe améliorerait la créativité des adolescents testés après un semestre d'utilisation de ce dispositif pédagogique. Ces études ont observé un effet bénéfique de l'utilisation du support tactile sur la créativité au travers de diverses activités collaboratives et éducatives, mais aucune étude, à notre connaissance, n'a spécifiquement étudié le rôle des afférences sensorielles dans l'interaction créative avec le support tactile numérique.

Afin d'explorer plus spécifiquement les effets de variations d'afférences sensorielles sur la créativité lors de l'utilisation de l'outil tactile numérique, l'activité de dessin nous semble pertinente pour évaluer la créativité d'enfants et adolescents. Celle-ci est en effet considérée comme un bon indicateur de créativité (Kosslyn *et al.*, 1977 ; Laszlo & Broderick, 1985 ; Olson & Bialystok, 1983). Quelques études ont exploré les effets d'utilisation de tablettes tactiles au doigt et au stylet lors d'activités de dessin d'objets ou de formes connues, ou encore lors de dessins libres. Ces études se sont principalement intéressées aux périodes préscolaire et scolaire, durant lesquelles l'utilisation de l'outil scripteur comme le stylo et le stylet n'est pas suffisamment maîtrisé.

Concernant l'utilisation du doigt sur tablette tactile, Lanna et Oro (2019) ont montré que l'interaction spontanée des enfants avec la tablette tactile pouvait commencer dès 2 ans. Ils étaient à cet âge en capacité d'adapter leurs gestes à l'interface pour dessiner au doigt. Price *et al.* (2015) ont rapporté des observations positives de l'utilisation du doigt sur tablette tactile pour le dessin créatif dès 2-3 ans. Ces auteurs rapportent par exemple que l'utilisation du doigt sur tablette tactile permet une interaction continue avec le support, ce qui nécessite moins d'effort que lors d'une interaction sur papier avec de la peinture sur le doigt. Price *et al.* (2015) ont ainsi conclu à un effet facilitateur de la tablette tactile pour la génération de traces graphiques lors de son utilisation au doigt. En revanche, avec des enfants âgés de 5-6 et 7-8 ans, Picard *et al.* (2014) ont observé des différences opposées entre l'utilisation d'un outil tactile

numérique au doigt et un support traditionnel papier-crayon sur la qualité des dessins produits. La qualité des dessins était définie par le nombre d'éléments de l'échelle de Barouillet *et al.* (1994) présents dans chaque dessin. Leurs résultats ont montré un effet facilitateur du crayon sur papier pour dessiner des maisons de meilleure qualité que celles dessinées sur tablette. L'utilisation du doigt sur tablette tactile à cet âge ne semble donc pas favoriser la réalisation d'un dessin le plus complet possible d'un objet qui existe. Pour Kirkorian *et al.* (2020), dessiner au doigt pourrait rendre plus difficile la production de détails fins et des angles pointus de certaines formes, et gêner l'utilisation d'informations visuelles pour guider le dessin.

Quelques études ont également exploré l'utilisation du stylet sur tablette tactile. Matthews et Seow (2007) ont par exemple démontré que l'utilisation d'un stylet sur tablette tactile était plus bénéfique que l'utilisation d'ordinateurs lors d'une activité de dessin avec des enfants de 2 à 11 ans, en permettant une plus grande expression des mouvements constituant le dessin, que les enfants ne pouvaient pas réaliser avec la souris de l'ordinateur. Plus particulièrement, les auteurs ont rapporté que la pression exercée sur le stylet permettait aux enfants d'être plus expressifs dans leur dessin en produisant des tirets, des points, des tâches, ce qu'ils ne faisaient pas avec l'utilisation d'une souris. Dans un contexte scolaire, Couse et Chen (2010) ont observé des jeunes enfants de 3 à 6 ans interagir avec une tablette tactile au stylet. Ils ont montré que l'utilisation de la tablette tactile avec un stylet pouvait être un outil intéressant pour promouvoir les arts graphiques et les compétences de dessin chez les jeunes enfants. Notamment, les enseignants qui devaient évaluer subjectivement la qualité et le détail des dessins produits par les enfants sur tablette au stylet en trois catégories (moins bon qu'habituellement, aussi bon qu'habituellement, mieux qu'habituellement) ont considéré que 66% des dessins étaient aussi bon qu'habituellement et 20% des dessins étaient mieux réalisés qu'habituellement.

A notre connaissance, une seule étude a comparé l'utilisation de crayon sur papier à l'utilisation du doigt et du stylet sur tablette tactile. Kirkorian *et al.* (2020) ont ainsi analysé la qualité de dessins produits par 73 enfants âgés de 2 à 5 ans et de 24 adultes, réalisés sur les trois supports. Les dessins consistaient en une copie de six figures géométriques, quatre familières (cercle, carré, triangle, croix) et deux nouvelles, inspirées de Braswell et Rosengren (2002). Les dessins étaient considérés comme cotable ou non cotable puis étaient jugés sur leur qualité selon une échelle de cotation subjective de 0 à 4 points inspirée de Braswell *et al.* (2007). Les dessins reconnaissables comme une forme mais ne correspondant pas à celle demandée étaient gratifiés

d'1 point, tandis que les dessins qui étaient proches du modèle présenté se voyaient attribuer 4 points. Les auteurs n'ont observé aucune différence entre les dessins réalisés sur tablette au stylet et sur papier au crayon ou au doigt sur tablette. En revanche, les résultats ont montré que les filles et les enfants les plus âgés réalisaient, dans l'ensemble, davantage de dessins cotables que les plus jeunes. Cet écart se réduisait concernant les dessins produits sur tablette tactile au doigt. Selon les auteurs, l'utilisation de la tablette tactile au doigt permettait d'aider les jeunes enfants en comparaison du crayon sur papier, à l'inverse des adultes pour qui la tablette tactile menait à davantage de difficultés. Les auteurs ont ainsi conclu à un effet facilitateur de la tablette tactile utilisée au doigt par les garçons et les enfants les plus jeunes, pour qui les compétences motrices ne seraient pas suffisamment développées pour contrôler un outil scripteur de façon optimale (Braswell & Rosengren, 2008 ; Kirkorian *et al.*, 2020). A la fin de la procédure, les enfants étaient amenés à choisir un des outils pour produire un dessin libre, permettant aux auteurs d'observer, pour chaque enfant, la préférence de l'outil à utiliser. Les résultats montrent que la majorité des enfants (79%) ont préféré utiliser la tablette tactile plutôt que le papier, avec une préférence pour l'utilisation du stylet (60%) plutôt que le doigt (Kirkorian *et al.*, 2020).

Toutes ces études montrent qu'utiliser une tablette tactile au doigt pour dessiner semble particulièrement bénéfique pour les enfants avant 6 ans, dont l'utilisation d'un outil scripteur n'est pas encore maîtrisé. En revanche, les dessins d'objets réels réalisés sur tablette au doigt par des enfants après 6 ans semblent être d'une moins bonne qualité que ceux réalisés au crayon sur papier (Picard *et al.*, 2014). Ce manque de qualité pourrait s'expliquer par la difficulté à produire des détails fins dans le dessin lorsque l'enfant utilise le doigt (Kirkorian *et al.*, 2020). Ces études se sont concentrées exclusivement sur la qualité ou la richesse de dessins d'éléments existants mais n'ont pas exploré les effets de l'utilisation de supports tactiles sur des dessins d'objets qui n'existent pas, c'est-à-dire sur la créativité des dessins, qui pourrait être modulée par une modification d'afférences sensorielles permise par l'utilisation du doigt ou du stylet. En effet, modifier l'afférence sensorielle, en entrée du système de prédiction, permet de moduler tout le processus des modèles internes. Comme nous l'expliquions au début de ce chapitre, le processus créatif reposant sur les modèles internes, utilise de façon centrale les afférences sensorielles afin de générer des idées créatives. La créativité exprimée lors d'une tâche graphique devrait ainsi dépendre des afférences sensorielles traitées pendant cette tâche.

Résumé du chapitre :

La créativité, reposant sur un système d'afférences et d'efférences sensorielles, peut être considérée comme un processus de la cognition incarnée (*e.g.* Murali & Händel, 2022), comme le suggèrent également de nombreuses études en neuroimagerie faisant état de l'utilisation des régions sensorielles dans le processus créatif (*e.g.* Matheson & Kennett, 2020). Ces études ont notamment proposé de voir l'intégration sensorielle comme un élément central à la génération des idées créatives (*e.g.* Kenett *et al.*, 2018 ; Matheson *et al.*, 2017). En tant que processus incarné, l'étude de cette conception de la créativité chez l'enfant implique une prise en compte de l'évolution des capacités d'intégration et de prédiction sensorielles. L'évolution des capacités d'intégration sensorielle au cours du développement détermine la capacité d'utilisation du système prédictif tout au long de l'enfance et l'adolescence (*e.g.* Smits-Engelsman & Wilson, 2013). Cet effet développemental se retrouve dans les études portant sur l'écriture manuscrite qui ont étudié les effets que pouvaient apporter l'utilisation du doigt ou du stylet sur tablette tactile. Premièrement, ces études soulignent un effet renforçateur de l'apprentissage de l'écriture au doigt sur tablette consécutif à une plus grande mobilisation d'afférences proprioceptives (*e.g.* Patchan & Puranik, 2016). Secondement, l'utilisation du stylet semble réduire les afférences sensorielles disponibles, altérant l'écriture des enfants avant 7-8 ans, n'ayant pas encore suffisamment développé leurs capacités prédictives (*e.g.* Alamargot & Morin, 2015), tandis que les enfants après 8 ans parviennent à compenser cette perte de retour sensoriel par une utilisation de l'outil majoritairement prédictive (Guilbert *et al.*, 2019). Lorsque les enfants sont amenés à utiliser ces outils pour dessiner, des effets mitigés sont retrouvés. Notamment, les dessins produits au stylet semblent soit être mieux réalisés qu'au stylo sur papier (*e.g.* Couse & Chen, 2010), soit ne pas apporter de différence avec le stylo sur papier (*e.g.* Kirkorian *et al.*, 2020). L'utilisation de la tablette tactile semble cependant apporter des bénéfices lorsque le dessin est réalisé au doigt, plus particulièrement pour les plus jeunes (*e.g.* Kirkorian *et al.*, 2020). En revanche, cette utilisation de la tablette au doigt pourrait également réduire la qualité des dessins produits, et notamment empêcher la réalisation de détails fins et l'utilisation d'afférences visuelles (*e.g.* Picard *et al.*, 2014 ; Kirkorian *et al.*, 2020).

CHAPITRE 6 – SYNTHÈSE, PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE THÈSE

I – Synthèse de la revue de littérature et objectifs de thèse

Dans cette thèse, nous interrogeons les liens entre créativité et sensorimotricité. La revue de littérature que nous avons menée rapporte que la créativité peut être conçue comme un processus incarné dans un système de prédiction sensorimotrice, issu des modèles internes internes de l'action mis en œuvre dans le cadre du contrôle de l'action (Dietrich & Haider, 2015). Selon Dietrich et Haider (2015), le processus de créativité reposerait sur un système de sélection *a priori* (modèle inverse) qui permettrait de générer une idée créative, permettant de guider le système de variation (modèle direct) pour faire varier les différentes façons d'atteindre la réalisation de cette idée. L'idée finalement sélectionnée pour être mise en œuvre *a posteriori* serait celle qui présente la plus grande adéquation entre l'idée générée *a priori* et la façon de la réaliser. Cette analogie entre créativité et modèles internes du contrôle de l'action sensorimotrice nous mène à suggérer que les afférences sensorielles au cœur des modèles internes du contrôle de l'action, pourraient être un élément constitutif du processus créatif.

Nous envisageons l'étude des liens entre créativité et sensorimotricité chez l'enfant et l'adolescent. Etudier cette population implique de prendre en compte l'évolution des capacités de traitement sensoriel et prédictif tout au long de l'enfance et de l'adolescence. La revue de littérature a permis de mettre en avant des étapes clés de ce développement. En effet, à partir de 7 ans, bien que l'information visuelle reste majoritaire pour le contrôle de l'action, les enfants sont en capacité d'intégrer les afférences proprioceptives dans le fonctionnement des modèles internes de l'action. A partir de 8-9 ans, une bascule interviendrait, allant d'une dépendance majoritaire aux informations visuelles vers un contrôle multisensoriel de l'action. Ce traitement multisensoriel permet à l'enfant de se reposer autant sur des informations visuelles que proprioceptives.

Afin d'explorer les liens entre créativité et sensorimotricité chez l'enfant et l'adolescent, l'utilisation de l'outil tactile numérique semble particulièrement appropriée. Cet outil permet de faire varier les afférences sensorielles lors d'une tâche en utilisant le doigt ou le stylet sur l'interface, impliquant des gains ou des pertes d'informations sensorielles. Plus précisément, utiliser le doigt sur l'interface semble maximiser les informations haptiques lors d'une tâche, tandis que l'utilisation du stylet amènerait à une perte d'informations proprioceptives. La perte d'information sensorielle consécutive à l'utilisation du stylet semble particulièrement perturber les enfants avant 8-9 ans dans une tâche d'écriture, car ils ne sont pas encore en capacité de

compenser la perte de retour sensoriel induite par cet outil. A l'inverse, ils sont en capacité de compenser une perte de retour sensoriel à partir de 8-9 ans par une exagération des mouvements permettant de maximiser l'entrée sensorielle.

Sur la base de ces observations, notre travail de thèse avait un double objectif :

- Tout d'abord, cette thèse avait un objectif expérimental visant à découvrir le rôle que peuvent jouer les afférences sensorielles dans le processus créatif.
- Ensuite, cette thèse avait pour second objectif de déterminer, pour la pratique professionnelle, si la tablette tactile numérique peut apporter des bénéfices pour aider les enfants et adolescents typiques mais également présentant des difficultés dans la mobilisation de leurs capacités cognitives.

II – Problématique et hypothèses

Ce travail de thèse vise à déterminer dans quelle mesure les afférences sensorielles peuvent moduler la créativité des enfants et adolescents. Dans ce travail de thèse, nous dressons l'hypothèse générale selon laquelle les afférences sensorielles seraient un élément constitutif du processus créatif.

Cette hypothèse se base sur le modèle de Dietrich et Haider (2015) selon lequel la créativité reposerait sur un processus itératif d'essai-erreur enraciné dans un système de contrôle sensorimoteur. Selon cette analogie, la génération d'une idée créative pourrait être définie comme une prédiction d'un but à atteindre dans un système explicite, suivi d'une émulation implicite de plans moteurs pour atteindre cette idée. Le système de contrôle moteur utilisant de façon centrale les afférences sensorielles pour contrôler l'action réalisée ou imaginée au travers d'un ensemble d'afférences sensorielles réelles et prédites, nous suggérons que les afférences sensorielles auront un rôle important dans le processus de créativité.

Nous avançons l'hypothèse que la modification des afférences sensorielles consécutives à l'utilisation de l'interface tactile numérique devrait moduler la créativité. Pour valider cette

hypothèse, nous demanderons à des participants de produire des dessins originaux sur support tactile numérique, permettant de faire varier les afférences sensorielles par l'utilisation du doigt.

Si cette hypothèse est correcte, alors nous nous attendons à ce que les scores d'originalité des dessins produits sur tablette tactile au doigt soient supérieurs à ceux produits au stylo sur papier.

Interroger le rôle des afférences sensorielles dans la créativité pour l'enfant et l'adolescent nécessite de prendre en considération le développement des capacités de traitement de l'information sensorielle qui sous-tendent les capacités de prédictions sensorimotrices. Bien que les enfants soient en capacité de prendre en compte l'information proprioceptive dès 6-7 ans, l'intégration sensorielle ne devient optimale qu'à partir de 8 ans. Les enfants avant cet âge ne sont pas en capacité de compenser une perte d'informations proprioceptives.

Ainsi, nous faisons l'hypothèse que l'originalité des dessins produits par les enfants et adolescents sera modulée par le développement des capacités de traitement de l'information sensorielle, dont dépendent les processus prédictifs.

Si cette hypothèse est correcte nous nous attendons à ce que l'augmentation des afférences sensorielles au doigt sur tablette tactile apporte des bénéfices sur l'originalité exprimée à tout âge. Nous nous attendons à ce que des bénéfices similaires soient observés au stylet à partir de 8 ans, âge à partir duquel les enfants sont en capacité de compenser la perte de retour sensoriel lié à l'utilisation du stylet.

De plus, les afférences sensorielles utilisées dans le contrôle de l'action permettent de se sentir à l'origine de ses propres actions par une comparaison de la prédiction initiale avec le résultat final de l'action réalisée. Une modification d'afférences sensorielles pourrait ainsi permettre non seulement de modifier le processus créatif, mais également de renforcer le sentiment de contrôle de l'action sur la situation proposée.

Nous faisons l'hypothèse que des adolescents présentant des troubles du comportement qui perturbent la mobilisation optimale de leur pensée, pourraient bénéficier de l'utilisation d'outils tactile numériques lors d'une tâche de créativité, en augmentant le sentiment de contrôle de l'action par une modification des afférences sensorielles.

Si cette hypothèse est correcte, alors nous nous attendons à ce que les adolescents présentant des troubles du comportement bénéficient autant que les enfants et adolescents typiques des effets du support numérique dans leur production créative. Nous nous attendons également à ce qu'ils expriment une préférence pour l'utilisation du support tactile, notamment lorsque les afférences sensorielles sont renforcées, en comparaison d'un outil traditionnel papier.

Nous déclinons ces hypothèses générales en plusieurs hypothèses de travail :

- L'interface tactile numérique utilisée au doigt permettra d'améliorer la créativité des productions graphiques d'enfants d'âge scolaire (Chapitre 8).
- Des résultats similaires se retrouveront chez des adolescents, pour qui l'utilisation de la tablette tactile au doigt et au stylet sera plus bénéfique que le crayon sur papier (Chapitre 9).
- Les bénéfices de l'utilisation du doigt sur tablette tactile se retrouveront de l'enfance à l'adolescence, tandis que les bénéfices liés à l'utilisation du stylet ne se retrouveront qu'à partir de 8 ans, lorsque les enfants sont en capacité de compenser la perte de retour sensoriel (Chapitre 10).
- Les adolescents présentant des troubles du comportement, qui altèrent le sentiment de contrôle de l'action, pourront également bénéficier des apports de la tablette tactile sur la créativité pour mobiliser plus efficacement leur pensée. Ces adolescents exprimeront une préférence pour ce type de support qui devrait soutenir le contrôle de l'action (Chapitre 11).

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE 7 – METHODOLOGIE GENERALE

Dans ce chapitre, nous présenterons la méthodologie générale utilisée pour l'ensemble des travaux expérimentaux. Les études expérimentales seront présentées sous la forme de 3 articles de recherche publiés suivi d'une étude complémentaire en cours de soumission. La méthodologie de recherche spécifique à chaque étude est décrite dans chacun des articles. Nous présenterons dans ce chapitre, les éléments méthodologiques communs aux différentes études.

I - Participants

Les participants ($n = 138$) des études ont été recrutés dans des écoles et des Instituts Thérapeutiques, Educatifs et Pédagogiques (ITEP) localisés en Normandie. Un total de 35 enfants en classe de CP, 36 enfants en classe de CE2, 18 adolescents en 6^e et 35 adolescents en 4^e ont été recrutés dans l'école élémentaire de Bretteville l'Orgueilleuse (étude 1 à 3) et les collèges Bucaille-Charcot à Cherbourg (étude 2) et Léopold Sédhar Sengor à Iffs (étude 3). Des adolescents présentant des troubles du comportement ($n = 31$, étude 4) ont été recrutés au sein de deux ITEP de l'Association pour l'Aide aux Adultes et aux Jeunes en Difficulté (AAJD) situés à Agneaux et à Querqueville, ainsi que l'ITEP de l'Association des Amis de Jean Bosco (AAJB) situé à Baron sur Odon.

Chaque participant était recruté sur la base du volontariat avec un accord écrit du représentant légal, de l'Académie de Caen, et de chaque établissement. Le recueil des données a été réalisé suivant une convention entre le Laboratoire de Psychologie de Caen Normandie (LPCN), l'Académie de Caen, et de chaque établissement scolaire et spécialisé.

II - Matériel

Pour la première étude, les dessins numériques étaient réalisés sur une tablette de type C>Display by Haier™, modèle E701, avec un Ecran IPS 7" à multipoints, d'une capacité de résolution de 1024x600 pixels. Les dessins étaient exécutés à l'aide du logiciel Hand Drawing V0.4b5 by IK0JRE. Ce logiciel de dessin, gratuit sur le Play Store Android, présentait une surface blanche avec la seule possibilité de tracer un trait noir. Il n'était pas possible de choisir la largeur du trait, ni de l'effacer. Dans cette première étude, les dessins sur papier étaient réalisés uniquement au stylo bic noir, sans possibilité de gommer le tracé, sur des feuilles de papier de taille similaire à celui de l'écran de la tablette (155 x 87 mm).

Concernant les études 2 à 4, les dessins ont tous été réalisés sur une tablette tactile Microsoft Surface Pro 4, avec un écran de 12.3" et une capacité de résolution de 2736 x 1824 6 px. Les dessins au stylet étaient réalisés avec un Microsoft Surface Pen, mesurant 144 x 9.5 x 10.2 mm. Tous les dessins étaient réalisés sur une application développée par le Laboratoire de Psychologie de Caen Normandie (LPCN EA 7452), présentant une surface blanche sur laquelle l'enfant pouvait dessiner au doigt ou au stylet. L'application permettait de dessiner à l'aide d'un

trait noir uniquement, sans possibilité de modifier la largeur du trait. Aucune fonction d'effacement n'était implémentée dans l'application. Les dessins sur papier étaient réalisés sur des feuilles de la même taille que l'écran tactile (260 x 175 mm) et uniquement au stylo bic noir, sans possibilité d'effacer.

III - Inclusion et exclusion

Pour chaque étude, les critères d'exclusion étaient définis selon la faisabilité de la tâche, comme un lourd déficit visuel identifié (*i.e.* cécité) ou un lourd déficit moteur (*i.e.* faiblesse excessive, paralysie), qui empêcherait le participant de compléter la tâche correctement. Les participants recrutés dans les établissements scolaires ne devaient faire l'objet d'aucun suivi médical ou paramédical connu.

Dans les études 3 et 4, les participants devaient compléter la tâche de précision visuo-motrice de la NEPSY-II (Korkman *et al.*, 2014), permettant de mesurer la vitesse graphomotrice et la précision de chaque enfant lors d'une tâche graphique. Dans cette tâche, le participant est amené à réaliser un tracé entre deux lignes le plus rapidement et précisément possible. Le nombre d'erreurs et le temps de réalisation sont enregistrés pour calculer un score de précision visuomotrice. Plus le score est faible, plus le niveau de précision visuomotrice est élevé.

Dans l'étude 4, des critères d'inclusion supplémentaires étaient définis pour le recrutement des adolescents présentant des troubles du comportement. Tout d'abord, les participants devaient compléter une batterie complète du WISC (version IV ou V) entre une et deux semaines avant la passation expérimentale afin d'exclure de l'étude, chaque adolescent présentant une déficience intellectuelle. Ensuite, le jour de la passation expérimentale et avant celle-ci, les participants étaient amenés à réaliser la tâche de compréhension de consignes de la NEPSY-II (Korkman *et al.*, 2014). Ce subtest a été spécifiquement développé pour évaluer la capacité à recevoir, traiter, et exécuter des consignes verbales. A chaque consigne donnée par l'expérimentateur, le participant devait pointer le stimulus approprié, menant à un score total de compréhension de consignes. Ce test permettait de nous assurer que les adolescents étaient en capacité de comprendre les consignes et questions qui allaient leur être transmises pour la passation.

Dans chacun de ces tests, chaque participant en dehors de 2 écart-types de la moyenne standardisé de leur groupe d'âge était exclu de la passation expérimentale, contrôlant un potentiel déficit de précision visuomotrice qui pourrait affecter la tâche de dessin.

IV - Tâche de contrôle

A partir de l'étude 3, chaque participant devait réaliser une tâche fonctionnelle évaluant la maîtrise d'utilisation d'une tablette tactile numérique. Plus précisément, cette tâche permettait de contrôler la connaissance des mouvements principaux nécessaires à l'interaction avec une tablette tactile, référencés dans le guide de Villamor, Willis, et Wroblewski (2010). Les participants étaient amenés à réaliser 8 mouvements principaux inspirés de ce guide, sur Instagram utilisé hors connexion. Si l'enfant ou l'adolescent se retrouvait en difficulté pour une des consignes présentées, l'expérimentateur pouvait apporter son aide en verbalisant le mouvement nécessaire pour accomplir l'action visé (e.g. « pour ouvrir l'application, tu dois appuyer deux fois dessus »). Le Tableau 1 résume le descriptif détaillé de chaque consigne et mouvement visé.

Tableau 1. Description des consignes de la tâche fonctionnelle et leur correspondance avec le guide de référence.

Consigne	Mouvement cible du guide de Villamor, Willis et Wroblewski (2010)
Déplacer l'icône Instagram	Press & Drag
Démarrer Instagram	Double tap
Prendre une photo et ajouter un smiley	Single tap
Agrandir le smiley	Spread
Le rétrécir	Pinch
Le déplacer	Tap & Drag
Le retourner	Rotate
Tourner la page des smileys pour voir ceux utilisés récemment	Flick

V - Procédure

Chaque enfant ou adolescent était rencontré individuellement dans sa classe (étude 1) ou dans une pièce calme de l'école ou de l'établissement spécialisé (études 2 à 4). Dans la première étude, le contexte ne nous permettant pas d'avoir une pièce au calme, l'expérimentation s'est déroulée autour d'une table placée au fond de la classe pendant que le professeur faisait cours aux autres élèves. Dans tous les cas, l'enfant était assis sur une chaise face à une table sur laquelle était placée la tablette tactile ou une feuille de papier.

Il était demandé à chaque participant de produire des dessins originaux et non originaux d'une maison (étude 2) ou d'un bonhomme (études 1, 3, et 4), avec chaque outil présenté (selon l'étude, doigt sur tablette, stylet sur tablette, stylo sur papier). Les dessins étaient réalisés suivant la procédure décrite par Karmiloff-Smith (1990) utilisée initialement avec un crayon sur papier. Il était ainsi demandé aux enfants et adolescents de « dessiner un X qui existe » puis de « dessiner un X qui n'existe pas », X faisant référence au sujet choisi pour chaque étude (*i.e.* une maison ou un bonhomme). La durée de la tâche de dessin était libre, les participants décidaient eux-mêmes lorsque chaque dessin était terminé. Dès qu'un dessin était produit, il était retiré de la table d'expérimentation avant la réalisation du suivant. L'expérimentateur restait disponible aux côtés du participant pendant toute la durée de l'expérimentation pour l'aider à comprendre la tâche si nécessaire. L'ordre de présentation de la consigne et du support étaient systématiquement contrebalancés pour chaque participant dans chaque étude.

VI - Cotation de l'originalité des dessins

Afin d'attribuer un score d'originalité à chaque dessin, nous avons développé une échelle de cotation de l'originalité des dessins, se reposant sur les cotations de dessin proposées par Karmiloff-Smith (1990). La logique de l'échelle était de considérer comme étant original, chaque modification apportée sur le dessin original (*i.e.* « un bonhomme qui n'existe pas ») en comparaison du dessin non original (*i.e.* « un bonhomme qui existe ») produit par le même enfant. Ainsi, des points étaient attribués aux items repérés sur la production originale dès lors que la caractéristique graphique en question était différente de celle observée sur la version de dessin non originale. Seule l'étude 2, qui avait pour sujet le dessin de la maison, comparait les

productions originales à un dessin prototypique de la maison (voir Chapitre 9 pour une description détaillée de la cotation de la maison originale).

Plusieurs types de changements étaient considérés pour le codage du bonhomme original. Karmiloff-Smith (1990) rapportait 7 catégories de changements observés pour le dessin qui n'existe pas en comparaison du dessin qui existe :

- L'addition ou suppression d'éléments (*e.g.* 2 têtes au lieu d'une seule, la suppression des bras), codé dans notre échelle comme l'addition ou la suppression d'éléments qui étaient déjà présents dans le dessin d'un bonhomme qui existe ;
- La modification opérée sur la forme des éléments (*e.g.* une tête triangulaire au lieu d'une tête ronde) ;
- La modification opérée sur la taille des éléments (*e.g.* une tête deux fois plus grande que le tronc) ;
- L'insertion de nouveaux éléments (*e.g.* des ailes ajoutées au tronc), faisant référence à l'insertion de quelque chose qui n'était pas dessiné sur le dessin d'un bonhomme qui existe ;
- Modifications de position, d'orientation, et de perspective des éléments ou du dessin dans sa globalité (*e.g.* les yeux et la bouche inversés) ;
- Modifications inter-conceptuelles du dessin dans sa globalité (*e.g.* un bonhomme en forme d'animal) ;
- Modifications opérées sur la forme générale du dessin, dans sa globalité (*e.g.* un bonhomme en forme de triangle).

Ces 7 catégories de modifications considéraient à la fois des modifications opérées sur la globalité du dessin et des modifications plus locales, opérés sur des éléments du dessin. Les éléments locaux du dessin étaient définis par les 15 éléments constitutifs du dessin du bonhomme présents dans l'échelle du dessin du bonhomme de Goodenough (1926). Cette échelle considère la tête, les yeux, le nez, la bouche, les narines, les oreilles, les cheveux, le cou, le tronc, les bras, les mains, les doigts, les jambes, et les pieds. L'échelle de Goodenough (1926) ne mentionnait cependant pas la présence des dents, que nous avons ajouté à notre échelle de cotation puisque les participants étaient susceptibles d'utiliser cette partie du dessin de façon originale.

Pour chaque modification repérée sur les éléments, l'expérimentateur attribuait 0.5 point. Chaque modification sur la globalité du dessin était créditée de 1 point, soit le double des points

attribués sur les modifications locales. La seule exception à cette règle concernait l'item « position, orientation et perspective » qui pouvait se voir attribuer jusqu'à 1.5 point seulement, puisque la modification pouvait concerner à la fois des éléments globaux et locaux. En revanche, une modification locale de position n'était créditée que de 0.5 point bien que deux éléments locaux puissent être concernés. Par exemple, échanger la bouche avec un œil implique un changement de position des deux items qui résulterait en une multiplication de points pour une même modification locale. La modification locale de cet item spécifique n'est donc créditée que de 0.5 point, peu importe le nombre d'éléments concernés.

L'addition de chaque point obtenu pour chaque modification locale et globale opérée entre le dessin original et non original produit par le même participant permettait d'aboutir à un score d'originalité. Le score d'originalité calculé sur la base d'une différence entre une production originale et non originale d'un même participant, était conforme à la définition de l'originalité décrite comme la capacité à évaluer et sélectionner une idée nouvelle parmi d'autres, en fonction des connaissances propres à chaque individu (Lubart & Georgsdottir, 2004 ; Runco, 1991).

Le descriptif de l'échelle de cotation de l'originalité du bonhomme décrite et utilisée pour les études 3 à 4 est résumé dans le Tableau II. Toutefois, quelques différences peuvent être observées avec l'échelle de cotation utilisée pour l'étude 1 qui constituait une première étude exploratoire, à partir de laquelle l'échelle a pu être améliorée. L'échelle utilisée lors de la première étude ne prenait en compte que 12 items locaux (le visage, les yeux, le nez, les oreilles, la bouche, les dents, les cheveux, les bras, les mains, les pieds, le buste, et les jambes) sur les 15 items établis sur la grille finale. De plus, les catégories de modifications ne visaient pas à évaluer tous les items. Par exemple, des modifications de la taille étaient évalués seulement sur des éléments constitutifs du dessin comme visage, les bras, le buste, et les jambes, mais n'étaient pas évalués sur les éléments de détail comme les yeux ou les oreilles. L'échelle utilisée pour la première étude (Chapitre 8, Annexe I) repérait moins de possibilités de changements que celle établie pour les études 3 et 4, pouvant mener à un score d'originalité jusqu'à 18 points au lieu de 33.5.

Tableau 2. Echelle de cotation du bonhomme original

Type de modification graphique	Description	Niveau de modification	Points attribués (min-max)
Addition/suppression	Eléments du dessin du bonhomme qui existe (tête, yeux, nez, bouche, narines, dents, oreilles, cheveux, cou, tronc, bras, mains, doigts, jambes, pieds) additionnés ou supprimés	Eléments locaux	0 – 7.5
Forme des éléments	Eléments du dessin (tête, yeux, nez, bouche, narines, dents, oreilles, cheveux, cou, tronc, bras, mains, doigts, jambes, pieds) dont la forme était différente du dessin du bonhomme qui existe	Eléments locaux	0 – 7.5
Taille des éléments	Eléments du dessin (tête, yeux, nez, bouche, narines, dents, oreilles, cheveux, cou, tronc, bras, mains, doigts, jambes, pieds) dont la taille était différente du dessin du bonhomme qui existe	Eléments locaux	0 – 7.5
Insertion des éléments	Nouveaux éléments (tête, yeux, nez, bouche, narines, dents, oreilles, cheveux, cou, tronc, bras, mains, doigts, jambes, pieds) qui n'étaient pas présents dans le dessin du bonhomme qui existe	Eléments locaux	0 – 7.5
Position, orientation, et perspective	Eléments (tête, yeux, nez, bouche, narines, dents, oreilles, cheveux, cou, tronc, bras, mains, doigts, jambes, pieds) et/ou la globalité du dessin dont la position, l'orientation, ou la perspective était différente du dessin du bonhomme qui existe	Eléments locaux et globalité	0 – 1.5
Catégories conceptuelles	La globalité du dessin présentait des insertions d'autres catégories conceptuelles (arbre, animal, ordinateur, ...)	Globalité	0 – 1
Forme générale	Dessins dont la forme globale était différente de celle observée sur le dessin du bonhomme qui existe	Globalité	0 – 1
TOTAL			0 – 33.5

CHAPITRE 8 – LE DESSIN CRÉATIF AU DOIGT SUR TABLETTE TACTILE À L'ÂGE SCOLAIRE

Cette première étude exploratoire avait pour objectif de déterminer si la tablette tactile utilisée au doigt pouvait permettre d'améliorer l'originalité des dessins d'enfants de 6-7 ans et de 8-9 ans. Cette question était posée à une période relatée comme étant une période de chute de la créativité (*i.e.* l'entrée en CP à 6-7 ans) en comparaison d'une période de croissance de la créativité (*i.e.* en CE2 à 8-9 ans). Cette étude a également permis l'élaboration d'un nouvel outil de mesure de l'originalité des dessins.

Les apports de l'interface tactile numérique dans l'expression créative graphique : une étude exploratoire chez des enfants d'âge scolaire

Fabien Bitu

Université de Caen Normandie

Laboratoire de Psychologie Caen Normandie, EA7452

fabien.bitu@unicaen.fr

François Jouen

Université de Recherche Paris Sciences et Lettres (PSL)

Ecole Pratique des Hautes Etudes

Laboratoire Cognitions Humaine et Artificielle (CHArt) EA 4004, FED 4246

Michèle Molina

Université de Caen Normandie

Laboratoire de Psychologie Caen Normandie, EA7452

Note de l'auteur

Fabien Bitu, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4507-042X>

Cet article a été accepté pour publication dans *Enfance* le 03 Juin 2019. Il est disponible sous le format éditeur à cette adresse : <https://doi.org/10.3917/enf2.193.0357>.

Auteur correspondant : Fabien Bitu, Université de Caen Normandie, UNICAEN, Laboratoire de Psychologie Caen Normandie (LPCN, EA 7452), Esplanade de la Paix, 14032 CAEN cedex 5 – France. Email: fabien.bitu@unicaen.fr.

Pour citer cet article : Bitu, F., Jouen, F., & Molina, M. (2019). Les apports de l'interface tactile numérique dans l'expression créative graphique: une étude exploratoire chez des enfants d'âge scolaire. *Enfance*, (3), 357-373.

Résumé

L'objectif de la présente étude est d'évaluer si les interfaces tactiles numériques peuvent favoriser l'expression de la créativité graphique. Cette question est posée à deux périodes du développement de la créativité : en classe de CP, où la créativité des enfants connaît un déclin, et en classe de CE2 où, au contraire, elle connaît un regain d'activité (Torrance, 1968). En s'inspirant du paradigme proposé par Karmiloff-Smith (1990), 21 enfants de CP et 14 enfants de CE2 ont eu pour tâche de dessiner un « bonhomme qui existe » (dessin non créatif) et « un bonhomme qui n'existe pas » (dessin créatif). Ces dessins étaient réalisés par tous les enfants au doigt sur une tablette tactile numérique et au stylo sur une feuille de papier. La comparaison des dessins créatifs à des dessins non créatifs révèle que, si les enfants de CE2 produisent des dessins plus créatifs que ceux de CP, tous les enfants obtiennent de meilleurs scores de créativité graphique lorsqu'ils dessinent sur un support numérique que sur un support papier. Ce résultat est interprété au regard des théories de la cognition incarnée et située, selon lesquelles les fonctionnalités particulières de l'interface numérique tactile induisent un rehaussement du système d'afférences et d'efférences tactilo-kinesthésiques qui potentialise la créativité de l'enfant.

Mots clés : enfants, interfaces tactiles numériques, créativité graphique

Summary

The aim of this study was to evaluate whether digital touchscreen devices could promote children's graphical creativity. A drawing task based on the seminal work of Karmiloff-Smith's paradigm (1990), was proposed to 21 first grade children and 14 third grade children. Children had to draw a "man that exists" (non-creative drawing) and "a man that does not exist" (creative drawing). These drawings were realized with finger on a digital touchscreen and with a pen on paper sheet. Comparisons between creative drawings and non-creative drawings reveal that, although third grade children produce more creative drawings than first grade children, all children produced more creative drawings when they draw on a digital touchscreen support than when they draw on paper sheet support. This result is discussed according to theories of embodied and situated cognition.

Key words : children, digital touchscreen devices, drawing creativity

I. Introduction

Les enfants des sociétés occidentales grandissent immergés dans des environnements technologiques numériques. Les dispositifs à écran tactile tels que les smartphones ou les tablettes tactiles sont parmi les plus utilisés par les jeunes populations. Dubé et McEwen (2015) définissent les écrans tactiles comme « des dispositifs électroniques présentant un écran visuel contrôlé par des gestes et des actions tactiles exécutées à l'aide de doigts ou d'un stylet ». Les écrans tactiles offrent ainsi à l'utilisateur un feedback instantané de ses actions, ce qui en fait un outil facile d'utilisation, particulièrement attirant pour les jeunes enfants (Cooper, 2005 ; McManis et Gunnewig, 2012 ; Geist, 2012 ; Piotrowski et Meester, 2018 ; Sakr, 2018). Toutefois, l'attrait majeur de ces dispositifs tactiles réside principalement dans leur utilisation intuitive. En effet, l'exécution des actions physiques nécessaires pour interagir avec eux ne demande qu'un minimum d'instructions formelles accessibles aux plus jeunes enfants, pouvant alors interagir directement avec leurs mains, par de simples gestes, sans passer par un outil médiateur tel que le crayon (Dubé et McEwen, 2015 ; McManis et Gunnewig, 2012). Ce media interactif présente comme autre intérêt d'engager les enfants dans une stimulation multimodale visuelle, tactilo-kinesthésique et proprioceptive qui maintient plus efficacement leur attention (Roskos, Burstein, Shang et Gray, 2014).

Cette facilité d'utilisation fait des interfaces tactiles numériques, des outils d'apprentissage potentiellement intéressants. Il apparaît que l'utilisation précoce des interfaces tactiles numériques à la maison favorise l'émergence de la littératie chez les enfants d'âge préscolaire (Hillman et Marshall, 2009 ; Hisrich et Blanchard, 2009; McManis et Gunnewig, 2012; Van der Kooy-Hofland, Kegel et Bus, 2011). Neumann (2016) a montré que les enfants âgés de 2 à 4 ans qui utilisent régulièrement une tablette à la maison pour écrire ont une conscience de l'écrit plus élevée et une meilleure connaissance des lettres et des sons que les enfants qui les

utilisent moins fréquemment. Neumann (2016) conclut que l'utilisation de la tablette tactile favorise l'apprentissage de l'écriture et de la lecture, en offrant la possibilité aux jeunes enfants qui ne disposent pas encore d'une motricité fine bien développée, de faire des traces avec leurs doigts pour s'exprimer eux-mêmes (McManis et Gunnewig, 2012). Cet effet positif a également été observé chez des enfants de 3-6 ans pour lesquels l'utilisation de la tablette a favorisé l'émergence de l'écriture (Bigelow, 2013). De plus, l'apprentissage du lien entre graphèmes et phonèmes ainsi que les règles d'espacement entre les mots acquis à partir d'outil numérique est transféré vers un support traditionnel papier-crayon (Yost, 2003). Puisqu'il a été montré que les e-books facilitent la reconnaissance des mots, l'apprentissage de l'écriture (Shamir et Korat, 2007), ainsi que la conscience phonologique (Korat & Shamir, 2007), ces interfaces tendent à être de plus en plus utilisées à l'école. En Norvège, par exemple, les enfants d'âge préscolaire utilisent des tablettes tactiles à l'école pour créer des livres digitaux (Sandvik, Smørdal, et Østerud, 2012). Des bénéfices comparables de la tablette tactile numérique peuvent également être constatés concernant les compétences en mathématiques. McKenna (2012) a exploré les effets de l'utilisation d'Ipad durant des cours de mathématiques, sur une période de 3 mois, avec des enfants âgés de 7-9 ans, dans deux classes différentes. Une classe, définie comme groupe test, réalisait l'apprentissage des mathématiques sur des Ipads tandis que l'autre classe, désignée comme groupe contrôle, travaillait à partir d'outils classiques de type papier-crayon. L'auteur a observé que l'apprentissage des mathématiques était meilleur pour le groupe iPad, comparé au groupe contrôle. Il a également été montré un effet positif de l'utilisation des tablettes tactiles numériques auprès de populations d'enfants en difficulté. En effet, leur utilisation dans des classes inclusives d'enfants en difficultés, âgés de 9-10 ans, a ainsi amélioré les apprentissages en mathématiques et a réduit la différence entre les enfants en difficulté et les enfants neurotypiques (Zhang, Trussell, Gellegos, et Asam, 2015).

Les bénéfices des outils numériques sur les capacités d'apprentissage peuvent se comprendre dans le cadre des approches de la cognition incarnée qui soulignent l'importance des mouvements du corps dans le développement de notre pensée (Foglia et Wilson, 2013 ; Glenberg, 2010). Selon ces approches, la cognition ne peut se réduire à une activité symbolique dont les processus de traitement seraient exclusivement situés dans le cerveau. Bien au contraire, la cognition serait modulée par les contraintes biologiques de l'organisme, sa sensorimotricité et son environnement (Wilson, 2002). Nos connaissances conceptuelles stockées en mémoire dériveraient de représentations riches et multimodales créées au travers de nos expériences sensorimotrices. Les approches de la cognition incarnée établissent ainsi une relation forte entre la perception et l'activité motrice, en attribuant un rôle central au système moteur (Fogassi et Gallese, 2004). Selon ces approches, l'esprit est connecté aux expériences sensorimotrices, appuyant l'importance des relations entre action et représentation, c'est-à-dire entre agir et penser (Ishii, 2008 ; Spackman et Yanchar, 2014 ; Wilson, 2002). Autrement dit, le corps servirait aussi bien à comprendre, intégrer et construire des processus cognitifs. Le lien intrinsèque entre corps et esprit impliquerait qu'interagir avec un objet modulerait nécessairement la façon dont on pense (Black, 2010 ; Willems et Francken, 2012). Ainsi, la pensée serait incluse dans l'interaction entre notre corps et notre environnement, et dans le cadre des actions réalisées sur une tablette tactile, dans l'interaction entre notre main et l'interface tactile numérique (Clark, 1998 ; Fodor, 1985). Cette interaction prendrait forme au travers d'un ensemble d'informations kinesthésiques et proprioceptives afférentes et efférentes qui seraient rehaussées par les propriétés tactiles de la tablette (Lederman et Klatzky, 1987). Des études ont, par exemple, montré que l'apprentissage multisensoriel des lettres à 5 ans sur tablette permettait d'améliorer l'écriture manuscrite grâce à l'augmentation des afférences et efférences permises par cet outil (Bara et Gentaz, 2011 ; Labat, Ecalte, Baldy, et Magnan, 2014 ; Vinter et Chartrel, 2010). Patchan et Puranik (2016) ont exploré l'effet de l'utilisation

des tablettes sur le développement de l'écriture d'enfants préscolaires âgés de 3 à 6 ans. Dans cette étude, les enfants apprenaient à écrire des lettres majuscules trois fois par semaine pendant huit semaines, soit au crayon sur papier, soit au stylet sur tablette, soit au doigt sur tablette. Les résultats ont montré que l'apprentissage de l'écriture au doigt sur tablette était le plus efficace, puisque les enfants de cette condition ont écrit davantage de lettres correctement que ceux qui ont utilisé le crayon ou le stylet. Ils ont également observé que, pour la tablette tactile, améliorer l'expérience tactile était plus bénéfique que d'améliorer la similarité des outils pour l'apprentissage de l'écriture sur la tablette. Les auteurs ont conclu que le bénéfice de la tablette dans l'apprentissage de l'écriture au doigt est lié au rehaussement des afférences sensorielles que celle-ci permet.

Les bénéfices de l'outil tactile numérique dans les tâches d'écriture tiendraient, comme le montrent les recherches précédemment citées, à l'interaction multisensorielle enrichie qu'il permet. La question se pose de savoir si cet effet peut être généralisé à d'autres tâches graphomotrices telles que le dessin. Les études dans ce domaine rapportent des effets mitigés. Certaines recherches montrent que la tablette tactile peut promouvoir les arts graphiques et les compétences de dessins d'enfants de 3-6 ans dessinant sur tablette avec un stylet (Couse et Chen, 2010), ou dès l'âge de 2-3 ans en dessinant au doigt sur la tablette (Price, Jewitt, et Crescenzi, 2015). D'autres études, au contraire, révèlent des résultats négatifs concernant l'apport des tablettes tactiles numériques. En effet, Picard, Martin et Tsao (2014) ont comparé des productions d'enfants âgés de 5-6 ans et 7-8 ans qui avaient pour consigne de dessiner « le meilleur dessin d'une maison possible » sur tablette tactile avec leur doigt et sur papier avec un crayon. Les dessins étaient cotés grâce à une échelle de notation évaluant la qualité des dessins à partir de l'échelle standardisée de Barrouillet, Fayol et Chevrot (1994) qui permet de mesurer les éléments du dessin qui sont le plus fréquemment réalisés. Les auteures ont trouvé un effet facilitateur de l'utilisation du crayon sur papier pour dessiner des maisons qui étaient alors plus

riches que celles produites sur tablette. Toutefois, cette étude révèle que les dessins réalisés sur support numérique sont de qualité comparable à celle exécutés sur une feuille de papier.

A la suite de cette étude, la question reste posée de déterminer dans quelle mesure le support utilisé peut moduler une autre dimension fondamentale du dessin : sa créativité. Le dessin de l'enfant est effectivement un bon indicateur de sa créativité (Kosslyn, Heldmeyer, et Lockelear, 1977 ; Laszlo et Broderick, 1985 ; Olson et Bialystok, 1983). La créativité est définie comme « la capacité à réaliser une production qui soit à la fois nouvelle et adaptée au contexte dans lequel elle se manifeste » (Lubart, Mouchiroud, Tordjman, et Zenasni, 2003). Son développement se fait de façon linéaire, à l'exception de trois périodes de déclin, observées à 5-6 ans, 9-10 ans et 13 ans, qui seraient liées à une volonté de l'enfant à se conformer aux normes du système scolaire et au développement du raisonnement logique (Lubart et Lautrey, 1996 ; Torrance, 1968). En France, la première période s'observerait au CP, et la deuxième en CM1 (Urban et Jellen, 1996). La tablette numérique présente deux caractéristiques qui, selon l'approche de la cognition incarnée, sont susceptibles de favoriser la créativité graphique des enfants. D'une part, en permettant de dessiner directement au doigt. Le support tactile numérique libère la main des contraintes de mouvements qu'imposerait l'usage d'un outil scripteur. Selon l'approche de la cognition incarnée, s'affranchir de ces contraintes sensorimotrices augmente alors les potentialités cognitives mises en place pendant la réalisation de la tâche graphique (Clark, 1998 ; Black, 2012 ; Willems et Francken, 2012). D'autre part, dessiner directement au doigt sur une tablette permet de rehausser le système d'afférences et d'efférences tactilo-kinesthésiques mis en action pendant l'interaction avec le support tactile, ce qui favorise la variabilité des gestes exécutés et donc l'émergence de formes nouvelles.

La présente étude a pour objectif de déterminer si les tablettes tactiles numériques peuvent augmenter la créativité des dessins d'enfants âgés de 5-6 ans et 8-9 ans. Pour atteindre cet

objectif, nous avons adapté à un environnement numérique, la situation initialement proposée par Karmiloff-Smith (1990). Karmiloff-Smith (1990) a étudié les liens entre dessin et créativité chez des enfants âgés de 4 à 11 ans en leur proposant deux consignes différentes, qui permettent d'explorer les différences entre une image mentale créée par l'enfant (« Dessine ce qui n'existe pas ») et une image mentale restituée en mémoire (« Dessine ce qui existe »). Elle a observé très peu de différences entre le dessin créatif et le dessin non créatif lorsqu'elle proposait aux enfants des consignes du type « dessine-moi un X différent » (X faisant référence à une maison, un animal, ou un bonhomme). Au contraire, la consigne « Dessine un X qui n'existe pas » s'avérait être la meilleure méthode pour rendre compte de modifications créatives faites sur le dessin. Nous avons repris ce type de consigne pour comparer des productions numériques et des productions papiers de quelque chose qui existe, à sa version créée par l'enfant (« ce qui n'existe pas »). Nous nous attendions de manière générale à ce que les enfants expriment davantage de créativité sur l'outil numérique que sur l'outil papier. Nous nous attendions à ce que l'effet bénéfique de la tablette tactile sur le potentiel créatif s'exprime aussi bien à une période où la créativité est supposée être en baisse (enfants en classe de CP) ou pas (enfants en classe de CE2).

II. Méthode

II.1. Participants

Nous avons observé 34 enfants volontaires d'une école élémentaire située en Normandie à Bretteville l'Orgueilleuse, après avoir reçu leur accord ainsi que l'accord écrit de leur(s) parent(s). Les enfants étaient recrutés en classe de CP ($N = 20$, 11 garçons ; Âge : $M = 6.15$, $ET = .24$, $min = 6$ ans, $max = 7$ ans) et de CE2 ($N = 14$, 6 garçons ; Âge : $M = 8.17$ et $ET = .26$, $min = 8$ ans, $max = 9$ ans). Aucun enfant ne faisait l'objet d'un suivi médical ou para médical.

II.2. Matériel

Les dessins numériques étaient réalisés sur une tablette de type C>Display by Haier™, modèle E701, avec un Ecran IPS 7" à multipoints, d'une capacité de résolution de 1024x600 pixels. Les dessins étaient exécutés à l'aide du logiciel Hand Drawing V0.4b5 by IK0JRE. Ce logiciel de dessin, gratuit sur le Play Store Android, présentait une surface blanche avec la seule possibilité de tracer un trait noir. Ainsi, les enfants ne pouvaient dessiner qu'au trait noir. Ils ne pouvaient choisir la largeur du trait, ni utiliser la gomme. Les dessins sur papier étaient faits uniquement au stylo bic noir, sans possibilité de gommer le tracé, sur des feuilles de papier de taille similaire à celui de l'écran de la tablette (155x87mm).

Pour chaque enfant, un score de créativité était défini. A cette fin, nous avons créé une échelle de cotation de la créativité des dessins, en nous basant sur les cotations de dessin proposées par Karmiloff-Smith (1990), couplées à celles de Picard et collaborateurs (2014). Cette échelle était composée de 18 items (exemple : « Nombre, forme ou taille des yeux », Annexe 1). Les items repérés sur la production du bonhomme qui n'existe pas étaient notés 0.5 pour un changement graphique local et 1 pour un changement global dès lors que la caractéristique graphique en question était différente de celle observée sur la version du bonhomme qui existe. Le score de créativité du dessin était défini par la somme de tous les points attribués. Ce score s'appuie sur la définition de la créativité donnée précédemment dans la mesure où il révèle les éléments nouveaux et adaptés à la consigne de la production créative qui n'apparaissent pas dans le dessin du bonhomme qui existe pris comme ligne de base.

L'utilisation des interfaces numériques par les enfants dans leur vie quotidienne, et leur pratique du dessin à la maison, était évaluée par un questionnaire destiné aux parents. Ce questionnaire permettait de définir quel type de support numérique l'enfant utilisait à la maison (Tablette tactile, Ordinateur, Smartphone, Console de jeu), le nombre d'heures d'utilisation quotidienne

de ces supports (en moyenne), et le type d'activité effectué sur le support. Il questionnait également la pratique du dessin de l'enfant en dehors de l'école et le nombre d'heures qu'il passait à dessiner par jour (en moyenne).

II.3. Procédure

Les enfants étaient rencontrés dans leur école. Les passations étaient individuelles et avaient lieu dans le fond de la classe en présence de l'observateur. Ils étaient assis sur une chaise face à une table d'écolier. Les enfants devaient faire deux dessins avec les consignes suivantes : « Dessine un bonhomme qui existe, un bonhomme que tu as déjà vu. », et « Dessine un bonhomme qui n'existe pas, un bonhomme que tu inventes. ». Ces deux dessins devaient être réalisés à la fois au doigt sur tablette et au stylo sur papier. La figure 1 donne un exemple de réalisation de chacun d'eux. Il n'y avait pas de temps imparti pour réaliser la tâche, les enfants décidaient eux-mêmes lorsque leur dessin était terminé. L'ordre de présentation de la consigne et l'ordre de présentation du support étaient systématiquement alternés entre les enfants. A la suite du recueil des dessins, le questionnaire d'utilisation du numérique et de pratique du dessin à la maison étaient transmis aux parents par le directeur de l'établissement. Les questionnaires étaient ensuite récupérés via l'enseignant de l'enfant.

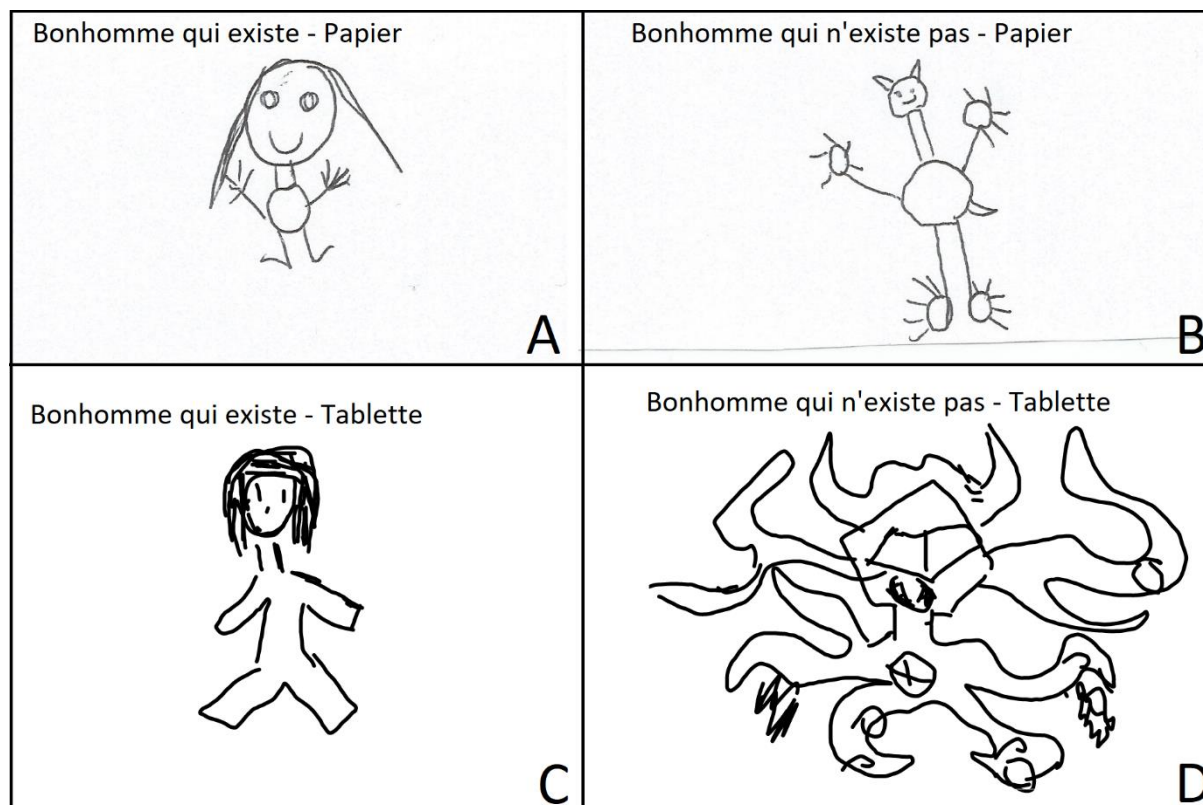


Figure 5. Exemples de dessins créatifs et non créatifs réalisés sur papier par des enfants de CP (A et B) et sur tablette par des enfants de CE2 (C et D).

II.4. Analyse des résultats

Au préalable de toute analyse, la normalité de la distribution et l'homogénéité des variances des scores de créativité ont été respectivement testées à partir des tests de Shapiro–Wilk et de Levene. Ces tests ont révélé que la distribution des données est gaussienne et que les variances sont équivalentes pour les scores de créativité des productions réalisées sur papier ($D = .95$, $p = .10$) ainsi que pour les scores de créativité des productions réalisées sur tablette ($D = .96$, $p = .30$).

Les scores de créativité ont été analysés à l'aide d'une ANOVA à mesures répétées prenant comme facteur inter groupe, la classe des enfants (CP versus CE2) et comme facteur intra groupe, le support utilisé (numérique versus papier), le type de consigne (« un bonhomme qui existe » versus « un bonhomme qui n'existe pas »), l'ordre de présentation des supports (01 :

papier puis tablette ; 02 : tablette puis papier), l'ordre de présentation des consignes (01 : « un bonhomme qui existe » puis « un bonhomme qui n'existe pas » ; 02 : « un bonhomme qui n'existe pas » puis « un bonhomme qui existe »). Les questionnaires sur la fréquence d'usage des supports numériques et sur la fréquence des activités graphiques à la maison ont été analysés par une analyse de covariance entre les scores de créativité obtenus sur chaque support et le temps moyen passé à utiliser le numérique ou à dessiner. L'utilisation des différents supports et des activités produites sur support numérique étaient analysé quantitativement. Les temps d'utilisation du numérique et de pratique de dessin ont été analysés à l'aide d'une ANOVA à un facteur ayant pour facteur inter groupe, la classe des enfants (CP versus CE2). Ces temps d'utilisation du numérique et de pratique du dessin étaient mis en relation avec les scores de créativité par une analyse de covariance.

III. Résultats

Les scores de créativité de chaque classe et pour chaque support sont présentés dans le tableau 1. L'analyse de variance réalisée sur les scores de créativité n'a révélé aucune différence significative selon l'ordre de présentation du support (Tablette puis papier ou Papier puis tablette), $F(1.32) = .61, p = .44$, ou selon l'ordre de présentation de la consigne (Bonhomme qui existe puis qui n'existe pas et inversement), $F(1.32) = .38, p = .54$.

Tableau 3. Tableau des scores de créativité de chaque classe (CP-CE2) et pour chaque support (Papier-Tablette)

Scores Papier		Scores tablette	
Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-Type

CP	3,425	2,335	4,525	2,191
CE2	4,857	2,357	5,928	2,765

L'ANOVA révèle un effet du type de support (Papier versus Tablette tactile), $F(1.33) = 4.63$, $p = .038$, $np^2 = .12$. Comme indiqué dans la Figure 2, les scores de créativité sont plus élevés lorsque les enfants utilisent une tablette ($M = 5,10$; $ET = 2,50$; $min = 1$; $max = 11$) que lorsqu'ils utilisent un support papier ($M = 4,01$; $ET = 2,42$; $min = 0$; $max = 8$), tout niveau scolaire confondu.

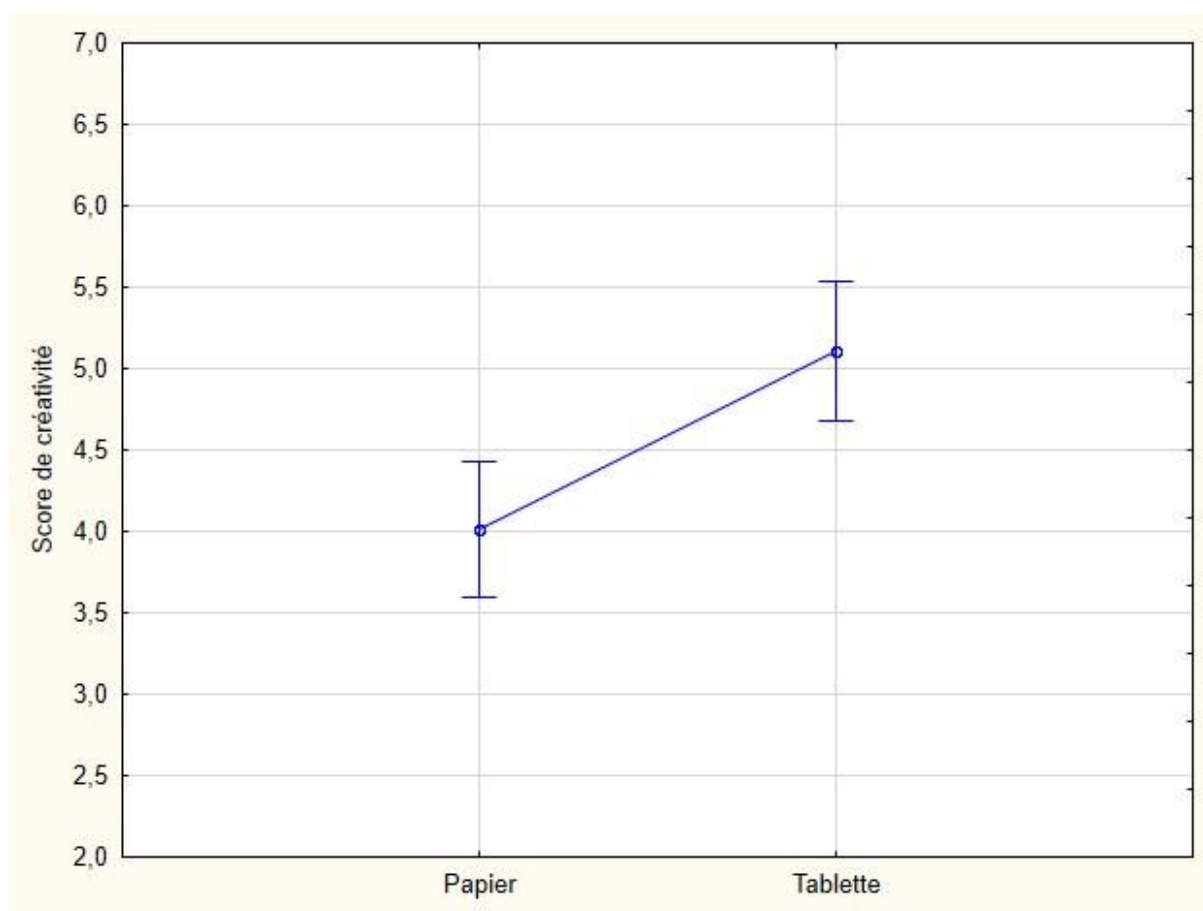


Figure 6. Score de créativité (moyenne et erreur standard de la moyenne) selon le type de support.

L'analyse montre également un effet de la classe scolaire des enfants (CP versus CE2), $F(1.32) = 4.75$, $p = .037$, $np^2 = .13$. Comme indiqué dans la Figure 3, les scores de créativité sont plus élevés, tout support confondu, chez les enfants de CE2 ($M = 5,39$; $ET = 2,57$; $min = 0,5$; $max = 11$), par rapport aux enfants de CP ($M = 3,97$; $ET = 2,30$; $min = 0$; $max = 8$).

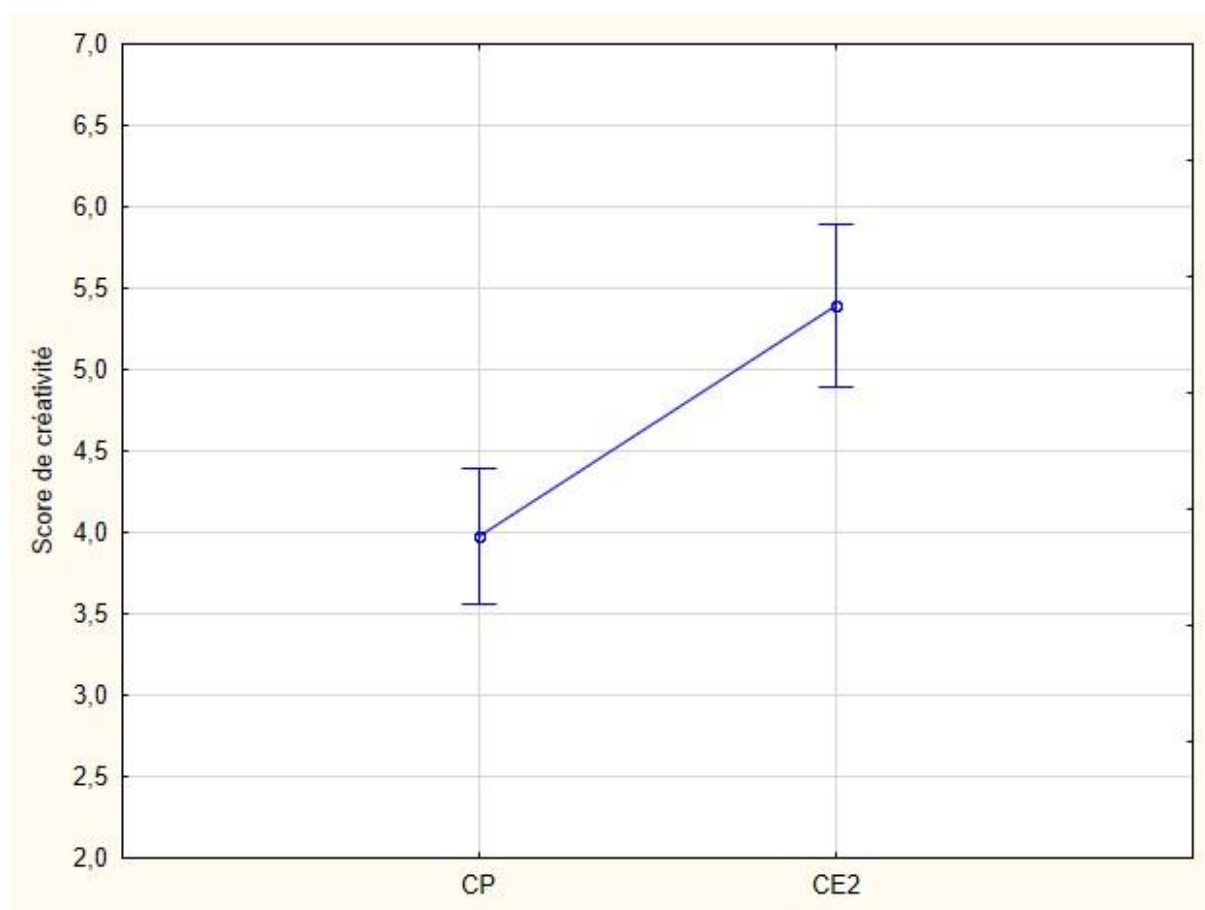


Figure 7. Score de créativité (moyenne et erreur standard de la moyenne) observé pour chaque classe scolaire

Aucun effet d'interaction n'a été observé entre le support et l'ordre de présentation de la consigne, $F(1.32) = 1.90$, $p = .018$, ou entre le support et la classe des enfants, $F(1.32) = 0.00075$, $p = .98$. Les élèves présentaient toujours de meilleurs scores de créativité sur tablette, peu importe l'ordre de présentation de la consigne. L'analyse n'a pas montré d'interaction significative entre l'ordre de présentation de la consigne et la classe, $F(1.30) = 3.70$, $p = .064$.

Le tableau 2 montre les résultats du questionnaire relatif aux supports utilisés et aux usages du numériques par les enfants de CP et CE2. Aucune différence significative n'apparaît entre les élèves de CP et ceux de CE2 en ce qui concerne le type de support numérique utilisé à la maison. A propos des usages, une seule différence significative apparaît entre les enfants de CP (88%) et ceux de CE2 (45%) : les plus jeunes enfants utilisent davantage ces supports numériques pour visionner des vidéos que les enfants plus âgés.

Tableau 4. Pourcentages et scores Chi2 du type de support utilisé et de l'usage des technologies selon la classe des enfants. Les Chi2 significatif sont en gras

	% d'enfants	% d'enfants de CP	% d'enfants de CE2	Chi2	Valeur p
Type de support					
Tablette	78	88	63	2,400	0,121
Smartphone	25	29	18	0,449	0,503
Ordinateur	35	41	27	0,562	0,453
Console de jeu	50	41	63	1,348	0,246
Type d'activité					
Jeux	89	82	100	2,174	0,140
Dessins	46	41	54	0,480	0,488
Jeux éducatifs	75	76	72	0,050	0,823
Ecouter de la musique	78	88	63	2,400	0,121
Regarder des vidéos	71	88	45	5,989	0,014
Traitement de texte	10	5	18	1,056	0,304
Recherche documentaire	21	17	27	0,368	0,544
Réseaux sociaux	7	5	9	0,104	0,747
Photographie	35	35	36	0,003	0,954

L'analyse de variance réalisée sur le temps d'utilisation du numérique révèle une différence significative selon la classe scolaire (CP versus CE2), $F(1,26) = 7,05$, $p = .013$. Comme le montre la Figure 4, les CE2 ($M = 47,5$; $ET = 29$) utilisent les technologies numériques à la maison plus longtemps en moyenne que les CP ($M = 23,5$; $ET = 18,94$). En revanche, l'analyse ne révèle pas de différence significative sur le temps de pratique du dessin à la maison selon la

classe scolaire, $F(1.26) = 0.39$, $p = .53$, les enfants de CP ($M = 30$; $ET = 17,9$) y consacrant un temps comparable à celui des enfants de CE2 ($M = 25,7$; $ET = 17,6$)

L'analyse de corrélation réalisée sur le temps d'utilisation du numérique n'a révélé aucun effet significatif sur les scores de créativité des dessins réalisés sur papier ($p = .637$), ni sur les scores de créativité des dessins réalisés sur tablette tactile ($p = .826$).

L'analyse de corrélation réalisée entre pratique à la maison et score de créativité n'a montré aucun effet significatif avec les scores de créativité des dessins réalisés sur papier ($p = .512$), ni sur les scores de créativité des dessins réalisés sur tablette ($p = .947$).

IV. Discussion

L'objectif de cette étude était de déterminer dans quelle mesure l'interface tactile numérique facilite l'expression de la créativité graphique chez des enfants d'âge scolaire. Les résultats ont été obtenus sur un petit effectif d'enfants et doivent donc être interprétés avec prudence. Toutefois, ils permettent de valider l'hypothèse selon laquelle les enfants de CP et de CE2 expriment davantage de créativité lorsqu'ils dessinent sur tablette numérique que sur une feuille de papier. En effet, les scores de créativité des enfants sont plus élevés lorsque le dessin est réalisé sur tablette plutôt que sur papier. Cet effet est aussi bien observé chez les enfants de CP que chez ceux de CE2, et ceci, quel que soit l'ordre de présentation des outils sur lesquels ils ont dessiné. Ce premier résultat qui met en lumière le potentiel de l'utilisation des outils tactiles numériques sur l'expression créative des enfants, peut être compris dans le cadre des théories de la cognition incarnée et située. Cette interface aux fonctionnalités tactiles avancées permettrait de mobiliser plus efficacement le système d'afférences et d'efférences tactilo-kinesthésiques des enfants, amenant à une meilleure mobilisation cognitive (Clark, 1998 ; Foglia et Wilson, 2013 ; Lederman et Klatzky, 1987) qui faciliterait aussi bien l'apprentissage

de la littérature (Neumann, 2016), des mathématiques (McKenna, 2012) que l'expression de la créativité. Une autre hypothèse pourrait être avancée pour expliquer l'effet du numérique sur la créativité. Une des fonctions du numérique pourrait être de casser les représentations conventionnelles du dessin, ce qui induirait alors que le dessin d'un bonhomme qui existe serait plus conventionnel sur papier que sur tablette. Une façon de répondre à cette question serait de comparer les dessins du bonhomme qui existe réalisés sur tablette au doigt et sur papier. Picard *et al.* (2014) ont procédé à cette comparaison et elles montrent, effectivement, que les enfants réalisent le dessin de la maison de façon plus prototypique lorsqu'il est réalisé au stylo sur papier qu'au doigt sur tablette. Il se pourrait alors que le numérique offre aussi la possibilité de s'écarter des symbolisations conventionnelles et ainsi de faire émerger de nouvelles représentations.

Les résultats valident également la seconde hypothèse selon laquelle l'effet positif de l'utilisation d'un support tactile numérique sur l'expression de la créativité graphique s'observe aussi bien chez des enfants de CP qui se trouvent, selon Torrance (1968) et Urban & Jellen (1996), dans une période de déclin de la créativité, que chez des enfants de CE2 qui ne le sont plus. Toutefois, si une augmentation des scores de créativité est observée pour ces deux classes lorsque la production graphique est réalisée sur l'outil tactile numérique, les résultats ont révélé que les enfants de CP présentent des scores de créativité, tout support confondu, plus faibles que ceux des enfants de CE2. La moindre créativité des enfants de CP par rapport aux enfants de CE2 ne peut être imputable à l'absence de maîtrise de l'outil scripteur lequel pourrait contraindre la motricité des enfants, puisqu'elle s'observe également pour les productions au doigt. Ce résultat est en accord avec les observations de Torrance (1968) et Urban & Jellen (1996) qui rapportent une créativité moins importante chez les enfants de 5-6 ans comparativement à ceux de 7-8 ans. En dépit de cette différence, nos résultats montrent que la production graphique sur support numérique permet aux enfants de CP d'atteindre des scores

de créativité comparables à ceux des enfants de CE2 dessinant sur papier. De plus, bien que nos résultats laissent apparaître une différence de performance créative entre les classes, celle-ci est toujours meilleure sur tablette tactile que sur papier, toutes classes confondues.

L'effet de la tablette tactile numérique sur la créativité graphique des enfants ne s'explique pas par une fréquence d'utilisation des supports numériques ni par la fréquence des activités de dessin à la maison. Aucun effet de l'usage des technologies sur les performances à la tâche de dessin n'a été observé. Toutefois, on ne peut écarter l'hypothèse selon laquelle les questionnaires proposés aux parents n'étaient pas suffisamment fins pour révéler un effet de ces facteurs sur la créativité graphique numérique des enfants. En effet, les questions n'étaient peut-être pas assez adaptées à l'usage réel des enfants puisque, par exemple, les parents étaient interrogés sur le nombre d'heure d'utilisation des technologies par jour alors que celui-ci peut varier selon les jours de la semaine, avec une utilisation parfois plus prolongée au cours des week-ends. Par ailleurs, ce questionnaire pose aussi la question du biais de désirabilité sociale. En adressant le questionnaire aux parents et non à l'enfant directement, les parents pourraient avoir eu tendance à sous-estimer le temps d'utilisation des technologies de leur enfant, soit parce qu'ils ne portent pas attention au temps d'utilisation réel de leur enfant, soit en raison de l'image négative que véhicule l'utilisation de la technologie sur le développement de l'enfant.

En montrant l'apport des outils tactiles numériques en termes de bénéfices créatifs dans une tâche graphique, cette étude rejoint les conclusions de travaux antérieurs qui ont montré des bénéfices de ces supports sur l'émergence de la littératie ou sur les compétences scolaires des enfants. Nos résultats ont montré que l'outil tactile numérique pouvait être un outil potentiellement intéressant pour une meilleure expression créative des enfants grâce à ses particularités fonctionnelles amenant une meilleure mobilisation cognitive par un rehaussement des afférences et efférences tactilo-kinesthésiques, comme le présuppose le cadre théorique de

la cognition incarnée (Black, 2010, Lederman et Klatzky, 1987 ; Willems et Francken, 2012). La question subsiste de savoir si les processus qui sous-tendent la créativité, comme les fonctions exécutives, sont également plus efficacement mobilisés par les supports numériques. Des études ultérieures devraient évaluer si la tablette tactile pourrait améliorer plus spécifiquement certains processus liés à la créativité (Benedek *et al.*, 2014 ; Lubart, Besançon et Barbot, 2011) comme les fonctions exécutives (Miyake *et al.*, 2000) qui incluent la mémoire de travail, l'inhibition, ou la flexibilité cognitive.

REFERENCES

- Bara, F., & Gentaz, E. (2011). Haptics in teaching handwriting: The role of perceptual and visuo-motor skills. *Human movement science*, 30(4), 745-759.
- Barrouillet, P., Fayol, M., & Chevrot, C. (1994). Le dessin d'une maison. Construction d'une échelle de développement. *L'Année Psychologique*, 94, 81-98.
- Benedek, M., Jauk, E., Sommer, M., Arendasy, M., & Neubauer, A. C. (2014). Intelligence, creativity, and cognitive control: The common and differential involvement of executive functions in intelligence and creativity. *Intelligence*, 46, 73-83.
- Bigelow, E. C. (2013). *iWrite: Digital message making practices of young children*. Vanderbilt University.
- Black, J. B. (2010). An embodied/grounded cognition perspective on educational technology. In *New science of learning* (pp. 45-52). Springer, New York, NY.
- Clark, A. (1998). *Being there: Putting brain, body, and world together again*. MIT press.
- Cooper, L. Z. (2005). Developmentally appropriate digital environments for young children. *Library trends*, 54(2), 286-302.
- Couse, L. J., & Chen, D. W. (2010). A tablet computer for young children? Exploring its viability for early childhood education. *Journal of research on technology in education*, 43(1), 75-96.
- Dubé, A. K., & McEwen, R. N. (2015). Do gestures matter? The implications of using touchscreen devices in mathematics instruction. *Learning and Instruction*, 40, 89-98.
- Fodor, J. A. (1985). Precis of the modularity of mind. *Behavioral and brain sciences*, 8(1), 1-5.
- Fogassi, L., & Gallese, V. (2004). Action as a binding key to multisensory integration. *The handbook of multisensory processes*, 425-441.
- Foglia, L., & Wilson, R. A. (2013). Embodied cognition. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 4(3), 319-325.
- Geist, E. A. (2012). A qualitative examination of two year-olds interaction with tablet based interactive technology. *Journal of Instructional Psychology*, 39(1).
- Glenberg, A. M. (2010). Embodiment as a unifying perspective for psychology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 1(4), 586-596.
- Hillman, M., & Marshall, J. (2009). Evaluation of digital media for emergent literacy. *Computers in the Schools*, 26(4), 256-270.
- Hisrich, K., & Blanchard, J. (2009). Digital media and emergent literacy. *Computers in the Schools*, 26(4), 240-255.
- Ishii, H. (2008). The tangible user interface and its evolution. *Communications of the ACM*, 51(6), 32-36.

- Karmiloff-Smith, A. (1990). Constraints on representational change: Evidence from children's drawing. *Cognition*, 34(1), 57-83.
- Korat, O., & Shamir, A. (2007). Electronic books versus adult readers: Effects on children's emergent literacy as a function of social class. *Journal of Computer Assisted Learning*, 23(3), 248-259.
- Kosslyn, S. M., Heldmeyer, K. H., & Locklear, E. P. (1977). Children's drawings as data about internal representations. *Journal of Experimental Child Psychology*, 23(2), 191-211.
- Labat, H., Ecalte, J., Baldy, R., & Magnan, A. (2014). How can low-skilled 5-year-old children benefit from multisensory training on the acquisition of the alphabetic principle?. *Learning and Individual Differences*, 29, 106-113.
- Laszlo, J. I., & Broderick, P. A. (1985). The perceptual-motor skill of drawing. *Visual order: The nature and development of pictorial representation*, 356-373.
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1987). Hand movements: A window into haptic object recognition. *Cognitive psychology*, 19(3), 342-368.
- Lubart, T., Besançon, M., & Barbot, B. (2011). *EPOC: évaluation du potentiel créatif*. Paris: Hogrefe.
- Lubart, T., Mouchiroud, C., Tordjam, S., & Zenasni, F. (2003). *Psychologie de la créativité*. Paris: Armand Colin.
- Lubart, T.I., & Lautrey, J. (1996). *Development of creativity in 9- to 10-year old children*. Paper presented at The Growing Mind Congress, Geneva, Switzerland.
- McKenna, C. (2012). There's an app for that: How two elementary classrooms used iPads to enhance student learning and achievement. *Education*, 2(5), 136-142.
- McManis, L. D., & Gunnewig, S. B. (2012). Finding the education in educational technology with early learners. *Young Children*, 67(3), 14-24.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "frontal lobe" tasks: A latent variable analysis. *Cognitive psychology*, 41(1), 49-100.
- Neumann, M. M. (2016). Young children's use of touch screen tablets for writing and reading at home: Relationships with emergent literacy. *Computers & Education*, 97, 61-68.
- Olson, D. R., & Bialystok, E. (2014). *Spatial cognition: The structure and development of mental representations of spatial relations*. Psychology Press.
- Patchan, M. M., & Puranik, C. S. (2016). Using tablet computers to teach preschool children to write letters: Exploring the impact of extrinsic and intrinsic feedback. *Computers & Education*, 102, 128-137.
- Picard, D., Martin, P., & Tsao, R. (2014). iPads at school? A quantitative comparison of elementary schoolchildren's pen-on-paper versus finger-on-screen drawing skills. *Journal of Educational Computing Research*, 50(2), 203-212.
- 130 Bitu, F., Jouen, F., & Molina, M. (2019). Les apports de l'interface tactile numérique dans l'expression créative graphique: une étude exploratoire chez des enfants d'âge scolaire. *Enfance*, (3), 357-373.

- Piotrowski, J. T., & Meester, L. (2018). Can apps support creativity in middle childhood?. *Computers in Human Behavior*, 85, 23-33.
- Price, S., Jewitt, C., & Crescenzi, L. (2015). The role of iPads in pre-school children's mark making development. *Computers & Education*, 87, 131-141.
- Roskos, K., Burstein, K., Shang, Y., & Gray, E. (2014). Young children's engagement with e-books at school: Does device matter?. *SAGE Open*, 4(1), 1-9.
- Sandvik, M., Smørdal, O., & Østerud, S. (2012). Exploring iPads in practitioners' repertoires for language learning and literacy practices in kindergarten. *Nordic Journal of Digital Literacy*, 7(03), 204-221.
- Sakr, M. (2018). Multimodal participation frameworks during young children's collaborative drawing on paper and on the iPad. *Thinking Skills and Creativity*, 29, 1-11.
- Shamir, A., & Korat, O. (2007). Developing an educational e-book for fostering kindergarten children's emergent literacy. *Computers in the Schools*, 24(1-2), 125-143.
- Spackman, J. S., & Yanchar, S. C. (2014). Embodied cognition, representationalism, and mechanism: a review and analysis. *Journal for the Theory of Social Behaviour*, 44(1), 46-79.
- Torrance, E. P. (1968). A longitudinal examination of the fourth grade slump in creativity. *Gifted Child Quarterly*, 12(4), 195-199.
- Urban, K. K., & Jellen, H. G. (1996). *Test for creative thinking-drawing production (TCT-DP)*. Swets Test Services.
- Van der Kooy-Hofland, V. A. C., Kegel, C. A. T., & Bus, A. G. (2011). Evidence-based computer interventions targeting phonological awareness to prevent reading problems in at-risk young students. *Handbook of early literacy research*, 3, 214-227.
- Vinter, A., & Chartrel, E. (2010). Effects of different types of learning on handwriting movements in young children. *Learning and Instruction*, 20(6), 476-486.
- Willems, R. M., & Francken, J. C. (2012). Embodied cognition: taking the next step. *Frontiers in Psychology*, 3, 582.
- Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic bulletin & review*, 9(4), 625-636.
- Yost, N. (2003, July). Computers, kids, and crayons: a comparative study of emergent writing behaviours. In *Proceedings of the international federation for information processing working group 3.5 open conference on Young children and learning technologies- Volume 34* (pp. 107-112). Australian Computer Society, Inc.
- Zhang, M., Trussell, R. P., Gallegos, B., & Asam, R. R. (2015). Using math apps for improving student learning: An exploratory study in an inclusive fourth grade classroom. *TechTrends*, 59(2), 32-39.

ANNEXE 1 : grille de cotation des dessins

Item	Points
I - Tête	
1- Visage [Forme (0,5) et taille (0,5)]	/1
2- Yeux [Ajout/suppression (0,5) et Forme (0,5)]	/1
3- Nez [Ajout/suppression (0,5) et Forme (0,5)]	/1
4- Oreilles [Ajout/suppression (0,5) et Forme (0,5)]	/1
5- Bouche [Ajout/suppression (0,5) et Forme (0,5)]	/1
6- Dents [Ajout/suppression (0,5) et Forme (0,5)]	/1
7- Cheveux [Présence/Absence (0,5) et Forme (0,5)]	/1
II- Bras	
1- [Taille (0,5), Forme (0,5) et Orientation (0,5)]	/1,5
2- [Ajout/Suppression (0,5)]	/0,5
3- Mains [Ajout/Suppression (0,5) et Forme (0,5)]	/1
III- Buste	
1- [Taille (0,5), Forme (0,5) et Orientation (0,5)]	/1,5
2- [Ajout/Suppression (0,5)]	/0,5
IV- Jambes	
1- [Taille (0,5), Forme (0,5) et Orientation (0,5)]	/1,5
2- [Ajout/Suppression (0,5)]	/0,5
3- Pieds [Ajout/Suppression (0,5) et Forme (0,5)]	/1
V- Autres [ajout d'un élément original (1)]	/1
VI - Position et forme générale	
Position des éléments [ex : membres inversés (par exemple buste et tête)]	/1
Forme générale [Catégorie différente (ex : homme-animal, robot, monstre, etc)]	/1
TOTAL	/18

CHAPITRE 9 – LE DESSIN CRÉATIF AU DOIGT ET AU STYLET SUR TABLETTE TACTILE A L'ADOLESCENCE

La première étude (Chapitre 8) a permis de souligner un effet positif de l'utilisation du doigt sur tablette tactile sur la créativité des enfants, aussi bien pour des enfants de CP qui se trouvent dans une période de déclin de la créativité, que chez des enfants de CE2 qui ne le sont plus. Cependant, la précédente étude ne permettait pas différencier l'effet inhérent à l'outil utilisé (*i.e.* doigt versus crayon), de celui inhérent au support (*i.e.* tablette tactile versus papier). De plus, les effets n'étaient observables qu'au travers du dessin du bonhomme et n'avait pas été observé avec d'autres sujets de dessin. Enfin, les effets étaient observés à une période de développement où le geste graphique exécuté avec un outil scripteur n'était peut-être pas suffisamment maîtrisé.

La seconde étude de thèse visait donc à déterminer, de façon exploratoire, si les bénéfices liés à l'utilisation du doigt sur la tablette tactile pouvaient se retrouver chez les adolescents de 13-14 ans, tout en comparant ces effets à l'utilisation du stylet. Ces effets étaient observés au travers du dessin de la maison.

(1) Title:

Digital touchscreens as a media for creativity during adolescence

(2) Authors & institutions :

Fabien Bitu^a, Béatrice Galinon-Mélénec^b, and Michèle Molina^a

^aLaboratory of Psychology of Caen Normandy, LPCN EA7452 – University of Caen Normandy

^bIdentity and Differentiation of Spaces, Environment and Societies, UMR IDEES 6266 CNRS - University Le Havre Normandy

(3) Running title:

Creativity in digital drawings

(4 & 5) Corresponding author:

Fabien Bitu

UFR de Psychologie,
Bâtiment L, 4e étage - porte SE 403
Esplanade de la Paix
14032 CAEN Cedex
FRANCE

Mail: fabien.bitu@unicaen.fr

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Declarations of interest: none.

Author's note

Fabien Bitu, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4507-042X>

This article has been accepted for publication in *L'Année psychologique/Topics in cognitive Psychology* on July 23, 2021. It is available online in the editor's format at the following link: <https://doi.org/10.3917/anpsy1.214.0489>

To cite this article: Bitu, F., Galinon-Mélénec, B., & Molina, M. (2021). Digital touchscreens as a media for creativity during adolescence. *L'Année psychologique*, 121(4), 489-518.

Abstract

Based on embodied representation theory (Pezzulo, 2011) considering creativity process as a predictive motor control process (Dietrich & Haider, 2015), this research was aimed at evaluating whether direct finger feedbacks on tablet could promote originality in drawings. Twenty-one adolescents aged 13/14 were asked to produce the most original house as possible on tablet with finger and stylus and on paper with a pen, and an unoriginal house with a pen on paper. Originality in drawing was scored with a rating scale comparing original drawings to a prototypical house, then comparing original drawings to unoriginal ones. Results revealed that original scores are higher for drawings on tablet (without difference between finger and stylus) than on paper. These findings highlight the role played by off-line simulation of action in the creative process.

Résumé

Basée sur les théories de la représentation incarnée (Pezzulo, 2011) considérant le processus créatif comme un contrôle moteur prédictif (Dietrich & Haider, 2015), cette recherche a évalué le potentiel de la tablette tactile comme un outil facilitant l'originalité des dessins. Vingt-et-un adolescents âgés de 13-14 ans ont été invités à produire la maison la plus originale possible sur tablette au doigt et au stylet ainsi que sur papier, et une maison non-originale avec un crayon sur papier. L'originalité des dessins a été notée avec une échelle de cotation comparant les dessins originaux à une maison prototypique, puis en comparant les dessins originaux aux dessins non originaux. Les résultats montrent que les scores d'originalité sont supérieurs pour les dessins réalisés sur tablette (sans différence entre doigt et stylet) plutôt que sur papier. Ces résultats mettent en évidence le rôle joué par le processus de simulation off-line de l'action dans le processus créatif.

I. Introduction

Nowadays, digital technologies are commonly used in occidental societies, especially mobile devices like smartphones and tablets which are respectively used by 84% and 73% of 13 to 18 years old in US, for a total of 3:27 average time spent per day on these two devices (Rideout, 2016). Touchscreens, defined as electronic devices presenting a visual screen controlled by gestures and tactile actions executed with fingers or stylus (Dubé & McEwen, 2015), such as smartphones or tablets, are among the most popular devices used by children and adolescents. These media offer a multimodal interaction, stimulating visual, tactile-kinesthetic and proprioceptive sensorial systems, which help in maintaining attention (Roskos, Burstein, Shang, & Gray, 2014). Touchscreen devices are particularly easy to use since few formal knowledge and only simple gestures are required to interact directly with hand and fingers (Dubé & McEwen, 2015; McManis & Gunnewig, 2012). The possibility to act directly with fingers would contribute most particularly to the easiness of use of this device, even at a young age (Cooper, 2005; Geist, 2012; McManis & Gunnewig, 2012; Piotrowski & Meester, 2018; Sakr, 2018), by providing an immediate feedback to fingertips on screen at each gestural actions, as well as releasing the user from the sensorimotor constraints consecutive to the motor control of the pen. Beyond the benefice that the finger actions can offer in the easiness of use of touchscreen devices, the question remains to know whether these direct feedbacks may have an impact on the mobilization of cognitive processes. More specifically, in this paper, we will ask whether drawing with fingers on tablet can facilitate drawing creativity. Various definitions of creativity have been proposed through the years (Duff, 1767; James, 1880; Spearman, 1931), bringing closer the concept of originality in creativity since William James (1880). We chose to retain the most consensual definition of creativity as the ability to realize something new and adapted to the context of action (Lubart, Mouchiroud, Tordjam, & Zenasni, 2003). In this definition, creativity is based on three components that are, according to Mouchiroud and

Lubart (2001), fluency (number of relevant responses), flexibility (number of themes in responses), and originality (unusualness of responses). Originality is thus the component of creativity which specifically describes the novelty of a creative idea (Lubart & Georgsdottir, 2004; Mouchiroud & Lubart, 2001). Originality in drawing would then correspond to the specific aspects of the drawing that have been assessed and selected as novel, depending on the acquired knowledge about the drawn subject (Lubart & Georgsdottir, 2004; Runco, 1991).

Recently, creative thinking has been conceived as arising from sensorimotor control processes (Dietrich & Haider, 2014), and more specifically from sensorimotor prediction (Pezzulo, 2011). Sensorimotor prediction acts at two levels that we will describe in turn: the control of the ongoing action and the simulation of off-line action (Pezzulo, 2011). Let's first consider the control of ongoing action. Feedback motor control allows the modification of ongoing movement by using information from sensory receptors. This type of control is slow and needs to be combined with feedforward processes in order to produce accurate and fluent movements, that require internal models of action. These internal models of action allow the brain to imitate input and output characteristics of motor unit (Kawato, 1999). Two varieties of internal models are classically defined: direct and inverse internal models. Direct internal models allow to predict sensorial consequences of the ongoing action from efference copies of issued motor commands, while inverse internal models calculate motor commands needed to complete the action (Kawato, 1999; Miall & Wolpert, 1996; Wolpert & Ghahramani, 2004; Wolpert, Ghahramani, & Jordan, 1995). Feedforward internal models of action allow thus to generate several hypotheses on sensorial consequences of the ongoing action by the way of direct models acting as a predictor, as well as to select adapted motor program by the way of inverse models acting as a feedforward controller and thus playing a fundamental role in motor learning (Wolpert & Kawato, 1998).

Applied to the use of tablets, interaction between the hand and the digital tactile interface would give rise to a set of afferent and efferent kinesthetic and proprioceptive information (Lederman & Klatzky, 1987) that would differ from those generated through the interaction with pencil on a sheet of paper, as revealed by the work of Alamargot and Morin (2015). These authors demonstrated that, compared to the roughness of a paper sheet, the smoothness of a tablet screen reduces the friction between the pen and the surface of the tablet, which lessens proprioceptive feedback, giving rise to differences in motor execution (higher letter size) and motor kinematic (higher speed of execution) in writing letters, this effect being observed in second and ninth grade students. Similar results were found in Gerth *et al.* (2016) with preschoolers, second graders, and adults being affected by a difference in friction of the writing surface. However, writing letters on a tablet with finger seems to offer an enriched tactile experience. This facilitating effect of tablets has been clearly demonstrated in the context of writing skills in young children. As a matter of fact, Patchan and Puranik (2016) trained preschoolers aged 3 to 6 years to write three times a week for eight weeks, either by using a pen on paper sheet, or a stylus on tablet, or a finger on tablet. Results showed that using a tablet with fingers was the most efficient set, since it led to more correctly written letters than with stylus on tablet or pen on paper. Authors concluded that tablet's benefits in handwriting learning is linked to afferent and efferent information provided by the direct proprioceptive feedback on the tablet. The direct contact of one's finger on the tablet increased friction with the surface and thus haptic feedback, *i.e.* additional proprioceptive information. Acting directly on the screen with fingers would then offer a richer set of afferent and efferent sensorial information that could foster sensorimotor prediction of action, facilitating motor skills.

By enhancing sensorimotor prediction through the richness of the haptic information processed, tablets could thus improve motor skills and therefore be of special interest, for example, for writing learning in preschool children (Patchan & Puranik, 2016). Could these beneficial effects

observed for writing skills be extended to creative drawing skills? As it has been explained previously, sensorimotor prediction is made possible through feedforward internal models that create an inner loop in which actual sensorimotor interaction is paralleled and imitated: inner loop is thus a kind of “internalization of external reality” (Pezzulo, 2011, p.87). But internal models can also be activated without any actual sensorimotor interaction. In this case, internal models are detached from the actual sensorimotor activity. When decoupled from any actual sensorimotor interaction, internal models, and the inner loop they create, allow to control off-line action. When ran off-line, internal models which are at the core of the embodied representation proposed by Pezzulo (2011) allow to simulate future motor actions or potential actions without even realizing it (Jeannerod, 1994). The transition from on-line to off-line control of action reveals that the sensorimotor prediction first designed to control on-line action would then give rise to a simulation process involved in higher cognitive processes such as, for instance, motor imagery and creativity. The main particularity of these cognitive processes is that despite their disconnection from sensorimotor real activity, they remain rooted in sensorimotor prediction. Studies investigating motor imagery sustain this proposal. Indeed, it has been demonstrated that the easiness to simulate motor action in children is clearly linked to the richness of the afferent set of information children (Guilbert, Jouen, Lehalle, & Molina, 2013; Guilbert, Molina, & Jouen, 2016) and adolescents (Choudhury, Charman, Bird, & Blakemore, 2007) can refer to although they are not enrolled in a real action.

This process of simulation has been recently proposed to give account for creativity, a cognitive process based on sensorimotor prediction. According to Dietrich and Haider (2015), creative thinking could thus be thought of as a mere evolutive embodied and situated cognitive process rooted in predictive mechanisms of sensorimotor activity. These authors define creativity as a process of generation and evaluation of ideas never thought before, in a trial-and-error basis, relying on the same predictive mechanism as those involved in motor control of action. Most

precisely, the predictive processing used for the motor control of action would be the mechanism allowing the generation of creative ideas. A creative idea would be generated and evaluated in the same way a motor action would be controlled. The main difference with motor control of action, is that creative thinking acts in an unknown space since it concerns ideas not thought before. Thus, Dietrich and Haider (2015) conceive the creative idea as an abstract form of predictive processing ran by internal models, originally used for motor control of action. Direct models allowing the generation of various motor solutions in motor control of action, would likewise allow, in the case of creative thinking, to generate various hypotheses to reach a creative goal. Inverse model acting as a controller and a selection of the most adapted motor solution would allow, in the case of creativity, to select and evaluate the various hypotheses generated. In a drawing situation, the core of the creative drawing would be selected by inverse models as a goal to be reached. This goal would be based on known experience (knowing how to draw a house according to one's typical representation of a house), as well as on an unknown experience in order to generate a new and original idea. Direct models would generate several hypotheses for reaching this goal. Inverse models would be ran to evaluate and select the variation of ideas.

To summarize the theoretical proposals rooted in embodied framework, acting with fingers on a tablet would strengthen internal models of action due to the enrichment of incoming afference information. This would have two consequences: it would facilitate the prediction of sensory information necessary for the on-line control of the graphic action. It would also sustain the simulation of off-line action and thus facilitate the process of creativity by generating a wide range of motor actions to be executed.

Currently, no research has directly addressed the question of a possible link between direct fingertip feedbacks on tablet and creativity. However, various studies have investigated whether tablets could constitute a useful medium for drawings. Picard, Martin, and Tsao (2014)

investigated whether drawings differ qualitatively when executed on tablet with finger and on paper with a pen. They invited children aged 5-6 and 7-8 to produce “the best drawing of a house you can” on a tablet with finger and on paper with a pen. Quality of drawings was assessed by mean of a graphical scale developed by Barrouillet, Fayol, and Chevrot (1994) which measured how many drawing elements figuring on a house were realized. Results showed that houses drawn with pen on paper were richer, *i.e.* contained more elements, than the ones made on tablet with finger. The authors concluded to a facilitator effect of pen on paper use for drawing a house and stated against tablet benefits on drawings. However, they hypothesized that the facilitator effect of the pen could be related to a proximal-distal motor control maturation. They suggested that the poorer graphic performance observed in finger drawing would be the consequence of a difficulty for children to shift from a distal flexion/extension of the fingers involved in pen control to a more proximal control involving elbow and shoulder in finger drawing movements. Benefits of the pen for drawing skills could thus be specific to the young age of the population studied in this research.

The present study was aimed at determining if finger drawing on tablets can be beneficial for generating originality in drawings produced by adolescents aged 13-14. This age was chosen in order to avoid the proximal-distal age-dependent effect reported by Picard *et al.* (2014), since adults' performance in arm movement control is approached by 10-11 years of age (Chiappedi *et al.*, 2012). Moreover, studies have reported an improvement of off-line motor control of action generated through internal models of action, as it is the case for motor imagery, which is considerably improved due to an increase in visual and proprioceptive information integration (Choudhury *et al.*, 2007). Since creativity is conceived as a predictive processing rooted in sensorimotor control of action (Dietrich & Haider, 2015), the age of 13-14 years is suited to the goal of the present study.

We adapted our experiment from Picard *et al.*'s (2014) task by asking adolescents to draw a house with finger and stylus on tablet and with pen on paper. House drawing having been used in other drawing tasks with adolescents (Picard & Boulhais, 2011; Picard & Gauthier, 2012), proposing this topic to adolescents seemed relevant. However, contrary to Picard *et al.* (2014) who considered the number of elements in the drawings executed on tablet and on paper, we elaborated a rating scale to account for the originality of the drawings (details on this scale are presented in the Method section). This originality scale was inspired by Karmiloff-Smith (1990) in which she reported several types of changes operated between the drawing of something that exists and the drawing of something that doesn't exist. Each adolescent was invited to produce these drawings under two different instructions. They were asked to draw a house and to draw a house presenting something never seen before, that is a house with originality. For each adolescent, we compared originality in productions of a house drawn on tablet with stylus or with finger, or with pen on paper, to a house without any originality figured by a prototypical representation of the house. In accordance with the theoretical model of embodied representations used for creativity process (Dietrich & Haider, 2015; Pezzulo, 2011), it was expected that drawing with finger on tablet would lead to increase originality in drawings compared to those produced on the same device with a stylus or on paper with a pen. No differences were expected between drawings produced with a stylus on tablet or a pen on paper.

II. Method

II.1. Participants

Twenty-one voluntary adolescents aged 13-14 (mean age = 13 years, 7 months; SD = 5 months, 19 days) took part in the study. They were recruited from a 9th grade of a junior high school located in Normandy, France. They were enrolled in the study after receiving their written

inform consent as well as their parent's written authorization. No medical or paramedical issue were diagnosed for these teenagers.

II.2. Materials

Digital drawings were made on a Microsoft Surface Pro 4 tablet, 12.3" screen and 2736 x 1824 px resolution, with a Microsoft Surface Pen measuring 144 x 9.5 x 10.2 mm. Drawings were made on an app designed in our Laboratory, presenting a white surface on which it can be drawn with stylus or finger by tracing only black traits. Erasing function was not enabled on the app nor in the pen and paper condition. Paper sheets measuring the same size as the screen (260 x 175 mm), and a black pencil were used.

II.3. Procedure

Adolescents were observed individually in a quiet room of the junior high school. They sat down in front of a table (700 x 500 x 750 mm) where the tablet was placed. Each adolescent had to produce three original drawings of a house with finger on tablet, with stylus on tablet and with pen on paper and an unoriginal drawing of a house with a pen on paper. In order to counteract the difficulty and fatigability of drawing three original houses in a same session, we decided to cut the experimental procedure in two sessions based on the support used. In the first session, half of the adolescents produced two original drawings on the tablet after reading the following instruction: "Imagine that an architectural firm wants to offer you a job. They ask you, for your first job, to draw the more original house as possible with your finger thanks to a tablet. Following the production of this drawing, they ask you to draw another original house using the stylus". Once a first drawing was produced, it was removed before starting the execution of a new one. The other half of adolescents received the same instruction in a reverse order: they had first to draw an original house using a stylus and then using their finger. During

the instruction reading, the experimenter stood near the adolescent to help him/her in the understanding of the task if he/she needed to. The second session took place two months later. Placed in the same condition, each adolescent was asked to draw with a pen on paper, “a normal, simple house” referring to the unoriginal house and a house “the more original as possible”. Note that “normal” and “simple” were added to the instruction of the unoriginal drawing to be sure adolescents would make a distinction between the two conditions in order to draw a house without any kind of originality, referring to their own prototypical representation of what an existing house is. Unoriginal drawings made on paper with a pen were used to control for interindividual prototypical representations of a house drawing. The logic was to consider as being original in the drawings, any original modification in comparison of a prototypical house (according to the scale) that was not present in the drawing of a unoriginal house. A delay of two months between sessions was chosen to prevent adolescents’ weariness or training effect in original drawing which could both affect their drawings made on paper. This second session included two different instructions (original and unoriginal) but with a same support (pen on paper). Since the unoriginal drawing was used as a control to assess originality in original drawings, and because Karmiloff-Smith (1990) did not observe instruction order between drawings of something that exists and something that doesn’t exist, we decided to randomize the order of presentation of the two conditions in our experiment.

II.4. Coding

A total of 84 individual electronic (42) and paper (42) drawings were collected for analysis. The core elements coded in each drawing were inspired from those presented in the rating scale created by Barrouillet *et al.* (1994) in order to identify, in a same age group, prototypical elements represented in the drawing of a house. From the drawings of a house realized by children aged from 3 to 11 years, 21 items were represented in more than 30% of the drawings

and were thus retained. These items concerned 11 following elements of the house: base, roof, windows, door, panes, path, chimney, shutters, curtains, attic room and door handle. However, using this scale to assess the best house drawn on tablet and on paper by children aged 5-6 and 7-8 years old, Picard *et al.* (2014) showed that, whatever the support used (paper or tablet), path, chimney, curtains, attic room and shutters were drawn in less than 50% of the drawings, which raises the question of the definition of these items as original or prototypical. To our knowledge, this question remains unsolved. Therefore, we decided to not consider these 5 elements for the analysis of the drawings. It means that, although not present in the prototypical house, adding these items in the original drawing was not rewarding any points regarding the originality rating scale. In the same way, because Barrouillet *et al.* (1994) didn't give precise indications except for its presence, door handle was not considered as a core element to be coded in the rating scale, although its prevalence was about 70% in digital drawings (Picard *et al.*, 2014). A total of 5 core elements (base, roof, windows, door, and panes) were thus considered in our scale.

These 5 core elements were used to define a prototypical house (Figure 1) corresponding to the description of elements in the scale of the house drawing proposed by Barrouillet *et al.* (1994). As described in Barrouillet *et al.* (1994), the prototypical house was defined as follows. It included a rectangular base (at least 3 rectilinear segments) with a rectangular door (at least 3 rectilinear segments) at its bottom center, and two squared windows upstairs, one on the left, one on the right, horizontally aligned and with no side of the base or the roof considered as the 4th segment. Windows proportions should be between 1/4 and 1/6 of the height and width of the facade, and panes represented as a cross inside each window. On top of the rectangular base should be a triangular or trapezoidal roof, measuring the same width than the base.

In addition to the description of the prototypical house according to Barrouillet *et al.* (1994), details were added to be able to assess modifications more precisely. Therefore, we precised door's size as being proportioned with base's size, such as the door couldn't be longer or larger than the base, as well as panes couldn't be proportionally longer or larger than window's height and width. Because our study aimed at tracking originality modifications in the house rather than developmental representation of a prototypical house, the bottom of the surface (paper or tablet) could be considered as the 4th rectilinear segment of the base, as well as the bottom of the base could be considered to complete the 4 rectilinear segments for the door, in the opposite of Barrouillet *et al.* (1994).

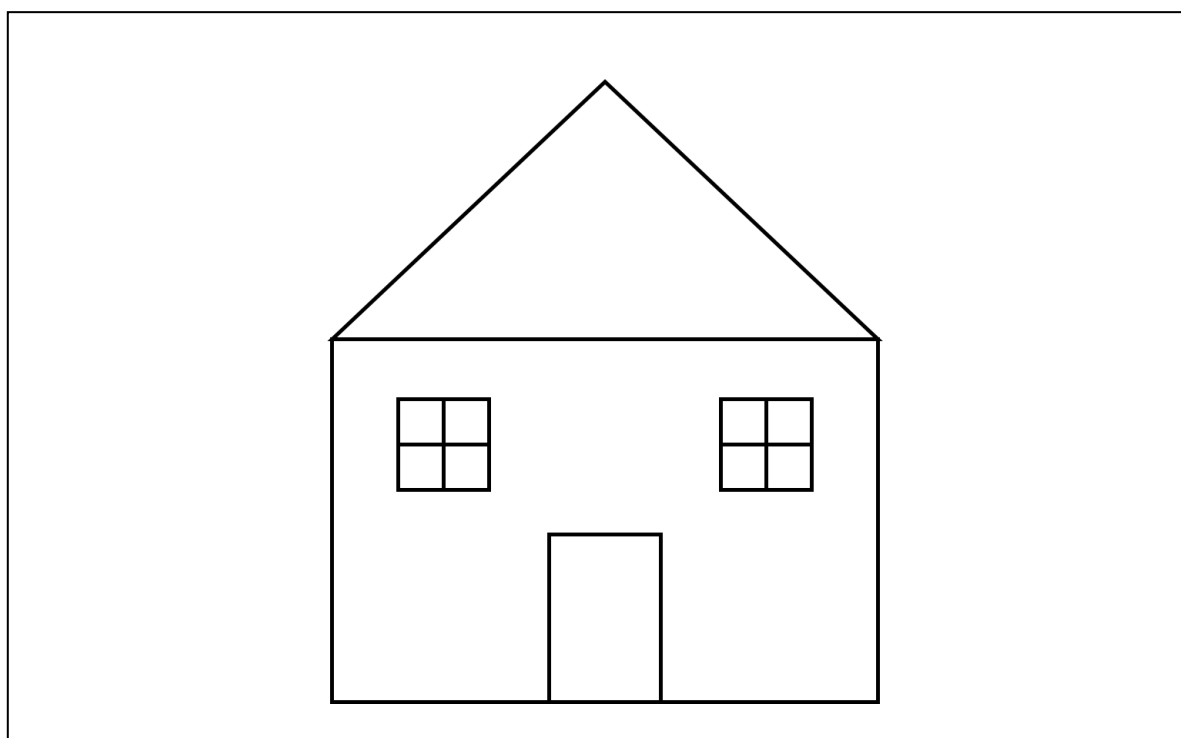


Figure 8. Example of a prototypical drawing of a house according to the 5 items (base, roof, windows, door, and panes) considered in our scale.

Figure 8. Exemple d'un dessin prototypique d'une maison selon les 5 items (base, toit, fenêtres, porte, et vitres) considérés dans notre échelle.

This prototypical house was used to assess any original graphical changes observed in the drawings produced by the adolescents according to the seven categories of graphical changes

observed by Karmiloff-Smith (1990) for the drawing of something (house, man or animal) that does not exist:

- addition and deletion of elements (*e.g.* 3 doors instead of 1, or no door at all);
- modification operated on the shape of elements (*e.g.* a circular roof instead of a triangular roof);
- modification operated on the size of elements (*e.g.* a window two times bigger than the house's roof);
- insertion of new elements (*e.g.* towers added to house's base);
- position, orientation, and perspective modifications of elements or the whole drawing (*e.g.* a door and window inverted, or the house placed upside down);
- cross-conceptual categories modifications of the whole drawing (*e.g.* an animal-shaped house);
- modifications operated on the shape of the whole drawing (*e.g.* a circle-shaped house).

Note that the first category, “addition of new elements” refers to the simple replication of an already existing element (*e.g.* 3 doors instead of 1), while the fourth category “insertion of new elements” refers to the addition of something new about an element (*e.g.* towers added on the base).

These seven categories considered as well global modifications occurring on the whole drawing as local modifications that concerned isolated elements of the drawing. Local modifications concerned the 5 core elements of a house drawing. As an exception, the category “insertion of new elements” included in addition to the 5 core elements, an item “others”, in order to award every new idea added by the adolescents, even if it concerned elements drawn outside of the house (for example, flying fishes around the house).

For each modification operated on elements (local modifications), 0.5 point was assigned. Each global modification was awarded the double, *i.e.* 1 point, since it concerned larger modifications than those consecutive to a local element modification. Only one exception to this was for “position, orientation, and perspective” category that was rated 1.5 points since it concerns simultaneously local and global modifications. For example, “position change” would necessarily concern at least 2 elements (let’s say, exchanging the position of windows and door) which would result in a strongly increased originality score. This category was awarded 0.5 point for a local modification, no matter the number of elements, and 1 point for a global change concerning the whole drawing (for example, upside-down house).

Table I sums up the characteristics of the rating scale. Each drawing could be rated from 0 to 14. Note that the originality scale covers large possibilities of modifications such that adolescents probably won’t make use of all of them in one drawing.

Table 5. Rating scale used to assess originality in drawings

Tableau 5. Echelle de cotation utilisée pour évaluer l'originalité des dessins

Graphical change	Definition	Type of change	Awarded points (min-max)
Deletion/addition Fig. 2 & 3	Element of a prototypical house (base, roof, windows, door, and panes) replicated or deleted	Core element	0 – 2.5
Shape of elements Fig. 3	Element (base, roof, windows, door, and panes) whose shape was different from the prototypical house	Core element	0 – 2.5
Size of elements Fig. 4	Element (base, roof, windows, door, and panes) whose size was different from the prototypical house	Core element	0 – 2.5

Insertion of new elements Fig. 5	New element (at the level of base, roof, windows, door, panes or others) which were not present on prototypical house	Core element	0 – 3
Position, orientation, and perspective Fig. 6	Elements (base, roof, windows, door, and panes) and/or the whole drawing different in position, orientation, and perspective from the prototypical house	Core element and on the whole	0 – 1.5
Cross-conceptual category Fig. 7	Whole drawing presenting insertions crossed with other conceptual categories (trees, animals, technology, ...)	On the whole	0 – 1
Form of the whole Fig. 8	Drawing whose whole form was not prototypical-house-like shaped	On the whole	0 – 1
		TOTAL	0 - 14

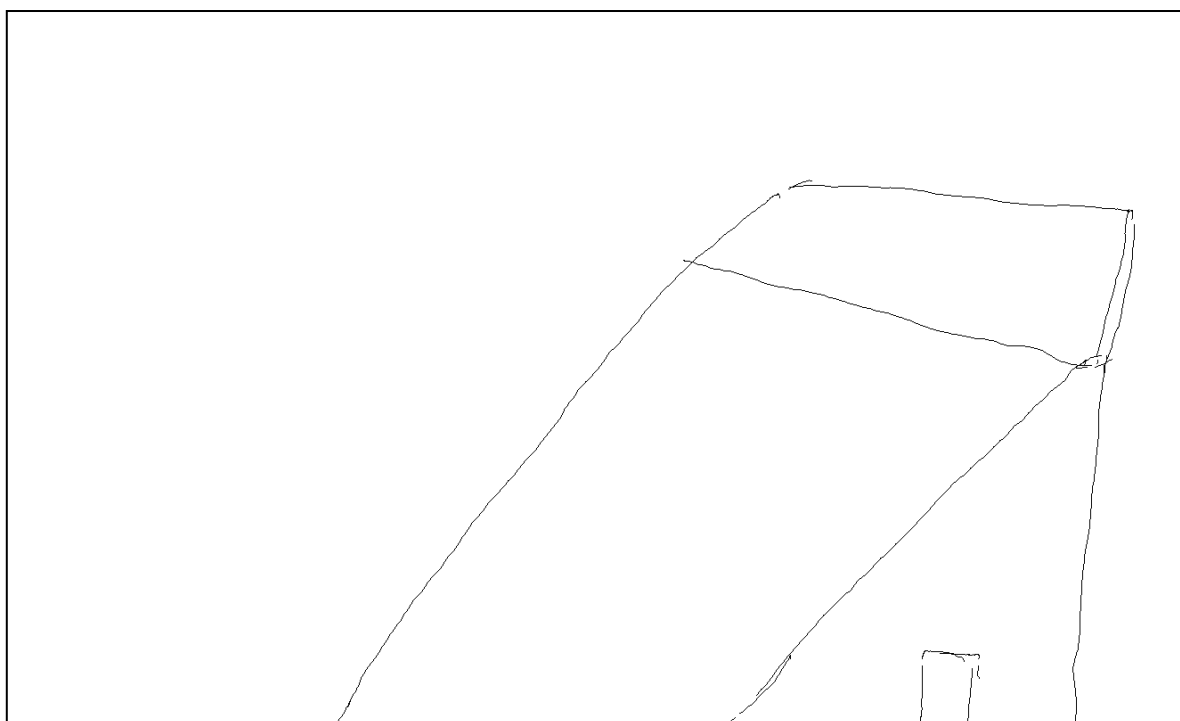


Figure 9. Example of deletions in finger drawing on tablet: compared to the prototypical house, windows have been deleted.

Figure 9. Exemple de suppressions dans un dessin réalisé au doigt sur tablette : comparé au dessin prototypique, les fenêtres ont été supprimées.

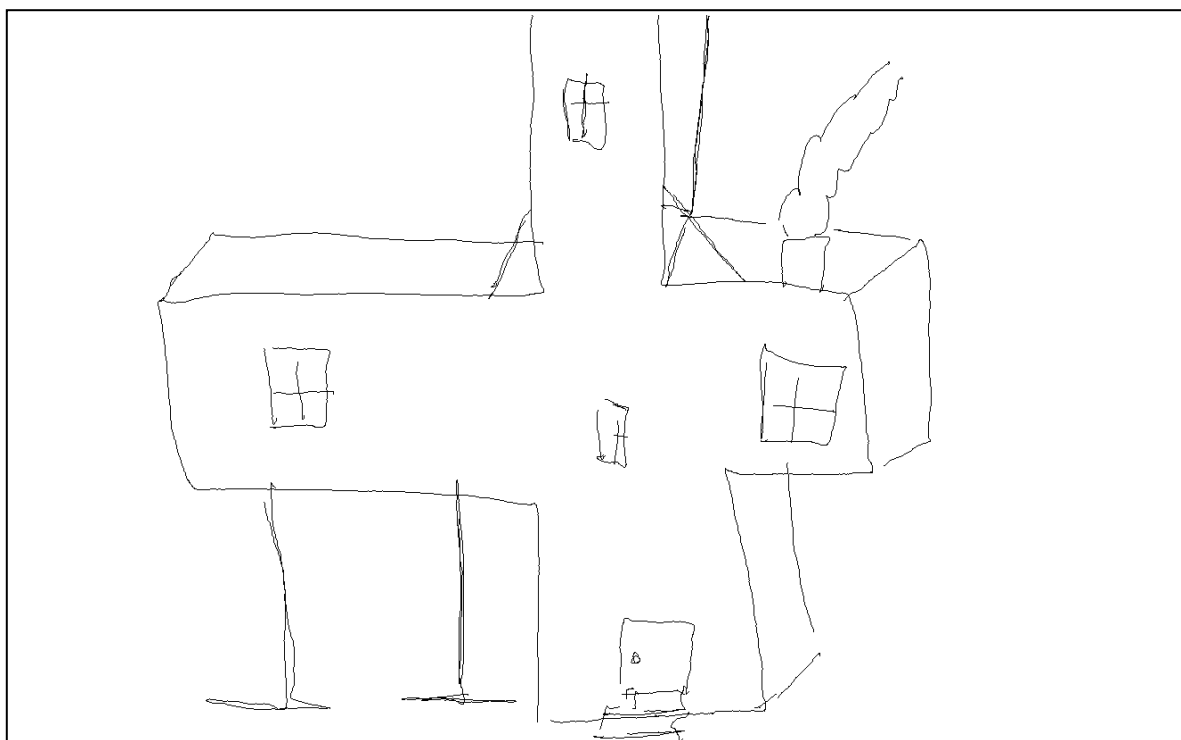


Figure 10. Example of additions and shape modification of elements in finger drawing on tablet: compared to the prototypical house, windows have been added (4 instead of 2) and the shape of the base has been modified (crossed form instead of a rectangular form).

Figure 10. Exemple d'additions et de modifications de forme des éléments dans un dessin réalisé au doigt sur tablette : comparé au dessin prototypique, les fenêtres ont été ajoutées (4 au lieu de 2) et la forme de la base a été modifiée (forme de croix au

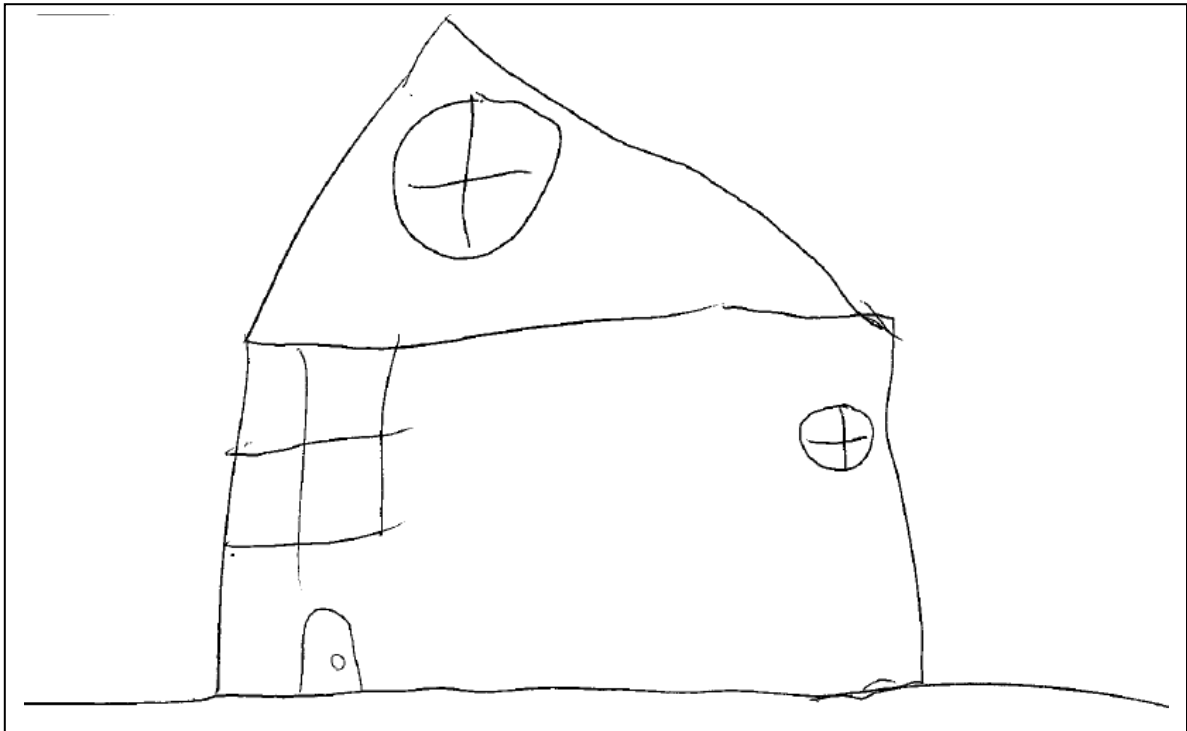


Figure 11. Example of size and shape modifications on elements in pen on paper drawing: compared to the prototypical house, the size of a window (on the left) has been modified, and shape of the other window (on the right) has been modified.

Figure 11. Exemple de modifications de la taille et de la forme des éléments dans un dessin réalisé au stylo sur papier : comparé à la maison prototypique, la taille d'une fenêtre (sur la gauche) a été modifiée, et la forme de l'autre fenêtre (sur la droi

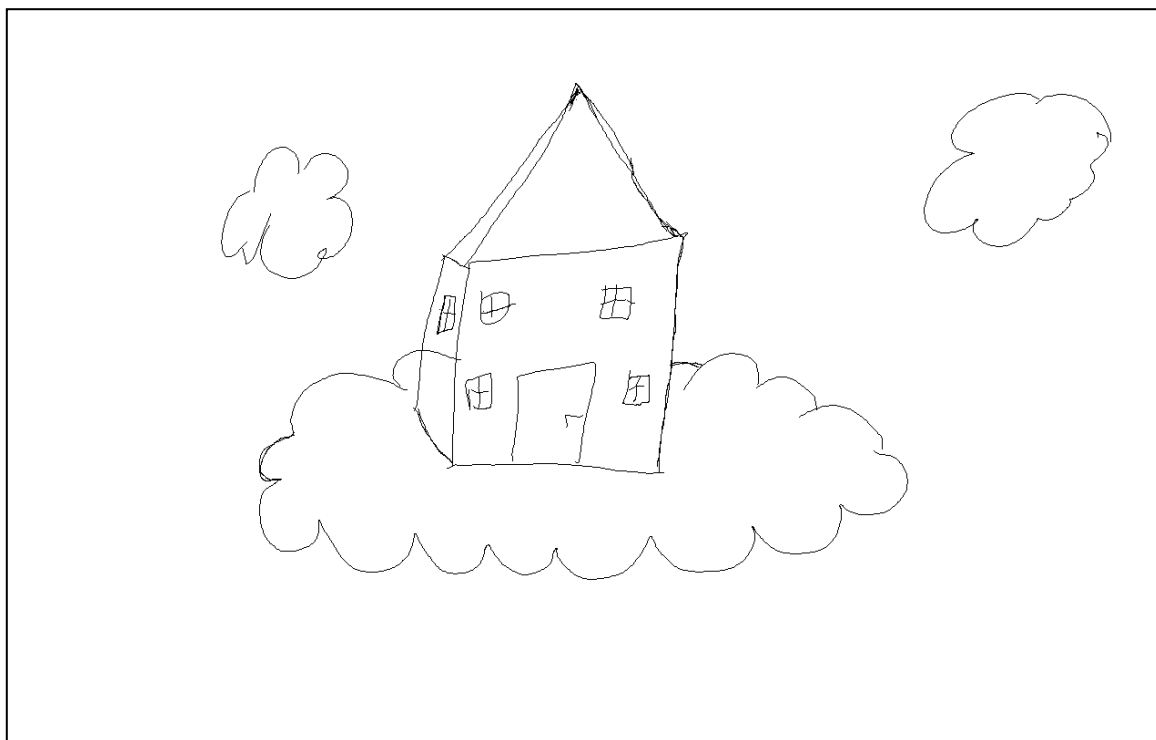


Figure 12. Example of insertion of new elements in stylus drawing on tablet: compared to the prototypical house, clouds have been added to the drawing ("others" element).

Figure 12. Exemple d'insertion de nouveaux éléments dans un dessin réalisé au stylet sur tablette : comparé au dessin prototypique, les nuages ont été ajoutés au dessin (élément « autres »).

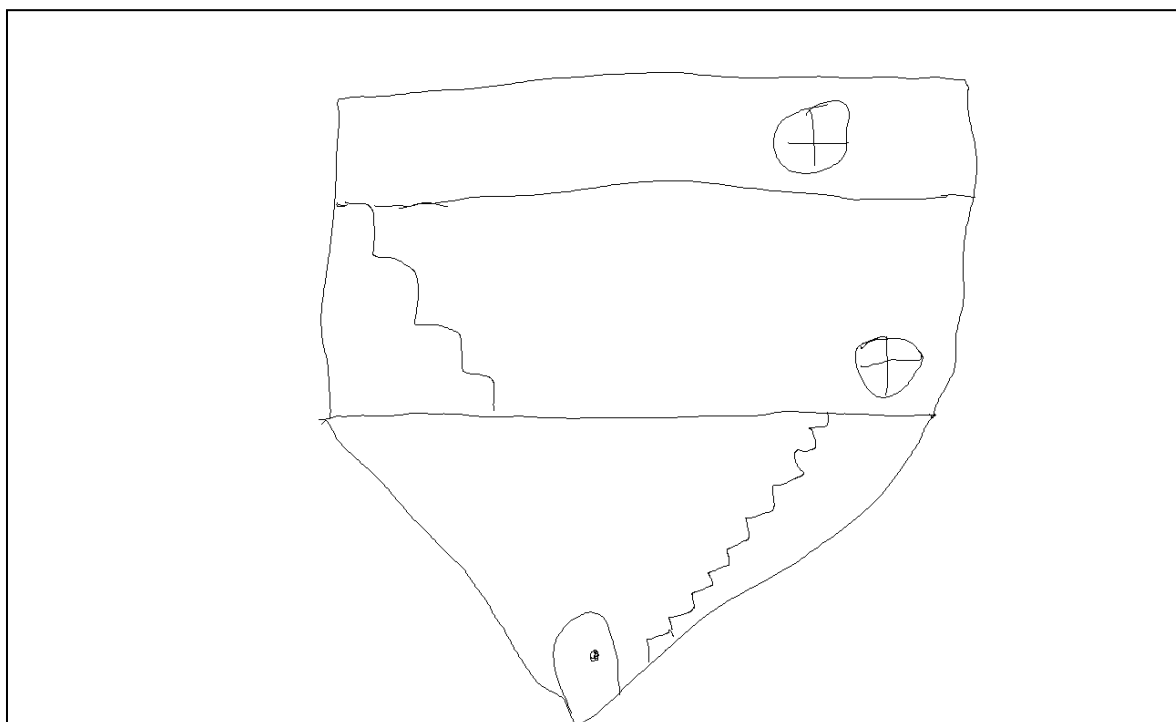


Figure 13. Example of global position modification in stylus drawing on tablet: compared to the prototypical house, position of the whole house has been changed and placed upside-down.

Figure 13. Exemple de modification de position globale dans un dessin réalisé au stylet sur tablette : comparé au dessin prototypique, la position de l'ensemble de la maison a été changée en la retournant.



Figure 14. Example of cross-conceptual modification in pen on paper drawing: compared to the prototypical house, this drawing includes cross-category insertion such that components of different categories (tree and house) appear in the drawing.

Figure 14. Exemple de modification inter-conceptuelle dans un dessin réalisé au stylo sur papier : comparé à la maison prototypique, ce dessin inclut une insertion inter-catégorie de telle sorte que les composants propres à différentes catégories (arbre e

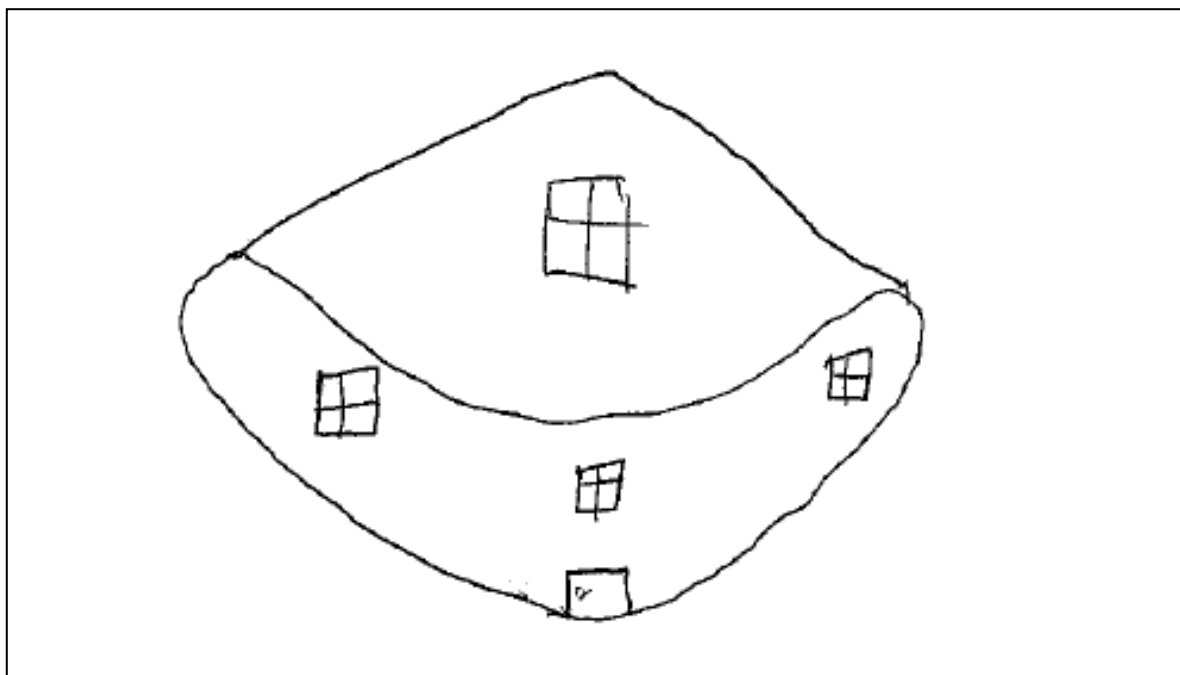


Figure 15. Example of modifications operated on the form of the whole in pen on paper drawing: compared to the prototypical house, the whole drawing was not prototypically house-like shaped.

Figure 15. Exemple de modifications opérées sur la forme générale dans un dessin réalisé au stylo sur papier : comparé à la maison prototypique, le dessin dans son ensemble ne correspondait pas à la forme d'une maison prototypique.

Four originality scores were thus calculated using the rating scale (Table I), one for each original drawing executed on tablet with finger, with stylus, and on paper with a pen and one for the unoriginal drawing executed on paper with a pen. For each adolescent, originality score of each original drawing made on tablet with finger and stylus and on paper with a pen was defined by the sum of originality points attributed to the original drawing in comparison of the prototypical house, minus the originality points obtained for the same items in the unoriginal drawing made on paper. Therefore, for each production of an adolescent, every point awarded to items that were already considered by the scale as original on the unoriginal drawing made on paper were thus deleted from all original drawings. This allowed to control adolescent's subjective bias of what is or is not considered as originality. This procedure of control is devoted to avoiding a bias in the calculation of originality score which could be artificially increased,

by considering as original elements presented in the unoriginal house drawing. For example, as shown in Figure 9, if an adolescent drew circle windows in the original house instead of rectangular ones as mentioned in the prototypical house, no points were awarded since circle windows were also drawn in the unoriginal house. It allows to filter in original drawings, elements that differ from unoriginal drawings. The calculation of originality score in drawings was thus consistent with the definition of originality, that is, the capacity to assess and select a novel idea among all other own ideas, depending on the acquired knowledge, *i.e.* what adolescents know about what is a “simple, normal” house (Lubart & Georgsdottir, 2004; Runco, 1991).

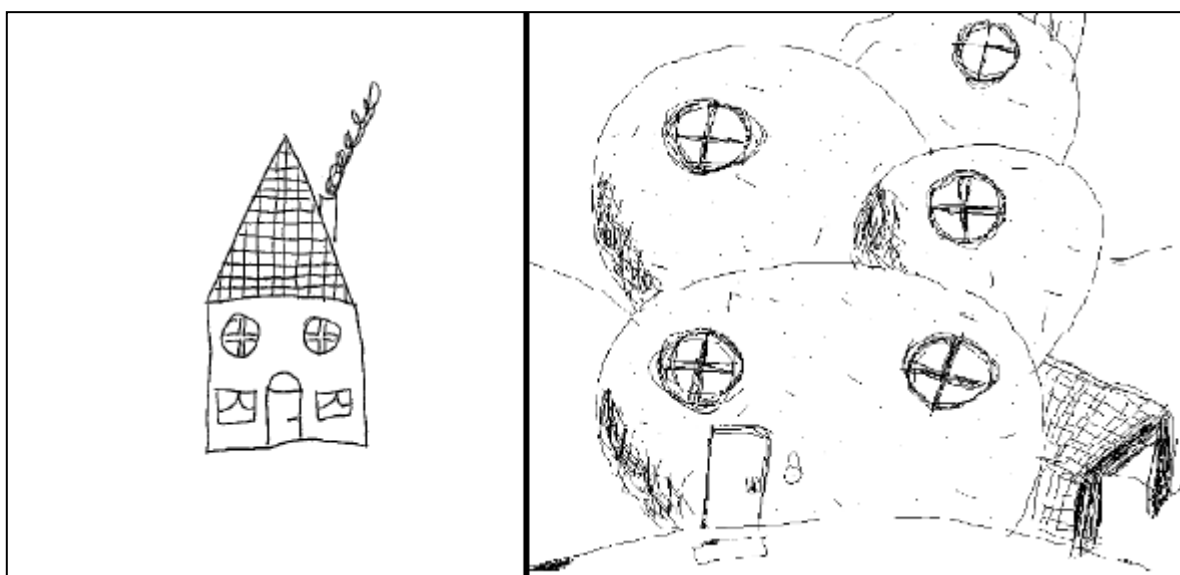


Figure 16. Example of coding of the unoriginal drawing with a pen on paper (on the left) compared to original drawing with finger on tablet (on the right) for a same adolescent: 0.5 point initially awarded for circle windows in the original drawing were withdrawn from originality score.

Figure 16. Exemple de cotation d'un dessin non-original réalisé au stylo sur papier (à gauche) comparé au dessin original réalisé au doigt sur tablette (sur la droite) pour un même adolescent : 0,5 point attribué initialement pour les fenêtres rondes dans

II.5. Data analysis

To make sure that instructions were well understood, an interrater agreement score was calculated among original and unoriginal drawings from all supports. Two naive observers were

asked to categorize the drawings as being original or unoriginal. Cohen's Kappa showed a strong inter-reliability agreement between the two raters ($K = .855$), showing that even if originality can be quite subjective, the instruction given to adolescents led them to produce original drawings.

Prior to any statistical analysis, normality (Shapiro-Wilk test) and sphericity of variance (Mauchly's test) of the distributions of originality scores were tested in order to control that parametric analysis could be used to evaluate originality performances in drawings. The tests confirmed the Gaussian nature of data of variances for originality scores of productions realized with finger on tablet ($W = .93, p = .17$), with stylus on tablet ($W = .97, p = .80$) and with pen on paper ($W = .91, p = .06$). The sphericity condition was also met, as assessed by Mauchly's Test of Sphericity, $p = .168$. Originality scores of drawings made by each adolescent on tablet with finger, stylus, and on paper with a pen were thus compared by mean of a repeated measures ANOVA with tool presentation order (01: finger then stylus; 02: stylus then finger) as between-group factor, and tool used (finger on tablet versus stylus on tablet versus pen on paper) as within-group factor. In addition, we performed Cochran analyses to investigate whether occurrence of graphical transformations varied according to the drawing conditions.

III. Results

Analyses were conducted in order to determine whether each category of transformation was equally used when adolescents drew original house with finger, stylus, or pen. Using Cochran's Q test, we carried out a first analysis to determine whether, all elements of the house being confounded, a drawing condition favored more specifically a category of transformation. Results revealed that, although the 7 categories of transformation were observed in the three drawing conditions (Table II), only two out of the seven considered were not equally observed

across the three drawing conditions. Adolescents modified more the size of elements when drawing with finger on tablet (46.67%) and with stylus on tablet (37.14%) than when drawing with pen on paper (22.86%), $Q(2) = 17,92$; $p = .00013$. Adolescents made more insertion of new elements for drawings made on tablet with finger (26.98%) and with stylus (26.19%) than for drawings made on paper with a pen, (16.67%), $Q(2) = 8,26$; $p = .016$.

We then examined occurrence of each category of transformation for each element of the house (see Table II) according to the drawing conditions (finger, stylus, and pen). Among the 7 categories of transformation, the only significant change was observed for the size of element concerning the door, $Q(2) = 6.5$, $p < .03$. As can be seen in Table II, the size of the door was less frequently changed in drawings made with pen on paper (5%) compared to drawings made with finger on tablet (38%) or with stylus on tablet (29%). No other significant differences were observed, revealing a comparable occurrence of all other categories of transformation for each drawing condition.

Table 6. Occurrence (percentage) of each item of originality scale as a function of drawing condition of the house drawing

Tableau 6. Occurrence (pourcentage) de chaque item de l'échelle d'originalité en fonction de la condition de dessin de la maison

	Finger	Stylus	Pen
I - Deletion or addition of elements			
0 - All elements confounded	34,28	38,09	33,33
1- Base	19	24	10
2- Roof	38	33	29
3- Windows	71	76	71
4- Doors	5	14	19
5- Panes	38	43	38
II - Shape of elements			
0 - All elements confounded	39,04	28,57	34,28
1- Base	52	52	48
2- Roof	43	33	48
3- Windows	67	38	52
4- Doors	24	5	14

5- Panes	10	14	10
III - Size of elements			
0 - All elements confounded*	46,67	37,14	22,86
1- Base	67	57	48
2- Roof	38	24	19
3- Windows	71	52	33
4- Doors*	38	29	5
5- Panes	19	24	10
IV - Insertion of new elements			
0 - All elements confounded*	26,98	26,19	16,67
1- Base	52	57	43
2- Roof	43	33	14
3- Windows	14	14	10
4- Doors	19	19	5
5- Panes	0	0	0
6- Others	33	33	29
V - Position, orientation and perspective modifications			
0 - All elements confounded	14,28	11,9	4,76
1- On the whole	0	5	0
2- On elements	29	19	10
VI - Cross-conceptual categories modification			
On the whole	29	29	24
VII - Form of the whole			
On the whole	43	33	38

(*item for which a significant change was observed between drawing with finger, stylus or pen with Cochran Q test)

(*item pour lesquels un changement significatif a été observé entre les dessins réalisés au doigt sur tablette, au stylet sur tablette, ou au crayon sur papier, avec le Q de Cochran)

An ANOVA was performed in order to determine whether originality score varied according to drawing conditions. The ANOVA did not reveal a significant effect of the order of presentation of the tool used on tablet (01: finger then stylus; 02: stylus then finger), $F(1, 19) = .69$ $p = .42$. The interaction between tool used and order of presentation of the tool was not significant, $F(2, 38) = .38$ $p = .68$. As shown in figure 10, the ANOVA revealed a significant effect of the used tool (finger on tablet, stylus on tablet, pen on paper) on originality scores, $F(2, 38) = 13.98$, $p = .00003$, $\eta_p^2 = .42$, with originality score being higher for drawings

produced on tablet with finger ($M = 4.05$, $SD = 1.82$), than with a stylus ($M = 3.52$, $SD = 1.82$), drawings produced with a pen on paper giving rise to the lowest originality score ($M = 2.81$, $SD = 1.78$). Post hoc Bonferroni test revealed that original scores for drawings produced with finger on tablet differ significantly from original scores for drawings produced with a pen on paper, $p = .00016$ (Figure 10). Scores for drawings on tablet with a stylus also differed from scores for drawings on paper, $p = .012$. Original scores of drawings produced with finger on tablet did not differ significantly from drawings produced with a stylus on tablet, $p = .093$.

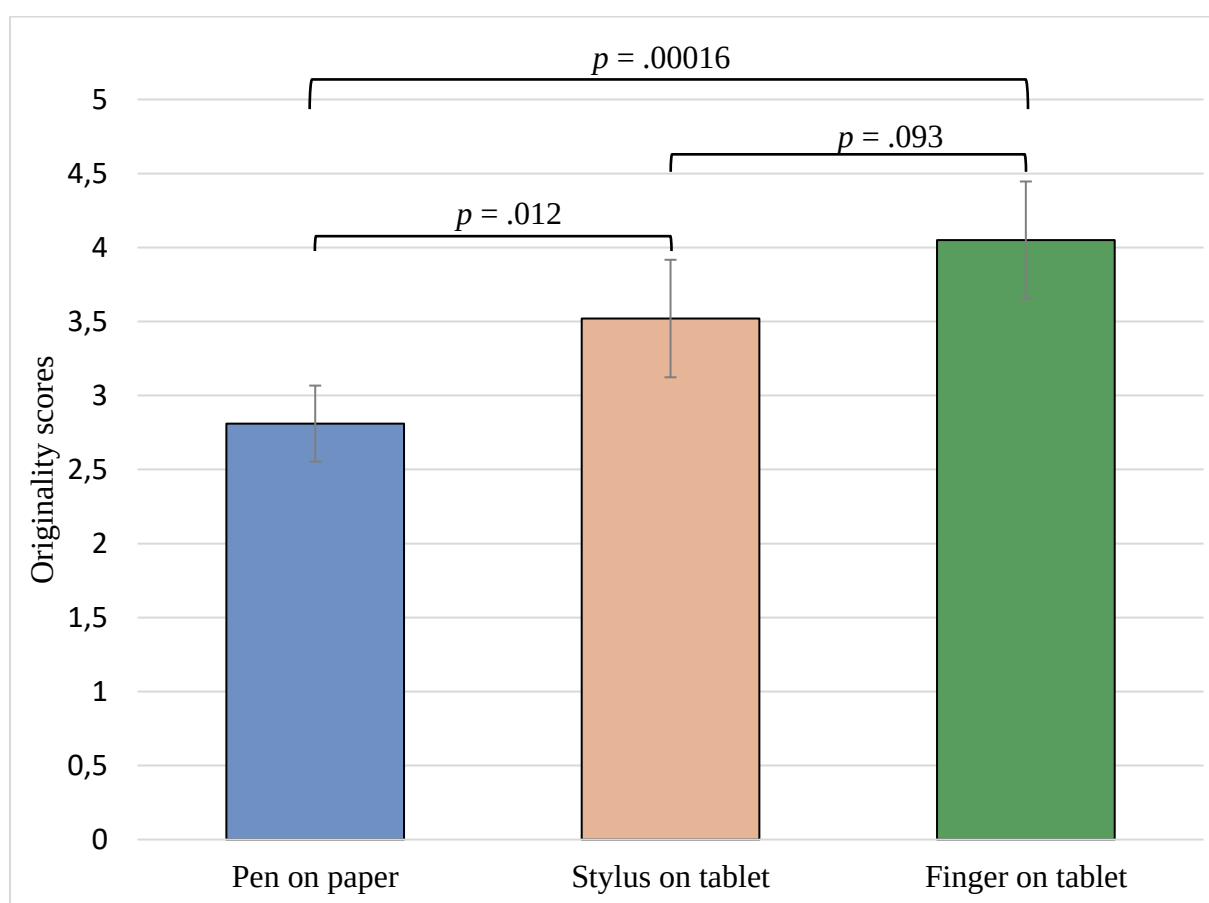


Figure 17. Originality scores (mean and standard errors of mean) according to the drawing device (pen on paper, stylus on tablet, finger on tablet).

Figure 17. Scores d'originalité (moyenne et erreur standard de la moyenne) en fonction du dispositif utilisé (stylo sur papier, stylet sur tablette, doigt sur tablette).

IV. Discussion

The present study was aimed at determining if the use of tablets could be beneficial for original drawings produced by adolescents aged 13-14. Creativity being conceived as a predictive processing rooted in sensorimotor control of action, we expected that using tablet with finger would expand drawing originality, that is the novelty of creative ideas in the drawing. More precisely, thanks to an increase of proprioceptive afferent information, internal models for the on-line control of action would be enriched leading to an improvement of simulation process used for the creative process. This effect was not expected for drawings made on tablet with a stylus because it was predicted, in the opposite of finger use, to lessen proprioceptive feedbacks (Alamargot & Morin, 2015). Results were obtained on a small sample of adolescents and must therefore be analyzed with caution. Results revealed that the production of original drawings led to a variety of graphical modifications observed as well when adolescents drew with finger on tablet, with stylus on tablet and with pen on paper. In other words, even if modification of the size of elements and insertions of new elements were more used when drawing on tablet than on paper, each drawing condition was equally likely to induce the seven categories of modification we scored. In spite of it, and in accordance with our main hypothesis, finger drawing on tablet led to a higher originality score than drawings made with a pen on paper. However, drawing with a stylus also led to higher originality score compared to drawings made with a pen on paper. Originality score obtained from drawings made with finger on tablet did not differ from the ones made with stylus on tablet. Each result is discussed in turn.

IV.1. The positive effect of drawing with finger on a tablet: a difference with pen drawing on a paper

In line with our main hypothesis, adolescents were more original when drawing on tablet with their finger rather than on a paper sheet with a pen, since originality scores were higher for drawings made with finger on tablet than for drawings made with pen on paper. This result

contrasts with those reported by Picard *et al.* (2014) who recorded lower performances with finger on tablet than with pen on paper when children were asked to draw “the best house as possible”. Two reasons could explain this difference. On a first place, considering the younger age of the participants involved in the study of Picard *et al.* (2014), the poorer results obtained by children aged 5-6 and 7-8 years when drawing with fingers could be related to the motor strategies involved by the task. As a matter of fact, Picard *et al.* (2014) suggested that children had some difficulties when drawing with fingers because it involves elbow and shoulder movements which are less mature than movements of the wrist involved when drawing with a pen. In accordance with the work of Chiappedi *et al.* (2012) showing that upper limb motor trajectories reach adult performance by the age of 11, it could be suggested that by 13/14 years, wrist, elbow, and shoulder movements can be performed with a comparable accuracy. On a second place, the difference observed between the two studies could be a consequence of the degree of mastery of touchscreen devices. Picard *et al.* (2014) suggested that training tablet use for the children observed in their study may have countered negative results obtained in the situation of finger drawing. The question of training may not concern teenagers in the same way. As reminded in the introduction section, mobile touchscreen devices such as smartphones and tablets are well-known among teenagers of occidental society since up to 84% of 13-14 years old adolescents make use of it in their daily life (Rideout, 2016). But the use of tablets may not be mastered by children aged 3 to 8 years for whom mobile devices are used once a day for only 27% of 2 to 4 years and 37% of 5 to 8 years (Rideout, 2017). A training session may thus be necessary for children before evaluating how they performed with these devices. Patchan and Puranik (2016) observed that when 3 to 6 years old children were trained to write on tablet, they performed better when writing with finger than with a stylus or a pen on paper. Authors concluded that when discharged from pen control, young children learned to write more easily thanks to an enrichment of sensorial feedback when writing with finger on tablet.

In the present research, it can be concluded that the tablet's positive effect on originality in drawings made with finger highlights the enrichment of tactile information in the generation of original traces. Compared to children aged 5-6 and 7-8 years, adolescents do not only present mature arm movements, or higher familiarity with touchscreen use, they are also in a different period of motor control. Since the seminal work of Hay (1978), it is now established that, by 9/10 years, children are able to integrate proprioceptive and visual information leading to the development of feedforward motor control of action. In consequence, by 13 years, internal models for the control of on-line action are well developed (Choudhury *et al.*, 2007; Smits-Engelsman, & Wilson, 2013). Drawing with finger increases the proprioceptive information used for the formation of internal models of action. According to our hypothesis, this feedforward motor control ensures prediction possibilities involved in creativity (Dietrich & Haider, 2015). Thus, the positive effect of finger drawing on tablet in a creative task may be explained by a richer mobilization of the simulation process of actions as a consequence of richer proprioceptive information, allowing to generate a wide range of motor actions to be executed. The positive effect of drawing with finger on tablet thus confirms the link between on-line control of action (with proprioceptive feedback) and the simulation process linked to creativity.

IV.2. The stylus effect in original drawing

Surprisingly, results revealed that acting with a stylus on a tablet also enhanced originality. When drawings were performed with a similar tool on a different surface (a pen on paper), higher originality scores were observed for drawings made with stylus on tablet compared to those made with a pen on paper. We did not expect this effect, based on previous studies reporting a negative effect of writing on tablet with a stylus (Alamargot & Morin, 2015; Gerth *et al.*, 2016). These studies showed that when acting with a stylus, the low-friction surface of a

tablet induces a modification of proprioceptive feedbacks to control movement. Authors reported that this sliding effect disturbs handwriting on a smooth surface such that the legibility of letters is diminished. Children and adolescents (Alamargot & Morin, 2015; Guilbert, Alamargot, & Morin, 2019) compensate the loss of proprioceptive information needed to control writing movement by amplifying their movement (they produce bigger letters) and increasing pen velocity. More precisely, Alamargot and Morin (2015) showed that writing with a stylus on tablet differently affected movement execution according to the age of participants: children aged 7/8 years increased their pauses (and thus increasing duration of movement) whereas by 10/11 years, children increased pen pressure and pen speed. Gerth *et al.* (2016) also reported that experimented users including adults compensate the lower friction between stylus and tablet surface by increasing pressure and letter size. These kinematic changes observed before and after 8 years old are linked to a switch in the motor control of action with age, with children using a backward motor control for movements up to 8 years old and then using a feedforward motor control of action. After 8 years old, the sliding effect of the tablet would be compensated by the use of feedforward motor control of action (Guilbert *et al.*, 2019). Thus, during handwriting tasks which call on automatization of motor programs, more experienced users compensated the loss in proprioceptive feedback by using feedforward strategies, that is by relying more on the prediction of the ongoing action (Guilbert *et al.*, 2019; Kandel & Perret, 2015).

In the context of a drawing task, it could be suggested that the ability of children older than 11 years to rely on feedforward strategies when acting on the tablet to compensate for the loss of proprioceptive information could foster creativity during the drawing task, by enhancing the variation-to-selection process of the generation of creative ideas, operating on the same model than for off-line simulation of actions (Dietrich & Haider, 2015; Valtulina & de Rooij, 2019). This hypothesis would be consistent with our results showing benefits in originality of the

drawing when using stylus on tablet instead of a pen on paper. We suggest that, in an original drawing task, the sliding effect required a compensation by simulation of actions, which supported creativity since both simulation and creativity processes borrow the same path. The simulation process being over-mobilized when the user is disturbed by the smooth surface also allows to boost creativity process in a drawing task.

IV.3. Finger and stylus

Results from the present study showed no significant difference between drawings made with finger and drawings made with stylus on tablet. However, although this result remains tendential and needs to be confirmed with a larger sample of participants, it highlights our interpretation of a compensating effect of simulation process when using a stylus. Drawing with finger would lead to better performances in originality than with pen on paper because this situation would foster feedforward motor control thanks to an enrichment of proprioceptive feedback. Drawing with a stylus would also lead to better performances in originality than with pen on paper because this situation would make adolescents rely more on feedforward strategies to compensate for the loss of proprioceptive feedbacks due to the sliding effect of the stylus on the smooth surface. The smooth surface of tablets would then allow a major use of feedforward strategies in the control of actions, borrowing the same mechanisms than the ones leading to creativity process (Dietrich & Haider, 2015). Tablet's positive effect on originality in a drawing task with finger and stylus would then be explained by the increased use of simulation that would facilitate the process of creativity by generating a wide range of motor actions to be executed. Creativity, mobilizing simulation process, is thus fostered when the prediction mechanism is urged by an increase of kinesthetic information (finger situation) and when this prediction mechanism is essential to compensate for a kinesthetic loss (stylus situation).

Future research should track and compare kinematics of movement in the three different drawing conditions proposed in the present research to explore further the prediction mechanism that should, as suggested by our hypothesis, be enhanced when acting on a tablet with finger but also with a stylus, compared to drawings executed on paper with pen.

IV.4. Limitations

Main limitation of the study could be seen in the procedure used to control for order effect. It could be suggested that the difference observed between drawings made on tablet (either with fingers or with stylus) and drawings made on paper could be related to the order of execution of each drawing. Because drawing on paper was performed after drawing on tablet, adolescents could have got tired or less inspired for the production of something completely different from what they produced during the first two trials on tablet. To avoid this possibility, adolescents were asked to produce the two versions of a house (original and unoriginal) on paper two months after their drawings on tablet. Against the argument of an order effect of execution of drawings on paper or on tablet, no order effect on originality score was observed for drawing on tablet. Order of presentation of drawings made on tablet with finger or stylus did not affect the original score: whatever adolescents drew first with stylus or with finger, original scores were not significantly different between the two conditions. Since no order effect was observed for two successive drawings executed in a same session, it could hardly be expected that an order effect would have affected the production of drawings executed with an interval of two months. One constraint of the present study comes from the use of a non-standardized scale inspired from studies with children, to assess general creativity in drawings produced by adolescents. Indeed, our scale was based on a few studies tracking house drawing and originality of children rather than of adolescents (Barrouillet *et al.*, 1994; Picard *et al.*, 2014; Karmiloff-Smith, 1990). Although graphical procedures have been widely studied in pre-school

and school children since the first description of Luquet (1927), graphical procedures used by teenagers should be better known in order to better appreciate their variation in the context of original drawing. Future research should emphasize this point independently from any creative context.

V. Conclusion

To conclude, this study contributes to a better understanding of tablet use on drawing creativity. This work was based on the theoretical propositions of Dietrich and Haider (2015) according to which creativity is rooted in the process of motor simulation such as direct models would be used for generating new ideas and inverse models for evaluating and selecting the variation of ideas.

We hypothesized that tablets would foster originality thanks to off-line simulation this device would promote. In line with this idea, we observed that when adolescents were placed in situations that either reduced (when using a stylus) or enhanced (when drawing with finger) proprioceptive information, originality scores were higher than when drawing with a pen on paper. Using fingertip on the interface gives rise to an enhancement of the direct feedback that is extended to off-line simulation thanks to internal loop (Wolpert & Kawato, 1998). When using the stylus, off-line simulations are solicited to compensate for a loss in proprioceptive information in the direct feedback (Alamargot & Morin, 2015; Guilbert *et al.*, 2019). This compensation in the use of stylus brings positive effect in the case of original drawing, whereas it diminishes letter legibility in a writing task. The facilitator effect of tablet use with stylus appears thus to be dependent from the task since, in opposite to our positive results in a drawing task, negative effects were found in a writing task (Alamargot & Morin, 2015).

The question remains to know whether using tablets can also help children and adolescents with motor disabilities. For instance, children and adolescents with developmental coordination disorders (DCD) are known to present some difficulty in feedforward motor control as revealed by motor imagery tasks (Wilson *et al.*, 2004). By promoting simulation process involved in the off-line control of motor action, digital tablets could thus offer a valuable environment for helping DCD children and adolescents to improve motor control abilities. Further research should investigate this perspective.

REFERENCES

- Alamargot, D., & Morin, M. F. (2015). Does handwriting on a tablet screen affect students' graphomotor execution? A comparison between grades two and nine. *Human movement science*, 44, 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2015.08.011>
- Barrouillet, P., Fayol, M., & Chevrot, C. (1994). Le dessin d'une maison. Construction d'une échelle de développement. *L'Année Psychologique*, 94, 81-98.
- Black, J. B. (2010). An embodied/grounded cognition perspective on educational technology. In *New science of learning* (pp. 45-52). Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5716-0_3
- Choudhury, S., Charman, T., Bird, V., & Blakemore, S. J. (2007). Development of action representation during adolescence. *Neuropsychologia*, 45(2), 255-262. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.07.010>
- Chiappedi, M., Togni, R., De Bernardi, E., Baschenis, I. M. C., Battezzato, S., Balottin, U., ... & Bejor, M. (2012). Arm trajectories and writing strategy in healthy children. *BMC pediatrics*, 12(1), 1-6. <https://doi.org/10.1186/1471-2431-12-173>
- Clark, A. (1998). *Being there: Putting brain, body, and world together again*. MIT press.
- Clark, A. (2008). *Supersizing the mind: Embodiment, action, and cognitive extension*. USA: Oxford University Press.
- Cooper, L. Z. (2005). Developmentally appropriate digital environments for young children. *Library trends*, 54(2), 286-302. <https://doi.org/10.1353/lib.2006.0014>.
- Dietrich, A., & Haider, H. (2015). Human creativity, evolutionary algorithms, and predictive representations: The mechanics of thought trials. *Psychonomic bulletin & review*, 22(4), 897-915. <https://doi.org/10.3758/s13423-014-0743-x>
- Dubé, A. K., & McEwen, R. N. (2015). Do gestures matter? The implications of using touchscreen devices in mathematics instruction. *Learning and Instruction*, 40, 89-98. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2015.09.002>
- Duff, W. (1767). *An Essay on Original Genius, and Its Various Modes of Exertien in Philosophy and the Fine Arts, Particulary*. Edward & Charles Dilly.
- Fodor, J. A. (1985). Precis of the modularity of mind. *Behavioral and brain sciences*, 8(1), 1-5. <https://doi.org/10.1017/S0140525X0001921X>
- Fogassi, L., & Gallese, V. (2004). Action as a binding key to multisensory integration. *The handbook of multisensory processes*, 425-441.
- Foglia, L., & Wilson, R. A. (2013). Embodied cognition. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 4(3), 319-325. <https://doi.org/10.1002/wcs.1226>
- Geist, E. A. (2012). A qualitative examination of two year-olds interaction with tablet based interactive technology. *Journal of Instructional Psychology*, 39(1).

- Gerth, S., Klassert, A., Dolk, T., Fliesser, M., Fischer, M. H., Nottbusch, G., & Festman, J. (2016). Is handwriting performance affected by the writing surface? Comparing preschoolers', second graders', and adults' writing performance on a tablet vs. Paper. *Frontiers in psychology*, 7, 1308.
- Glenberg, A. M. (2010). Embodiment as a unifying perspective for psychology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 1(4), 586-596. <https://doi.org/10.1002/wcs.55>
- Grush, R. (2004). The emulation theory of representation: Motor control, imagery, and perception. *Behavioral and brain sciences*, 27(3), 377.
- Guilbert, J., Alamargot, D., & Morin, M. F. (2019). Handwriting on a tablet screen: Role of visual and proprioceptive feedback in the control of movement by children and adults. *Human movement science*, 65, 30-41.
- Guilbert, J., Jouen, F., Lehalle, H., & Molina, M. (2013). Imagerie motrice interne et simulation de l'action chez l'enfant. *L'Année psychologique*, 113(3), 459-488.
- Guilbert, J., Molina, M., & Jouen, F. (2016). Rôle des afférences proprioceptives dans le développement de l'imagerie motrice chez l'enfant. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 70(4), 343.
- Hay, L. (1978). Accuracy of children on an open-loop pointing task. *Perceptual and Motor Skills*, 47(3_suppl), 1079-1082. <https://doi.org/10.2466/pms.1978.47.3f.1079>
- Ishii, H. (2008). The tangible user interface and its evolution. *Communications of the ACM*, 51(6), 32. <https://doi.org/10.1145/1349026.1349034>
- James, W. (1880). *The feeling of effort*. The Society.
- Jeannerod, M. (1994). The representing brain: Neural correlates of motor intention and imagery. *Behavioral and Brain sciences*, 17(2), 187-201.
- Kandel, S., & Perret, C. (2015). How do movements to produce letters become automatic during writing acquisition? Investigating the development of motor anticipation. *International Journal of Behavioral Development*, 39(2), 113-120.
- Karmiloff-Smith, A. (1990). Constraints on representational change: Evidence from children's drawing. *Cognition*, 34(1), 57-83. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(90\)90031-E](https://doi.org/10.1016/0010-0277(90)90031-E)
- Kawato, M. (1999). Internal models for motor control and trajectory planning. Current opinion in neurobiology, 9(6), 718-727.
- Koziol, L. F., Budding, D. E., & Chidekel, D. (2012). From movement to thought: executive function, embodied cognition, and the cerebellum. *The Cerebellum*, 11(2), 505-525.
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1987). Hand movements: A window into haptic object recognition. *Cognitive psychology*, 19(3), 342-368. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(87\)90008-9](https://doi.org/10.1016/0010-0285(87)90008-9)
- Lubart, T., Besançon, M., & Barbot, B. (2011). *EPOC: évaluation du potentiel créatif*. Paris: Hogrefe.
- Lubart, T. I., & Georgsdottir, A. S. (2004). Créativité, haut potentiel et talent. *Psychologie française*, 49(3), 277-291.

- Lubart, T., Mouchiroud, C., Tordjam, S., & Zenasni, F. (2003). *Psychologie de la créativité*. Paris: Armand Colin.
- Luquet, G. H. (1927). *Le dessin enfantin. (Bibliothèque de psychologie de l'enfant et de pédagogie.)*. [Children's drawing].
- McManis, L. D., & Gunnewig, S. B. (2012). Finding the education in educational technology with early learners. *Young Children*, 67(3), 14-24.
- Miall, R. C., & Wolpert, D. M. (1996). Forward models for physiological motor control. *Neural networks*, 9(8), 1265-1279.
- Mouchiroud, C., & Lubart, T. I. (2001). Children's original thinking : An empirical examination of alternative measures derived from divergent thinking tasks. *Journal of Genetic Psychology*, 162(4), 382-401. <https://doi.org/10.1080/00221320109597491>
- Patchan, M. M., & Puranik, C. S. (2016). Using tablet computers to teach preschool children to write letters: Exploring the impact of extrinsic and intrinsic feedback. *Computers & Education*, 102, 128-137. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.07.007>
- Pezzulo, G. (2011). Grounding procedural and declarative knowledge in sensorimotor anticipation. *Mind & Language*, 26(1), 78-114. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0017.2010.01411.x>
- Picard, D., & Boulhais, M. (2011). Sex differences in expressive drawing. *Personality and Individual Differences*, 51(7), 850-855.
- Picard, D., & Gauthier, C. (2012). The development of expressive drawing abilities during childhood and into adolescence. *Child Development Research*, 2012.
- Picard, D., Martin, P., & Tsao, R. (2014). iPads at school? A quantitative comparison of elementary schoolchildren's pen-on-paper versus finger-on-screen drawing skills. *Journal of Educational Computing Research*, 50(2), 203-212. <https://doi.org/10.2190/EC.50.2.c>
- Piotrowski, J. T., & Meester, L. (2018). Can apps support creativity in middle childhood? *Computers in Human Behavior*, 85, 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.03.030>
- Rideout, V. (2016). Measuring time spent with media: The Common Sense census of media use by US 8-to 18-year-olds. *Journal of Children and Media*, 10(1), 138-144.
- Rideout, V. (2017). The Common Sense census: Media use by kids age zero to eight. *San Francisco, CA: Common Sense Media*, 263-283.
- Roskos, K., Burstein, K., Shang, Y., & Gray, E. (2014). Young Children's Engagement With E-Books at School: Does Device Matter? *SAGE Open*. <https://doi.org/10.1177/2158244013517244>
- Runco, M. A. (1991). The evaluative, valiative, and divergent thinking of children. *The Journal of Creative Behavior*.
- Sakr, M. (2018). Multimodal participation frameworks during young children's collaborative drawing on paper and on the iPad. *Thinking Skills and Creativity*, 29, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2018.05.004>

- Smits-Engelsman, B. C., & Wilson, P. H. (2013). Age-related changes in motor imagery from early childhood to adulthood: probing the internal representation of speed-accuracy trade-offs. *Human Movement Science*, 32(5), 1151-1162. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2012.06.006>
- Spackman, J. S., & Yanchar, S. C. (2014). Embodied cognition, representationalism, and mechanism: a review and analysis. *Journal for the Theory of Social Behaviour*, 44(1), 46-79. <https://doi.org/10.1111/jtsb.12028>
- Spearman, C. D. (1931). Creative mind. *The Journal of Nervous and Mental Disease*, 74(6), 783.
- Valtulina, J., & de Rooij, A. (2019). The predictive creative mind: A first look at spontaneous predictions and evaluations during idea generation. *Frontiers in psychology*, 10, 2465. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02465>
- Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. (2004). Computational motor control. *Science*, 269, 1880-1882.
- Wolpert, D. M., Ghahramani, Z., & Jordan, M. I. (1995). An internal model for sensorimotor integration. *Science*, 269(5232), 1880-1882.
- Wolpert, D. M., & Kawato, M. (1998). Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural networks*, 11(7-8), 1317-1329.
- Willems, R. M., & Francken, J. C. (2012). Embodied cognition: taking the next step. *Frontiers in Psychology*, 3, 582. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00582>
- Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic bulletin & review*, 9(4), 625-636. <https://doi.org/10.3758/BF03196322>
- Wilson, P. H., Maruff, P., Butson, M., Williams, J., Lum, J., & Thomas, P. R. (2004). Internal representation of movement in children with developmental coordination disorder: a mental rotation task. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 46(11), 754-759.

CHAPITRE 10 – MODIFIER LES AFFERENCES

SENSORIELLES LORS DU DESSIN CRÉATIF SUR

TABLETTE TACTILE DE 6 A 14 ANS

La précédente étude (cf. Chapitre 9) montrait que les adolescents de 13-14 ans réalisaient des productions plus originales au doigt sur tablette tactile qu’au crayon sur papier, comme nous l’avions observé chez les enfants de 6-7 et 8-9 ans (cf. Chapitre 8). Cet effet se retrouvait avec un sujet de dessin différent de celui proposé au chapitre 8. Cependant, les adolescents réalisaient également des dessins plus originaux au stylet sur tablette tactile, contrairement à ce que nous attendions.

La présente étude visait donc à comprendre plus particulièrement cette observation, en questionnant les effets de l’utilisation de la tablette tactile au doigt et au stylet chez des enfants de 6 à 14 ans, c’est à dire, sur une période reconnue dans la littérature comme marquée par un développement des capacités de prédiction. Dans cette étude, l’hypothèse de la charge cognitive (évoquée au Chapitre 5) induite par l’utilisation de différents outils (doigt, stylet, stylo) sert de point de départ pour évaluer l’effet de ceux-ci sur les performances d’originalité.

MODIFYING SENSORY AFFERENCES ON TABLET CHANGES ORIGINALITY IN DRAWINGS

Fabien Bitu^{*1}, Béatrice Galinon-Mélénec², and Michèle Molina¹

¹ *Laboratory of Psychology of Caen Normandy (LPCN EA7452), University of Caen Normandy, Caen, France*

² *Identity and Differentiation of Spaces, Environment and Societies (UMR IDEES 6266 CNRS), University Le Havre Normandy, Le Havre, France*

**Corresponding author: fabien.bitu@unicaen.fr*

Author's note

Fabien Bitu, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4507-042X>

This article has been accepted for publication in *Frontiers in psychology* on May 18, 2022. It is available online in the editor's format at the following link:

<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.806093>

To cite this article: Bitu, F., Galinon-Mélénec, B., & Molina, M. (2022). Modifying Sensory Afferences on the Tablet Changes Originality in Drawings. *Frontiers in Psychology*. 13:806093.

Contribution to the field

Our research aimed to highlight the crucial role played by sensory afferences in a creative drawing task. Using tablets to modify sensory afferences with the use of finger or stylus can modulate originality in drawings, depending on children's development in predictive motor control. This study contributes to a better understanding of creativity and opens new avenues on the role played by sensory afferences in children's development of creativity.

Résumé

Dans la lignée de recherches empiriques récentes, révélant que la créativité est liée aux composantes sensorimotrices, la recherche actuelle avait pour objectif d'évaluer si les afférences sensorielles peuvent moduler l'originalité dans des dessins d'enfants et adolescents. Soixante-neuf enfants de CP, CE2, 6^e, et 4^e ont été amenés à produire un bonhomme qui existe et un bonhomme qui n'existe pas, avec le doigt ou le stylet sur tablette et au crayon sur papier. Les dessins étaient évalués avec une échelle d'originalité comparant les dessins originaux aux dessins non-originaux. Puisque, en comparaison des dessins réalisés sur papier avec un crayon, dessiner avec le doigt améliore l'information proprioceptive, il était attendu que cette condition, en accord avec la théorie de la charge cognitive, favorise l'originalité dans le dessin en réduisant les ressources cognitives dévouées au contrôle moteur du geste graphique (diminuant la charge intrinsèque). Au contraire, puisque l'utilisation d'un stylet implique une perte d'information proprioceptives qui accroît la charge intrinsèque en augmentant les ressources cognitives allouées au contrôle moteur, il était attendu que l'utilisation d'un stylet sur tablette mène aux dessins les moins originaux. Les résultats n'ont confirmé que partiellement cette hypothèse. Tandis que l'utilisation du doigt sur la tablette a mené aux scores d'originalité les plus hauts, utiliser un stylet sur tablette n'a pas altéré l'originalité des dessins. A l'inverse, l'utilisation du stylet a mené les enfants et adolescents du CE2 à la 4^e à être plus performants qu'avec un crayon sur papier. Cette modulation de l'outil sur l'originalité ne confirme pas l'hypothèse formulée en accord avec le cadre de la charge cognitive. Cependant, elle pourrait être expliquée par une perspective incarnée de la créativité considérant le processus créatif comme reposant sur un processus de prédiction sensorimotrice dans lequel les afférences sensorielles sont centrales pour générer et évaluer les idées créatives. Cette recherche ouvre de nouvelles pistes sur la créativité et propose de considérer le développement du contrôle moteur prédictif comme une part significative du développement de la créativité.

Mots-clés : créativité, tablette, enfant, adolescent, afférence sensorielle, charge cognitive

Abstract

According to some recent empirical studies revealing that creativity is linked to sensorimotor components, the current research was aimed at evaluating whether sensory afferences could modulate originality in drawing of children and adolescents. Sixty-nine children from 1st, 3rd, 6th, and 8th grades were required to produce a man who exists and a man who doesn't exist with fingers or stylus on a tablet and with a pen on paper. Drawings were assessed with an originality scale comparing original drawings to unoriginal ones. Since, in comparison to drawings made on paper with a pen, drawing with fingers enhances proprioceptive information, this condition was expected, according to cognitive load theory, to favor originality in drawing by reducing cognitive resources devoted to motor control of the graphic gesture (lowering intrinsic load). On the contrary, since the use of a stylus involves a proprioceptive loss of information, which enhances intrinsic load by increasing cognitive resources devoted to motor control, it was expected that drawing with a stylus on the tablet would lead to the least original drawings. Results only partially confirmed these hypotheses. While the use of fingers on the tablet led to the highest original scores, using a stylus on the tablet did not impair originality in drawing of children and adolescents. On the opposite, the use of a stylus led 3rd–8th graders to perform better than with pen on paper. This modulation of the tool on originality does not confirm the hypotheses formulated in accordance with the cognitive load framework. However, it could be explained according to an embodied perspective of creativity considering the creative process as relying on a sensorimotor prediction process in which sensory afferences are central to generating and evaluate creative ideas. This research opens new avenues on creativity and proposes to consider the development of predictive motor control as a significant part of creativity development.

Keywords: creativity, tablet, children, adolescent, sensory afference, cognitive load

I. Introduction

How can new technologies enhance our knowledge of the creative process? Multiple attempts have been made to understand and describe human creativity through the years, from the mystic idea of creativity breathed by gods with Plato to the philosophical conception of the creative genuine (Duff, 1767; Galton, 1879, 1883; James, 1880). But it is only in the 1950s that creativity was investigated as a field in psychological studies (Guilford, 1956, 1967), leading around 40 years later to a consensual definition of creativity, conceived as “the capacity to realize something new and adapted to the context” (MacKinnon, 1962; Barron, 1988; Sternberg, 1988; Ochse, 1990; Sternberg & Lubart, 1991, 1995, 1996; Lubart *et al.*, 2003). According to this definition, the creative product must be adapted to the context’s criterion and be new enough to stand out from common products. Creativity lies upon three indicators (Mouchiroud & Lubart, 2001) which are the most used for evaluating creativity: fluency (number of appropriate responses), flexibility (variability of themes in responses), and originality (novelty of responses). The latter has long been considered the main component of creativity, corresponding to the evaluation and selection of own’s idea, based on prior knowledge (Mouchiroud & Lubart, 2001; Lubart & Georgsdottir, 2004). Lubart *et al.* (2003) consider creativity as resulting from an interactive combination of cognitive (including convergent and divergent thinking, intelligence, knowledge), conative (personality traits and motivation), emotional and environmental (family, school) factors including new technologies, leading to different levels of creativity. This multivariate approach to creativity is to date one of the most documented and developed in experimental research.

In addition to these factors, it has recently been proposed to focus on a forgotten part of creativity: sensorimotor components. As a matter of fact, some recent studies focused on the links shared by these two processes (e.g., Nikolaeva *et al.*, 2018; Gaggioli *et al.*, 2019; Fleury

et al., 2020). Recently, neuroscience studies highlighted the involvement of motor regions, such as the premotor cortex, the supplementary and pre-supplementary motor areas, and the posterior inferior frontal gyrus, in musical creativity (Bashwiner, 2018; Bashwiner & Bacon, 2019). The present exploratory study aims to extend this embodied perspective of creativity by focusing on sensorimotor afferences during creative drawings.

To what extent sensory afferences can modulate creative drawing executed on a digital screen? Although this question has not been investigated to our knowledge in the case of creativity, the multimedia learning theory (Mayer, 2005) usually applied to the context of digital learning could help in bringing some answers. Multimedia learning refers to any situation in which information processing occurs through two different channels, for instance, audio and visual, which is common in the digital context. Multimedia learning can be explained according to cognitive load theory (Mayer & Moreno, 2003; Sweller *et al.*, 2011). Cognitive load theory proposes that there is a delimited amount of cognitive resources available for a specific task. In a learning task, cognitive resources can be allocated to the *essential processing* for the comprehension of the task; to the *intrinsic processing* devoted to the realization of the task, such as controlling gestures in a physical interaction learning task; or to the *extrinsic processing* to manage information primed by the design of the task but which are not essential in its comprehension, such as adding background music in a narrative learning (Mayer & Moreno, 2003; Sweller *et al.*, 2011). Applied to a sensorimotor task in the multimedia learning context, increasing the processing demands inherent to the sensory modalities used in the task may exceed the processing capacity of the cognitive system, leading to a cognitive overload (Brown *et al.*, 2009). As stated in Bara & Tricot (2017), this overload could be due to an increased intrinsic load, according to which the kind of movement performed during a task would make the task harder to accomplish. For example, while comparing tactile exploration of concave *versus* raised letters, Bara & Gentaz (2011) found that the strategy used by children

in concave letter exploration led to higher cognitive costs than the one used in raised letter condition, resulting in less memorized concave letters than raised ones.

The rationale of the present study is the following: in order to investigate if, as suggested by recent findings, sensorimotor components are involved in creativity, then varying sensory afferences during a drawing creative task that reduce or increase the intrinsic cognitive load devoted to the motor control of the task would have consequences on originality performances. Tablets are electronic devices presenting a visual screen controlled by gestures and tactile actions executed with fingers or stylus (Dubé & McEwen, 2015). This tactile feature allows interacting very easily with the device, even at a young age, using a stylus or directly with finger (Cooper, 2005; Geist, 2012; McManis & Gunnewig, 2012; Dubé & McEwen, 2015; Piotrowski & Meester, 2018; Sakr, 2018). However, acting with fingers or with stylus on a tablet modifies afferent and efferent kinesthetic and proprioceptive information. Acting with fingers could reduce the cognitive load devoted to the motor control during the writing digital task whereas acting with a stylus would increase it. Alamargot & Morin (2015) demonstrated that compared to the roughness of a paper sheet, the smoothness of a tablet lessens the friction between the pen and the surface of the tablet which reduces proprioceptive feedback when used with a stylus. This reduction of proprioceptive feedback implies a compensating strategy to control the executing writing movement (Alamargot & Morin, 2015; Gerth *et al.*, 2016; Guilbert *et al.*, 2019), thus increasing the cognitive cost allocated to the motor control to complete the task – the intrinsic load. According to cognitive load theory, using a stylus during a learning task should increase the intrinsic load by requiring supplementary cognitive resources allocated to the movement control, resulting in poorer creative performances. On the contrary, acting with finger enhances the friction with the screen and therefore increases proprioceptive feedback, which should lead to a reduced intrinsic load in a learning task by facilitating motor control strategy. These variations in proprioceptive feedback consecutive to the tool used for acting on

the tablet may affect differently children and adolescents as a consequence of their ability to process proprioceptive afferences. As a matter of fact, proprioception develops during childhood and adolescence as a consequence of precision improvement such that proprioception becomes more reliable over time (Holst-Wolf *et al.*, 2016). More precisely, children younger than 8 years have some difficulty in processing proprioceptive information, leading them to rely more heavily on visual rather than proprioceptive information during an action to control that the performed movement is consistent with the desired one (Bard & Hay, 1983; Contreras-Vidal, 2006). Studies have demonstrated that variation of afferent feedback modifies writing learning abilities in preschoolers (Patchan & Puranik, 2016) as well as motor control of action (Alamargot & Morin, 2015).

Patchan & Puranik (2016) showed that using fingers on the tablet was the most efficient set thanks to an enhanced direct proprioceptive feedback on the tablet for handwriting learning. They trained 3–6 years old preschoolers to write on the tablet with fingers or with stylus, or on paper with a pen. After practicing 3 times every week for a total of 8 weeks, children wrote letters more correctly with fingers on the tablet than with stylus on the tablet or pen on paper. From these results, it could be suggested that direct contact of fingers on tablet fostered sensorimotor processing in children through the richness of proprioceptive information and favored motor learning. Results from Patchan & Puranik (2016) also showed that acting on the tablet with a stylus did not bring the same benefits as when using fingers: the sliding effect of the stylus lowered proprioceptive feedback which led to a less efficient strategy of motor control. In the same vein, Alamargot & Morin (2015) revealed that using a stylus on the smooth screen of a tablet during a writing task, compared to using a pen on paper, diminished the legibility of letters at second (6–7 years) and nine grades (14–15 years). Gerth *et al.* (2016) observed that in addition to preschoolers and second graders, adults were also affected by the sliding effect of the tablet's surface when using a stylus.

Contrary to young children, older ones are able to compensate for the loss of haptic information needed for movement control when writing with a stylus on a tablet (Alamargot & Morin, 2015; Guilbert *et al.*, 2019), by producing bigger letters (amplification of movement) and writing faster (velocity increase). This compensating strategy differs according to the age of the participants (Alamargot & Morin, 2015; Gerth *et al.*, 2016). While 7/8 years old children increase pauses, leading to a longer duration of movements, 10/11 years old children favor increasing pen pressure and speed to maximize proprioceptive sensory input (Alamargot & Morin, 2015). Compensating strategies are tied to the developmental trend in proprioceptive processing which also induces changes in the ability of children and adolescents to use internal models to control actions.

Internal models of actions allow the brain to mimic the transformation between the motor command and sensory signals (Kawato, 1999). In order to control ongoing actions through accurate and fluent movements, we make use of feedforward processes (Miall & Wolpert, 1996) allowing a prediction of the movements to be executed as well as a prediction of their related sensory consequences. In this case, two types of internal models are used. First, inverse models are used as a controller to select an adapted motor program. Second, direct models are used as a predictor of sensory consequences of the ongoing movement, informed by a copy of the motor program issued from inverse models – the efference copy (Wolpert & Kawato, 1998). Thus, feedforward internal models are predictive representations transforming action commands into their sensory consequences. This prediction process supported by internal models of action can also be used to control off-line actions, in a simulation process, like imagined action such as motor imagery (Jeannerod, 1994) or creativity. In the case of motor imagery in which covert actions are decoupled from any actual sensorimotor interaction (Jeannerod, 1994), internal models allow simulating future or potential motor actions without realizing it (Guilbert *et al.*, 2018).

A significant increase in the use of predictive motor control is commonly observed around 8 years (Hay, 1978, 1979; Bard & Hay, 1983; Molina *et al.*, 2008) followed by a second one around 11–12 years (Caeyenberghs *et al.*, 2009; Smits-Engelsman & Wilson, 2013). This means that the loss of proprioceptive feedback could be compensated by maximizing proprioceptive afferences through the use of predictive motor control from the age of 8. Consequently, Guilbert *et al.* (2019) observed that reducing sensory feedback affected handwriting performances more in young than older children. Older children exaggerated letter size and pen pressure to maximize the amount of proprioceptive information and made shorter pauses suggesting an increased use of feedforward motor control. After 8 years, the sliding effect of the stylus on a tablet could thus be compensated by the use of feedforward motor control of action (Kandel & Perret, 2015; Guilbert *et al.*, 2019). These results suggest that children older than 8 May exaggerate their movement to maximize the use of proprioceptive information of the ongoing action to compensate for the loss in haptic feedback. Using a stylus reduces haptic feedback, requiring feedforward sensory prediction to compensate for the unavailable information. However, it is only after 8 years that children would be able to compensate for the loss of tactile afferences as a consequence of an improvement in predictive processes.

These results obtained for the writing task offer some interesting issues concerning creative drawings. Creativity, as a cognitive process, could be modulated by the cognitive load processes involved in learning tasks. The ability to produce original drawings could depend on the cognitive load induced by the modification of sensory afferences primed by the task. The different proprioceptive feedback induced by the use of tablets offers a particularly well-adapted situation to vary this cognitive load.

To our knowledge, only one study dealt with the question of a possible link between direct fingertip feedback on tablets and originality (Bitu *et al.*, 2019). They invited children aged 6–7 and 8–9 to draw, based on Karmiloff-Smith (1990), “a man that exists” (unoriginal drawing) and “a man that doesn’t exist” (original drawing) with fingers on the tablet and with a pen on paper. Originality in drawings was assessed by means of a graphical scale developed by the authors, inspired by the study of Karmiloff-Smith (1990), which allowed to compute an originality score by comparing original drawings to unoriginal drawings of each child. Results showed that both 6–7- and 8–9-years old children were more original with fingers on the tablet than with pens on paper. From this study, Bitu *et al.* (2019) concluded a facilitator effect of finger use on a tablet for original drawing in comparison to a pen on paper. Yet, by comparing fingers on a touchscreen versus pen on paper, no conclusions could be stated about the nature of the observed benefits, which could be due to the tool (finger versus pen) as well as to the surface (touchscreen versus paper) on which drawings were produced. The use of a stylus on touchscreen was thus essential to disentangle the link between sensorimotor components and creativity. Indeed, as stated previously, while using fingers on the tablet is known to enhance tactile feedback on fingertips (Patchan & Puranik, 2016), using a stylus on a tablet leads to poorer proprioceptive feedback (Alamargot & Morin, 2015). The present study was aimed at extending this previous work by evaluating whether varying sensory afferences will impact the originality of children and adolescents drawing with finger and stylus on a tablet, and with pen on paper. To assess originality, we adapted our experiment from Karmiloff-Smith (1990) and Bitu *et al.* (2019) in which children operated several types of change between the drawing of a man who exists and a man who doesn’t exist. We compared originality performance of four different age groups related to the development of the capacity to generate and use internal models for the control of on-line and off-line action, at 6–7 (1st graders), 8–9 (3rd graders), 11–12 (6th graders), and 13–14 years old (8th graders). These ages correspond

to periods before (1st grade), during (3rd and 6th grade), and after (8th grade) the transition commonly reported in the literature concerning the use of internal models of action.

This study addresses the effect of modifying proprioceptive feedback to modulate originality in drawings. In the light of empirical studies, two hypotheses can be drawn. If creativity is related to sensory afferences, then it was expected that drawing with fingers on the tablet would increase originality at all ages, compared to drawings made with pen on paper. Increasing proprioceptive feedback on fingertips may enhance motor control strategy and, as a consequence, would reduce the cognitive load allocated to motor control in favor of the drawing task. Second, it was expected that, compared to drawings made with pen on paper, using a stylus would decrease originality in drawings at all ages as a consequence of an increased cognitive load this situation induces to compensate for the reduced sensory feedback available to the motor control execution of the drawing task.

II. Materials and methods

II.1. Participants

An initial sample of 70 participants was recruited in two schools located in Normandy, France. Participants were enrolled on a voluntary basis, following a convention that defined data collection, with the consent of Normandy education academy and schools, along with written authorization from their parents or legal tutor. Inclusion criteria were not met for 1 adolescent. None expressed their wish to abort the experiment before the end of the procedure, leading to a total of 69 children and adolescents aged from 6 to 14 years old (mean age = 10 years, 0 month) retained for this study. Children and adolescents in school were recruited in 1st grade (n = 15; mean age = 6 years, 11 months; min = 6 years, 6 months; max = 7 years, 4 months), 3rd grade (n = 22; mean age = 8 years, 10 months; min = 8 years, 2 month; max = 9 years, 3

months), 6th grade (n = 18; mean age = 11 years, 4 months; min = 10 years, 5 months; max = 12 years, 0 month) and 8th grade (n = 14; mean age = 13 years, 5 months; min = 12 years, 9 months; max = 14 years, 1 month).

II.2. Materials

Digital drawings were made on a Microsoft Surface Pro 4 tablet, 12.3" screen and 2736×1824 px resolution, with a Microsoft Surface Pen measuring $144 \text{ mm} \times 9.5 \text{ mm} \times 10.2 \text{ mm}$. Drawings were made on an app designed in our laboratory, presenting a white surface on which it can be drawn with stylus or fingers by tracing only black traits. Erasing function was not enabled on the app. Paper sheets measuring the same size as the screen ($260 \text{ mm} \times 175 \text{ mm}$), and a black pencil were used. Eraser was not allowed when drawing on paper.

II.3. Inclusion and exclusion criteria

For each participant, exclusion criteria were related to the task feasibility such as identified severe visual impairment (e.g., low vision, blindness) or severe motor impairment (e.g., excessive weakness), that would make the participant unable to perform the task correctly. To this end, a NEPSY-II visuomotor precision task (Korkman *et al.*, 2014) was performed to measure graphomotor speed and accuracy during a graphical task. In this task, participants were asked to draw lines inside of tracks as quickly and accurately as possible. The number of errors and completion time are recorded in this test to compute a visuomotor precision score. The lower the score's value, the higher the visuomotor precision level. This test allowed to control for visuomotor precision impairment that could affect a drawing task, by excluding each participant under $2SD$ from the standardized mean of its age group.

II.4. Control tasks

Prior to the experimentation, and after completing the NEPSY-II visuomotor task, each participant was asked to perform a functioning control task. The functioning task allowed control of children and adolescents' knowledge of the core movements to be applied on a tablet. Participants were asked to perform eight subtasks with Instagram used offline, referring to eight core movements from the touch gesture reference guide of Villamor *et al.* (2010). This task's procedure was sum up in Table 1. If a child or an adolescent was in difficulty with one of the instructions, the experimenter could help him/her by verbalizing the movement required to accomplish the given instruction (for example, "to open the app, you have to double tap").

Table 7. Description of the functioning task procedure according to the touch gesture reference guide (Villamor, Willis, & Wroblewski, 2010).

Tableau 7. Description de la tâche fonctionnelle d'après le guide de référence de Villamor, Willis, & Wroblewski, 2010.

<u>Instruction</u>	<u>Targeted movement from Villamor, Willis & Wroblewski (2010)</u>
Move Instagram icon on desktop	Press & Drag
Start Instagram app	Double tap
Take a picture and add a smiley	Single tap
Enlarge the smiley	Spread
Shrink it	Pinch
Move it	Tap & Drag
Rotate it	Rotate
Turn smiley page to see recent smileys	Flick

II.5. Experimental procedure

Children and adolescents were observed individually in a quiet room of the school and high school. They sat down in front of a table (700 mm × 500 mm × 750 mm) where the touchscreen

or the sheet of paper was placed. Each participant had to produce three original and three unoriginal drawings of a man with fingers on the tablet, with stylus on the tablet and with a pen on paper following specific instructions. Following the procedure used by Karmiloff-Smith (1990) with pen and paper to bring creativity to drawings, children were asked to draw “a man who exists” for unoriginal drawings and “a man who doesn’t exist” for original drawings. Tool order (pen on paper, finger on tablet, and stylus on tablet) and instruction order (original and unoriginal) were systematically counterbalanced across each participant. Once a first drawing was produced, it was removed before starting the execution of a new one. During the whole experimental session, the experimenter stood near the participant to help him/her to understand the task if he/she needed to.

II.6. Coding

A total of 414 individual electronic (276) and paper (138) drawings were collected for analysis: one half being original drawings and the other half unoriginal drawings. Unoriginal drawings were used as a baseline to assess originality considering interindividual differences in the representation of a man in a drawing. The logic was to consider as being original in the drawings, any modification operated in comparison to the unoriginal man drawn with the same tool. Originality in drawing was thus rated by comparing an original drawing to an unoriginal one made with the same tool by the same participant, allowing to score any modification operated from one condition to another with the same tool.

Several types of graphical changes were considered for the coding. As reported by Karmiloff-Smith (1990), seven categories of changes can be observed for the drawing of something (house, man, or animal) that does not exist in comparison to the drawing of something that exists as follows:

- Addition and deletion of elements (e.g., 2 heads instead of 1, or deletion of the arms), coded in our scale as the addition or deletion of elements that were already drawn on the drawing of a man who exists;
- Modification operated on the shape of elements (e.g., a triangular head instead of a circle one);
- Modification operated on the size of elements (e.g., a head two times bigger than the trunk);
- Insertion of new elements (e.g., wings added to the trunk), referring to the insertion of something that was not drawn on the drawing of a man who exist;
- Position, orientation, and perspective modifications of elements or the whole drawing (e.g., eyes and mouth inverted);
- Cross-conceptual categories modifications of the whole drawing (e.g., an animal-shaped man);
- Modifications operated on the shape of the whole drawing (e.g., a circle-shaped man).

These seven categories considered global modifications operated on the whole drawing and local modifications operated on elements of the drawing. Local modifications concerned 15 elements defined as parts constituting a man, whose presence is rated in Goodenough (1926) scale of a man drawing. Goodenough (1926) considered the head, eyes, nose, mouth, nostrils, ears, hairs, neck, trunk, arms, hands, fingers, legs, and feet. To this list, we added teeth as an element of the drawing since children could use this part of the face in an original way.

For each modification operated on elements (local modifications), 0.5 point was assigned. Each global modification was awarded the double, i.e., 1 point, since it concerned larger modifications than those consecutive to a local element modification. Only one exception to this was for “position, orientation, and perspective” category which could be rated up to 1.5 points since it could concern simultaneously local and global modifications. As an example, if a participant exchanged the mouth with an eye, it would concern at least two different elements

of the “position change” category, which would result in a strongly increased originality score. This category was thus awarded 0.5 point for a local modification, no matter the number of concerned elements. One mouth and one eye exchanged would thus be awarded the same point (0.5) as if it was exchanged with two eyes. Concerning a modification of the whole drawing in position change (for example, a reversed man), 1 point could be awarded for a global modification.

To sum up, with the rating scale, the originality score calculated for each original drawing was defined by the sum of points awarded to local and global modifications made on the original drawing in comparison to the unoriginal drawing made by the same participant with the same tool. Three originality scores were thus calculated using the rating scale (Table 2), one for each original drawing executed on the touchscreen with fingers, with stylus, and on paper with a pen. The calculation of originality score in drawings was thus consistent with the definition of originality, that is, the capacity to assess and select a novel idea among all other own ideas, depending on the acquired knowledge, i.e., what children and adolescents know about the drawing of a man (Runco, 1991; Lubart and Georgsdottir, 2004).

Table 8. Rating scale used to assess originality in drawings.

Tableau 8. Echelle de cotation utilisée pour mesurer l'originalité des dessins du bonhomme

Graphical change	Definition	Type of change	Awarded points (min-max)
Deletion/addition Fig. 1	Element in the drawing of a man who exist (head, eyes, nose, mouth, nostrils, teeth, ears, hairs, neck, trunk, arms, hands, fingers, legs,	Core element	0 – 7.5

	feet) replicated or deleted		
Shape of elements Fig. 2	Element (head, eyes, nose, mouth, nostrils, teeth, ears, hairs, neck, trunk, arms, hands, fingers, legs, feet) whose shape was different from the drawing of the man who exist	Core element	0 – 7.5
Size of elements Fig. 3	Element (head, eyes, nose, mouth, nostrils, teeth, ears hairs, neck, trunk, arms, hands, fingers, legs, feet) whose size was different from the drawing of a man who exist	Core element	0 – 7.5
Insertion of new elements Fig. 4	New element (head, eyes, nose, mouth, nostrils, teeth, ears hairs, neck, trunk, arms, hands, fingers, legs, feet) that were not present on the drawing of a man who exist	Core element	0 – 7.5
Position, orientation, and perspective Fig. 3	Elements (head, eyes, nose, mouth, nostrils, teeth, ears, hairs, neck, trunk, arms,	Core element and on the whole	0 – 1.5

	hands, fingers, legs, feet) and/or the whole drawing different in position, orientation, and perspective from the drawing of a man who exist		
Cross-conceptual category Fig. 5	Whole drawing presenting insertions crossed with other conceptual categories (trees, animals, technology, ...)	On the whole	0 – 1
Form of the whole Fig. 5	Drawing whose whole form was differently shaped in comparison of the drawing of a man who exist	On the whole	0 – 1
		TOTAL	0 – 33.5

The originality score could be rated up to 33.5 points for each original drawing but since the originality scale aims to cover a large range of modification possibilities in order to capture each modification operated on the original drawing, a single original drawing will most probably use only a few of this range of possibilities, leading to relatively low scores on the 33.5 total available points.

II.7. Data analysis

To ensure that instructions were well understood, an interrater agreement score was calculated with a random sample of 100 unoriginal and original drawings produced in the three conditions

(finger on tablet, stylus on tablet, and pen on paper). Two naive observers were asked to categorize the drawings as being original or unoriginal. Cohen's Kappa showed a strong inter-reliability agreement between the two raters ($K = 0.91$), showing that even if originality can be quite subjective, the instruction given to adolescents led them to produce original drawings.

Prior to any statistical analysis, a Mauchly's sphericity test ($p = 0.237$) allowed to perform a repeated measures ANOVA, with originality score as a dependent variable, tool (pen on paper, stylus on tablet, finger on tablet) as repeated factors, and grade (1st, 3rd, 6th, or 8th grade) as between-subject factor. In addition, we performed Cochran analyses to investigate whether the occurrence of graphical transformations varied according to the drawing conditions.

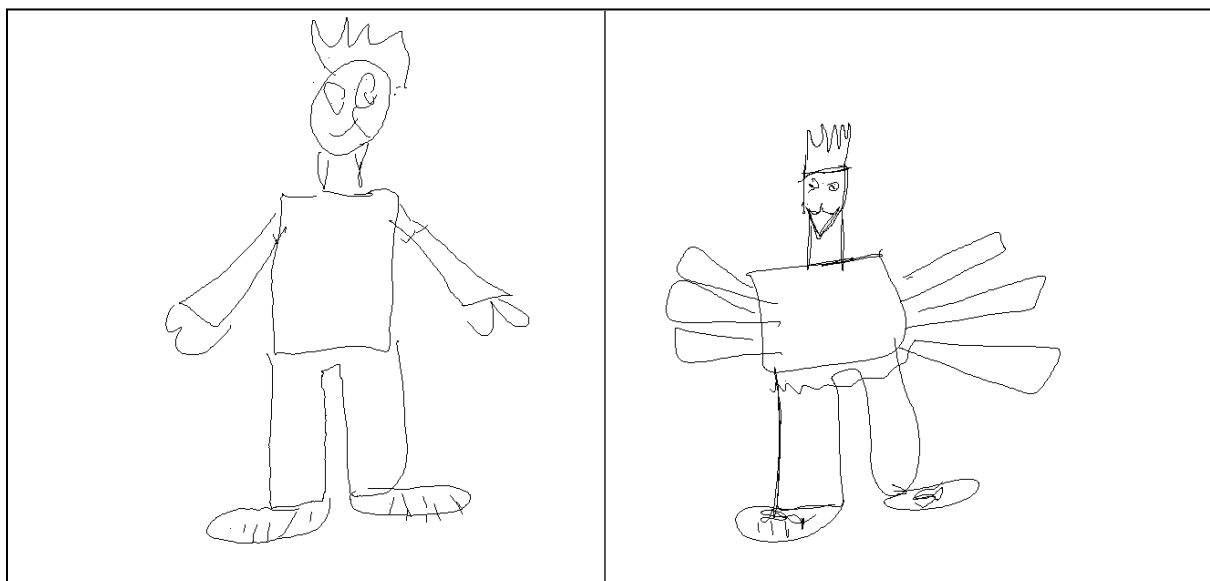


Figure 18. Exemple d'addition et de suppression d'éléments sur un dessin réalisé au stylet sur tablette en 6e: comparé au dessin non original (à gauche), les bras ont été répliqués et les mains ont été supprimées dans le dessin original (à droite).

Figure 18. Example of addition and deletion of elements in stylus drawing on tablet at 6th grade: compared to the unoriginal drawing (on the left), arms have been replicated and hands have been deleted in the original drawing (on the right).

III. Results

A first ANOVA analysis was conducted in order to control for the potential exhausting effect of the procedure, by testing the effect of the instruction order (original then unoriginal; unoriginal then original) and of the tool order (pen-finger-stylus; pen-stylus-finger; stylus-pen-finger; stylus-finger-pen; finger-stylus-pen; finger-pen-stylus) on originality scores. Results showed no significant effect of instruction order on the originality scores, $F(2,114) = 0.854$, $p = 0.42$ $\eta_p^2 = 0.15$, neither of tool order on originality scores $F(10,114) = 0.223$, $p = 0.98$. These results indicate that systematic counterbalancing was enough to thwart the exhausting factor of producing six drawings in row. Therefore, instruction order and tool order were then excluded from the main analysis.

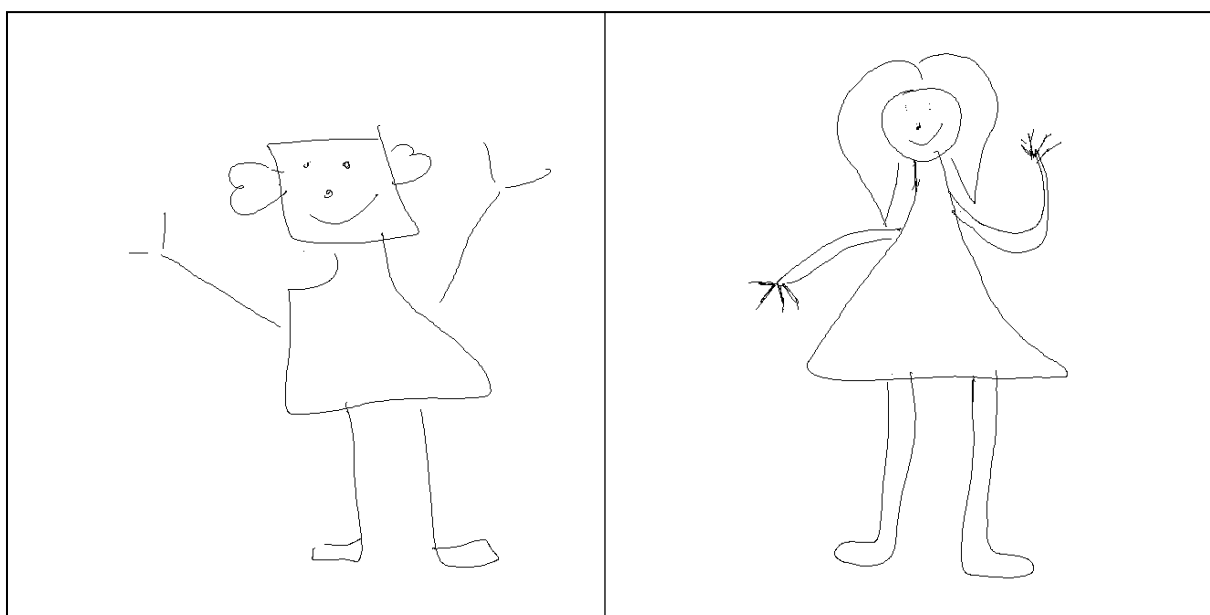


Figure 19. Exemple de modification de la forme des éléments dans un dessin réalisé au stylet sur tablette en 6e: comparé au dessin non original (à gauche), la forme de la tête et du tronc ont été modifiées dans le dessin original (à droite).

Figure 19. Example of shape modification of elements in stylus drawing on tablet at 6th grade: compared to the unoriginal drawing (on the left), the shape of the head and of the trunk has been modified in the original drawing (on the right).



Figure 20. Exemple de modification de la taille des éléments et de modification de l'orientation dans un dessin réalisé au doigt sur tablette en CE2: comparé au dessin non original (à gauche), la taille des oreilles et des cheveux a été modifiée, et l'orientation des yeux a changé dans le dessin original (à droite).

Figure 20. Example of size modifications on elements and orientation modification in finger drawing on tablet at 3rd grade: compared to the unoriginal drawing (on the left), the size of the ears and hairs has been modified, and eyes orientation changed in the original drawing (on the right).

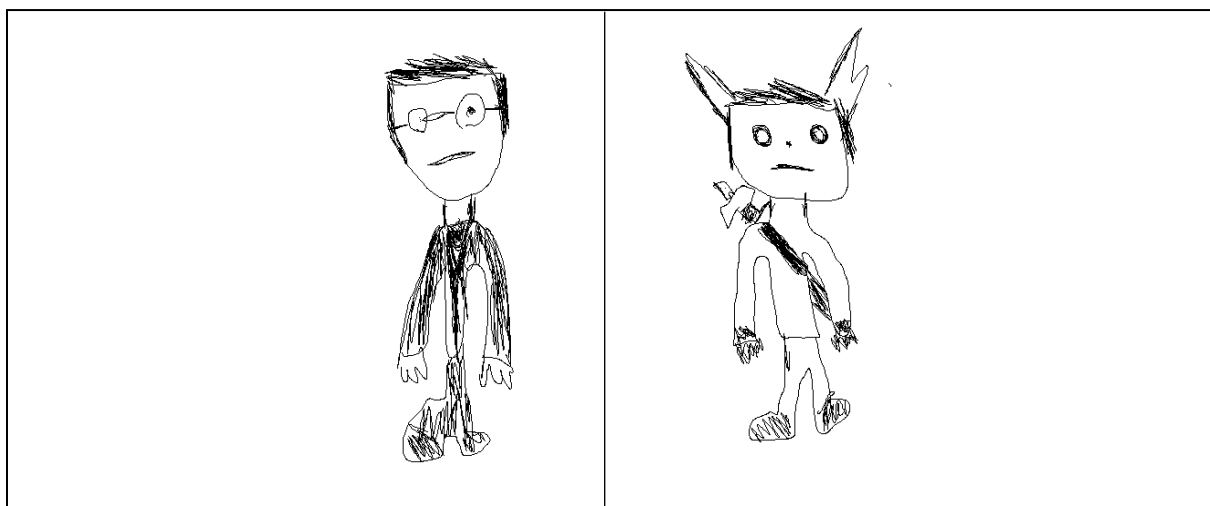


Figure 21. Exemple d'insertion de nouveaux éléments dans un dessin réalisé au stylet sur tablette en 6e: comparé au dessin non original (à gauche), les oreilles ont été ajoutées dans le dessin original (à droite).

Figure 21. Example of insertion of novel elements in stylus drawing on tablet at 6th grade: compared to the unoriginal drawing (on the left), ears have been added to the original drawing (on the right).

We then performed an ANOVA to analyze the effect of varying proprioceptive information with different tools (finger on tablet, stylus on tablet, pen on paper) on originality scores in the 4 groups of children (1st, 3rd, 6th, and 8th grade). Results showed a significant effect of the grade, $F(3,65) = 3.83$, $p = .01$ $\eta_p^2 = .15$, such that, as shown on Figure 6, originality scores increased from the 1st ($M = 2.59$, $SD = 1.41$), 3rd ($M = 3.23$, $SD = 1.55$), 6th ($M = 3.65$, $SD = 1.30$) to the 8th grade ($M = 3.87$, $SD = 1.71$). Posthoc Bonferroni comparisons validated this increasing trend, 8th graders scoring significantly higher than 1st graders ($p = .018$).

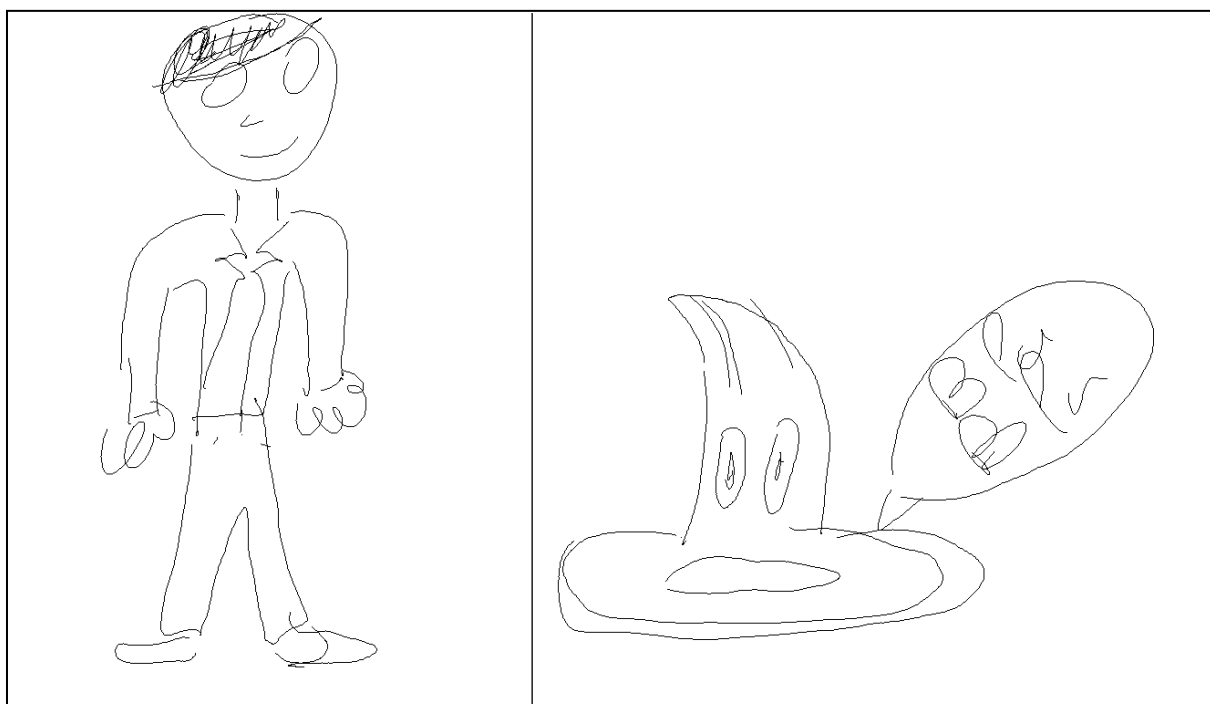


Figure 22. Exemple de modification opérée sur la forme générale et d'insertion de catégorie interconceptuelle dans un dessin réalisé au doigt sur tablette en 6e: comparé au dessin non original (à gauche), l'ensemble du dessin original (à droite) était de forme différente et incluait des insertions de catégories interconceptuelles de sorte que le bonhomme était représenté par un chapeau.

Figure 22. Example of modifications operated on the form of the whole and of cross-conceptual categories insertion in finger drawing on tablet at 6th grade: compared to the unoriginal drawing (on the left), the whole original drawing (on the right) was differently shaped and included cross-category insertion such that the man was represented as a hat.

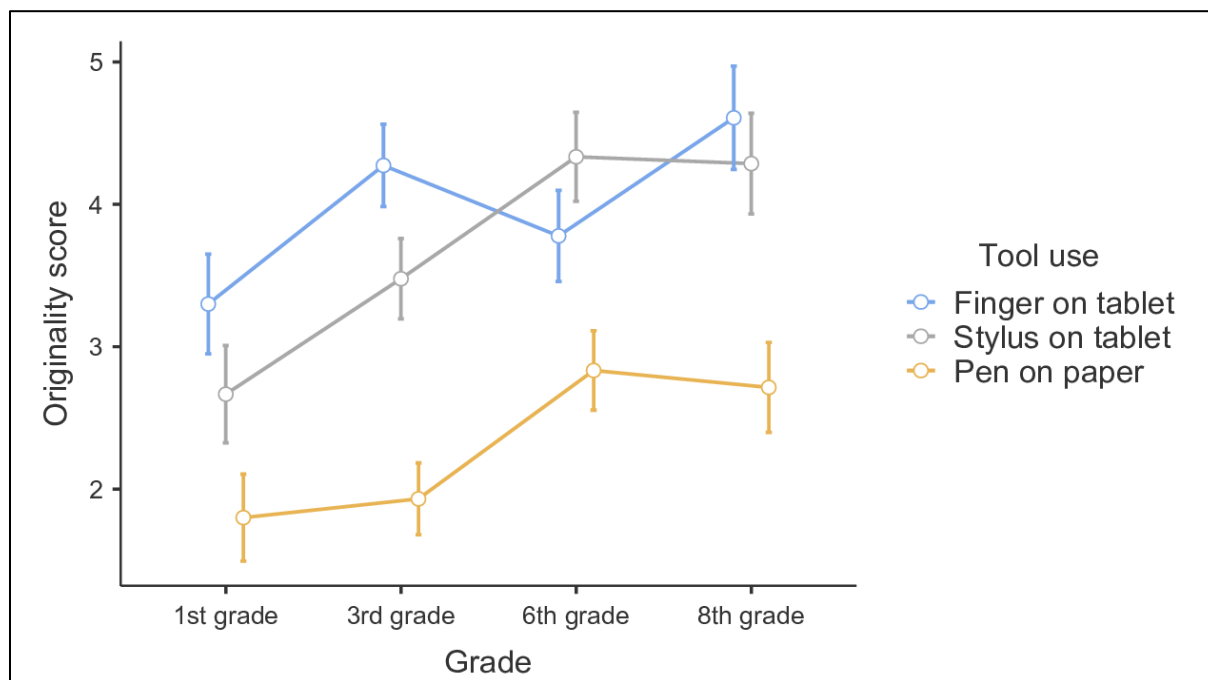


Figure 23. Scores d'originalité (moyenne et erreur standard de la moyenne) en fonction de l'outil utilisé et de la classe.

Figure 23. Originality scores (mean and standard errors of mean) according to the tool used and grade.

A significant effect of the tool used on originality scores was also observed, $F(2,130) = 85.43$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.57$. As shown in Figure 6, originality scores were higher for drawings produced on tablet with finger ($M = 4.00$, $SD = 1.41$) and on tablet with stylus ($M = 3.69$, $SD = 1.45$), compared to drawings produced with pen on paper ($M = 2.30$; $SD = 1.24$). *Post hoc* Bonferroni comparisons confirmed that finger and stylus were not significant ($p = 0.148$), while significant differences were found between finger and pen ($p < 0.001$) and stylus and pen ($p < 0.001$).

Finally, the ANOVA also revealed an interaction between the tool used and the grade factor, $F(6,130) = 4.11$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.16$, such that, although originality scores increased with the school grade and were higher for drawings produced with finger than with pen, an exception was observed for the 1st grade. As shown in Figure 6 and Table 3, while 3rd, 6th,

and 8th graders performed better with fingers ($p < 0.001$) and with stylus ($p < 0.001$) compared to pen on paper, 1st graders performed better only with fingers compared to pen on paper ($p < 0.001$), stylus compared to the pen being non-significant ($p = 0.111$).

Table I. Descriptive analysis of originality scores according to the grade and tool used.

Tableau 9. Analyse descriptive des scores d'originalité en fonction de la classe et de l'outil utilisé.

		Finger on tablet	Stylus on tablet	Pen on paper
1st grade	N	15	15	15
	Mean	3.30	2.67	1.80
	Median	3.00	3.00	1.50
	SD	1.37	1.32	1.18
	Range	4.50	4.50	4.50
	Min - Max	1.50 - 6	0.50 - 5.00	0.50 - 5.00
3rd grade	N	22	22	22
	Mean	4.27	3.48	1.93
	Median	4.25	3.50	2.00
	SD	1.34	1.29	1.03
	Range	5.50	5.50	4.50
	Min - Max	2.00 - 7.50	1.00 - 6.50	0.00 - 4.50
6st grade	N	18	18	18
	Mean	3.78	4.33	2.83
	Median	3.75	4.50	2.50
	SD	1.17	1.10	1.21
	Range	4.50	3.50	4.50
	Min - Max	2.00 - 6.50	2.50 - 6.00	1.00 - 5.50
8st grade	N	14	14	14
	Mean	4.61	4.29	2.71
	Median	4.50	4.25	2.50
	SD	1.57	1.63	1.37
	Range	6.00	6.00	4.50
	Min - Max	1.50 - 7.50	1.00 - 7.00	0.50 - 5.00

In order to analyze the degree to which each item was used to modify the drawn man in each condition (finger, stylus, and pen), a second analysis was conducted using Cochran's Q test.

This analysis was aimed at determining whether a drawing condition favored more specifically a category of transformation. First, Table 4 shows that all elements of the man being confounded, each category of transformation was used in each condition, meaning that each tool is likely to elicit each type of modification. Results also revealed that each type of modification was not equally used. Participants made more addition or deletion [$Q(2) = 35.18; p < 0.001$], insertion [$Q(2) = 9.91; p = 0.007$], and modified more frequently the shape [$Q(2) = 40.71; p < 0.001$] and size [$Q(2) = 17.31; p < 0.001$] of elements when drawing with finger or with stylus on tablet, than with a pen on paper. Thus, although each category of transformation was observed whatever the support used, transformations were more used when drawing on a tablet with fingers and stylus than on paper with a pen, all elements confounded.

Table 10. Occurrence (percentage) of each item of originality scale as a function of drawing condition (significant differences on Cochran's Q test are in bold).

Tableau 10. Occurrence (en pourcentage) de chaque item de l'échelle d'originalité en fonction de la condition de dessin (les différences significatives au test de Cochran son ten gras).

	Finger	Stylus	Pen
I - Deletion or addition of elements			
0 - All elements confounded	15,49	13,86	8,6
1- Head	5,8	4,35	0
2- Eyes	15,94	14,49	13,04
3- Nose	21,74	28,98	11,59
4- Mouth	20,29	10,14	11,59
5- Nostrils	0	1,45	0
6- Teeth	0	4,35	2,9
7- Ears	4,35	11,6	2,9
8- Hairs	26,09	27,54	23,2
9- Neck	24,64	15,94	4,34
10- Tronk	5,8	4,35	0
11- Shoulders	0	0	0
12- Arms	18,85	18,85	10,14
13- Hands	18,84	15,94	11,59
14- Fingers	37,68	33,33	11,59
15- Legs	23,19	13,04	15,94
16- Feet	25,64	17,4	18,84
II - Shape of elements			

0 - All elements confounded	22.28	21.37	14.49
1- Head	3,68	26,09	15,94
2- Eyes	59,42	50,72	31,88
3- Nose	8,69	14,49	5,8
4- Mouth	30,43	40,58	33,33
5- Nostrils	0	0	0
6- Teeth	0	1,45	1,45
7- Ears	0	2,9	1,45
8- Hairs	43,48	43,48	34,8
9- Neck	15,94	10,14	5,8
10- Trunk	53,62	47,83	33,33
11- Shoulders	0	0	0
12- Arms	34,8	36,23	11,6
13- Hands	4,35	5,8	1,45
14- Fingers	10,14	10,14	11,6
15- Legs	39,13	33,33	23,18
16- Feet	18,85	18,85	20,29
III - Size of elements			
0 - All elements confounded	4,35	3,89	1,53
1- Head	13,04	13,04	5,8
2- Eyes	1,45	2,9	0
3- Nose	4,35	1,45	0
4- Mouth	1,45	1,45	0
5- Nostrils	0	0	0
6- Teeth	0	0	0
7- Ears	1,45	1,45	1,45
8- Hairs	1,45	0	0
9- Neck	4,35	8,7	2,9
10- Tronk	11,59	4,35	4,35
11- Shoulders	0	0	0
12- Arms	13,04	10,14	4,35
13- Hands	1,45	1,45	1,45
14- Fingers	2,9	1,45	1,45
15- Legs	11,6	11,6	2,9
16- Feet	1,45	4,35	0
IV - Insertion of new elements			
0 - All elements confounded	5,34	5,8	3,26
1- Head	7,25	10,14	5,8
2- Eyes	1,45	1,45	1,45
3- Nose	11,59	4,35	1,45
4- Mouth	1,45	7,25	4,35

5- Nostrils	1,45	1,45	0
6- Teeth	5,8	1,45	5,8
7- Ears	13,04	10,14	2,9
8- Hairs	14,5	5,8	8,7
9- Neck	4,35	7,25	0
10- Tronk	0	8,7	4,35
11- Shoulders	0	0	0
12- Arms	1,45	2,9	5,8
13- Hands	5,8	8,7	2,9
14- Fingers	5,8	8,7	4,35
15- Legs	7,25	7,25	1,45
16- Feet	4,35	7,25	2,9
V - Position, orientation and perspective modifications			
1- On the whole	0	0	0
2- On elements	2,9	0	1,45
VI - Cross-conceptual categories modification			
On the whole	4,35	4,35	2,9
VII - Form of the whole			
On the whole	18,84	2,9	2,9

Then, we performed Cochran's Q test on each category of transformation for each element considered for the drawing of a man (see Table 4) according to drawing conditions (finger on tablet, stylus on tablet, and pen on paper). Among the 15 elements constituting the man, shoulders were never modified, and nostrils were very few modified (< 5% in each category). All other elements were modified in the three drawing conditions. However, Cochran's Q test revealed some differences in the degree to which each element was modified according to the tool used. Results showed that nose addition or deletion [$Q(2) = 7.52$; $p = 0.02$], neck addition or deletion [$Q(2) = 12.87$; $p = 0.002$], and finger addition or deletion [$Q(2) = 16.41$; $p < 0.001$] were more used with finger and stylus on tablet than with pen on paper, as well as eyes shape [$Q(2) = 12.87$; $p = 0.002$], trunk shape [$Q(2) = 8.66$; $p = 0.01$], and arms shape [$Q(2) = 16.06$; $p < 0.001$]. In addition, head shape [$Q(2) = 9.66$; $p = 0.008$], neck shape [$Q(2) = 6.72$; $p = 0.03$], and nose insertion [$Q(2) = 7.09$; $p = 0.03$] were more used only by finger on tablet than with pen on paper, and ears addition or deletion was more used with stylus on tablet

than with finger on tablet or pen on paper, $Q(2) = 6.20$; $p = 0.04$. The form of the whole was more modified with finger on tablet than with stylus on tablet or pen on paper, $Q(2) = 16.13$; $p < 0.001$.

IV. Discussion

The present study was aimed at determining if the modification of sensory afferences could affect originality in drawings produced by children and adolescents aged 6–14.

First, control analyses proceeded on the originality scale revealing that all categories of modification were used by participants with each tool, all elements confounded. This result means that the scale allowed for assessment modifications operated with each tool used, and thus didn't favor the scoring of originality in a drawing condition over another. Therefore, items used to assess originality were modified as well on the tablet with fingers or stylus as on paper with a pen. This analysis also revealed that modifications were higher on the tablet with fingers and stylus than with pen on paper. These higher originality scores on the tablet with finger or stylus are not tied to one specific category or element but reflect the overall occurrence of original modifications that were generally lower in pen on paper condition than with finger on the tablet or with stylus on the tablet. Thus, varying sensory afferences with the use of tablets seem to have led to globally more modifications.

If creativity is related to sensory afferences, then it was expected that drawing with fingers on the tablet would increase originality at all ages, compared to drawings made with pen on paper. Our first hypothesis stated that increasing proprioceptive feedback on fingertips could enhance motor control, resulting in a reduced cognitive load allocated to motor control in favor of the drawing task. Thus, we expected that enhancing proprioceptive feedback on fingertips when drawing on the tablet with fingers would increase originality at all ages in comparison to the use of a pen on paper.

The results from the present study confirm our first hypothesis, such that increasing haptic afferences to fingertips increased originality. As a matter of fact, children and adolescents produced more original drawings when drawing with fingers on the tablet rather than with pen on paper as revealed by higher originality scores obtained from drawing with fingers on the tablet. This result observed in adolescents up to 14 years extends the previous ones obtained in children aged 5–6 and 7–8 years demonstrating that drawing with fingers on the tablet led to more originality in drawings compared to the use of pen on paper (Bitu *et al.*, 2019). Using fingers to draw on the tablet increased the friction between finger and screen leading in turn to an increase in the amount of available proprioceptive information. Drawing with fingers leads to an enrichment of sensory feedback to fingertips that, in turn, enhances the creative process during a drawing task from 1st to 8th grade. This effect was observed both before and after 7 years old: increasing proprioceptive afferences enhanced the originality of children aged 7 years and more, who are able to make appropriate use of proprioceptive feedback to correct their ongoing movement (Holst-Wolf *et al.*, 2016), but also of younger ones who do not accurately use proprioceptive feedback for online control of movements (Bairstow & Laszlo, 1981; Laszlo & Bairstow, 1984). Consequently, it could be suggested that amplifying proprioceptive information may have facilitated children's creative process by reducing the cognitive load allocated to the motor control (intrinsic load), in favor of more cognitive resources for the creative process (essential load).

Conversely, using a stylus on the tablet is known to induce a sliding effect which decreases the friction between the stylus and the screen, leading in turn to a decrease in available proprioceptive afferences (Alamargot & Morin, 2015). This decrease in available proprioceptive afference could impair the cognitive process involved in the task, by increasing the intrinsic load with resources that can't be allocated for the essential processing, i.e., producing original drawing. Our second hypothesis stated that using a stylus on tablet would

decrease originality in drawings at all ages as a consequence of the higher cognitive load induced by this situation. Thus, we expected that reducing proprioceptive feedback when drawing with a stylus on tablet would decrease originality at all ages in comparison to the use of a pen on paper. This second hypothesis was not validated. We observed that 1st graders performance when drawing with a stylus on tablet were similar to pen on paper. Lowering the available proprioceptive feedback in a drawing task did not affect 1st graders, who are known to struggle with the use of accurate proprioceptive information from the use of stylus on the tablet. It could be suggested that these young children may have used compensating strategies based on a greater mobilization of the visual component in accordance with empirical data reporting that young children are known to rely more heavily on visual rather than proprioceptive information during an action (Bard & Hay, 1983; Contreras-Vidal, 2006). In accordance with results reported by Guilbert *et al.* (2019) with 2nd graders, using a tablet with stylus may have enhanced visual information compared to a pen on paper, leading young children to pay more attention to the tracing that could, in turn, lead to a more intense analysis of the traced shapes and increase creativity. However, as suggested by cognitive load theory, paying more attention to the gesture should have deteriorated the cognitive resources allowed for the original task.

On the contrary, from 3rd to 8th grade, children and adolescents obtained higher originality scores when drawing with a stylus than when drawing with a pen. By 8/9 years, children were affected by the use of a stylus on a tablet, but in a positive way, such that it strengthened their originality performance. This unexpected effect could be explained as a consequence of more accurate use of afferent proprioceptive information by 8/9 years, which, along with visual information, leads to a significant improvement in predictive motor control (von Hofsten & Rösblad, 1988; Chicoine *et al.*, 1992). As reminded in the introductive section, this improvement leads to a switch from a feedback motor control where children make pauses to

control their movement with visual verification, to a feedforward motor control relying more accurately on the movement prediction. Consequently, by 8/9 years, the sensory prediction could be used to compensate for the loss of proprioceptive afferences. However, if 3rd to 8th grade children and adolescents had compensated for the initial loss of proprioceptive information with the use of feedforward motor control to make sensory predictions, this compensating strategy should have, according to the cognitive load theory (Sweller *et al.*, 2011), increased the intrinsic load leading to a reduced cognitive resource allocated to the original task. The opposite was observed.

Altogether, the obtained results revealed that originality scores varied according to the proprioceptive afferences children and adolescents had to deal with during the drawing task. Results obtained with the stylus revealed a modulation of the tool on originality according to the age of the participants that do not fit in the hypotheses formulated with the cognitive load framework. Why did children and adolescents from 3rd grade and older draw more original drawings with stylus on tablet compared to pen on paper?

The embodied perspective of creativity could bring some arguments in the understanding of this increased performance induced by the use of a stylus in a creative drawing task. By enhancing proprioceptive information used in the prediction process, the feedforward motor control may have supported prediction possibilities involved in creativity (Dietrich & Haider, 2015). Indeed, the present results could be interpreted according to the theoretical model of creativity recently proposed by Dietrich and Haider (2015) who conceived creativity as an abstract form of sensorimotor prediction run by internal models of motor control of action (Wolpert *et al.*, 1995; Miall & Wolpert, 1996; Kawato, 1999; Wolpert & Ghahramani, 2004). In the case of creativity, internal models would allow to generation and evaluate new and original ideas, on a trial-and-error basis, by chaining multiple internal model loops. In each of

these loops, direct models would allow the generation of various ideas to reach a creative goal sent by the efference copy from inverse models. Generated ideas would be compared to the creative goal and, when they are not enough new or adapted to the context, are used as a source of information for a new loop iteration until the comparator selects the most original and adapted idea. The creative process would thus be a predictive mechanism rooted in sensorimotor activity in which sensory consequences of motor commands play a fundamental role. As a matter of fact, sensory inputs feed internal models to validate or invalidate the selected motor programs, by comparing sensory afferences available in the task to the sensory prediction. Applied to creativity, sensory afferences used in internal models would allow for validation or invalidation of each variation of ideas, by comparing sensory afferences available in the task, to the sensory prediction. Sensory afferences would thus feed multiple iterations of the internal model loops, allowing to generate variations of ideas, and selecting the one the more adapted to the context. In this way, creativity would be rooted, as suggested by Dietrich and Haider (2015), in sensorimotor control of the action. Consequently, modifying sensory feedback with finger and stylus may have impacted the mobilization of the originality process: the sensory afferences specifically generated in a given action space (stylus on tablet or finger on the tablet) may have modulated originality by delimiting the range of possible outcomes, as well in generating as in selecting ideas. As reminded in the section “Introduction,” up to 7/8 years, children felt some difficulties in using accurate proprioceptive afferences. By 8/9 years, they demonstrated an improvement in processing proprioceptive information which led to an increase in the use of feedforward motor control strategy to maximize sensory input (Guilbert *et al.*, 2019). This improvement could be the reason why children’s originality in stylus on tablet drawing was significantly higher than with pen on paper.

The present research revealed the last result that was not expected and could be in line with the previous idea. Whether drawings were made on the tablet or paper, originality scores among

age groups showed an increasingly linear trend. This result partially confirms the first observation of Torrance (1968) who described creativity development as following a linear trend. However, Torrance (1968) added that 3 slump periods accompanied this positive progression, identified at 5 years, 9–10 years, and 13–14 years. He suggested that these three slump periods would be linked to changes occurring during the scholar course, such that children have to comply with the new scholar normative environment in which they are enrolled (Torrance, 1968). Contrary to Torrance, we did not observe these slumps. This could be explained according to the age of the participants (6–7 years, 8–9 years, 11–12 years, and 13–14 years) which are critical periods identified in the development of predictive motor control. As mentioned in the section “Introduction,” these age groups correspond to periods before (1st grade), during (3rd and 6th grade), and after (8th grade) the transition concerning the use of internal models of action. From the present result, we reported and in regard to the several theories discussed, it could be suggested that the development of creativity overlaps the development of predictive motor control. Future research should therefore focus on creative development through the lens of predictive motor control, for example by tracking kinematics changes in comparison to creative assessment throughout childhood.

Several limitations can be noted in our study. First, we did not consider participants’ daily use of technologies, which could have favored some children over others in the use of tablets in comparison to paper. However, Bitu *et al.* (2019) addressed a survey of parents with the aim of controlling this variable and found no effect of technology uses on originality gain in a drawing task on the tablet. Moreover, interacting with tablets involves only a few formal knowledge and simple gestures (Dubé & McEwen, 2015). For this reason, we used a functional task to make sure participants were able to use the basic gestures needed for the interaction on the tablet. Second, several factors pointed out by the multivariate approach to creativity (Lubart *et al.*, 2003) could have played a role in explaining our results. More specifically, motivation may

have been a confounding factor in the present study which could explain part of the difference obtained in originality scores between tablet and paper. Indeed, for children and adolescents, using tablets induce better motivation and engagement in the task (Clark & Luckin, 2013; Dubé & McEwen, 2015). More specifically, the easiness of use of tablet screens and the physical interaction consecutive to the tactile feature intensely engage children and adolescents in a multimodal task, leading to a better motivation (Amadiou & Tricot, 2014; Crescenzi *et al.*, 2014; Geist, 2014; Dubé & McEwen, 2015). Further studies should isolate this component to determine the part of benefits due to motivation and engagement induced by the tools used.

To conclude, this study contributes to a better understanding of the process of creativity. This first empirical study highlights the crucial role played by sensory afferences in creative thinking. Moreover, it opens new avenues on the understanding of creativity that could be investigated as a predictive process rooted in predictive motor control as suggested by Dietrich and Haider (2015). Future studies should investigate this new issue.

REFERENCES

- Alamargot, D., & Morin, M. F. (2015). Does handwriting on a tablet screen affect students' graphomotor execution? A comparison between grades two and nine. *Human movement science*, 44, 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2015.08.011>
- Amadiou, F., & Tricot, A. (2014). *Apprendre avec le numérique: mythes et réalités*. Retz.
- Bairstow, P. J., & Laszlo, J. I. (1981). Kinaesthetic sensitivity to passive movements and its relationship to motor development and motor control. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 23(6), 606-616. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1981.tb02042.x>
- Bara, F., & Gentaz, E. (2011). Haptics in teaching handwriting: The role of perceptual and visuo-motor skills. *Human movement science*, 30(4), 745-759.
- Bara, F., & Tricot, A. (2017). Le rôle du corps dans les apprentissages symboliques: apports des théories de la cognition incarnée et de la charge cognitive. *Recherches sur la Philosophie et le Langage*, 33, 219-249.
- Bard, C., & Hay, L. (1983). Etude ontogénétique de la coordination visuo-manuelle. *Canadian Journal of Psychology/Revue canadienne de psychologie*, 37(3), 390.
- Bashwiner, D. (2018). The neuroscience of musical creativity. *The Cambridge Handbook of the Neuroscience of Creativity*, 51, 495-516.
- Bashwiner, D., & Bacon, D. (2019). Musical creativity and the motor system. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 27, 146-153.
- Barron, F. (1988). Putting creativity to work. *The nature of creativity*, 76-98.
- Bitu, F., Jouen, F. & Molina, M. (2019). Les apports de l'interface tactile numérique dans l'expression créative graphique : une étude exploratoire chez des enfants d'âge scolaire. *Enfance*, 3, 357-373. <https://doi.org/10.3917/enf2.193.0357>
- Brown, M. C., McNeil, N. M., & Glenberg, A. M. (2009). Using concreteness in education: Real problems, potential solutions. *Child Development Perspectives*, 3(3), 160-164.
- Caeyenberghs, K., Wilson, P. H., Van Roon, D., Swinnen, S. P., & Smits-Engelsman, B. C. (2009). Increasing convergence between imagined and executed movement across development: evidence for the emergence of movement representations. *Developmental science*, 12(3), 474-483. <https://doi.org/10.1080/87565640802499183>
- Chicoine, A. J., Lassonde, M., & Proteau, L. (1992). Developmental aspects of sensorimotor integration. *Developmental Neuropsychology*, 8(4), 381-394.
- Clark, W., & Luckin, R. (2013). iPads in the Classroom. *What The Research Says*.
- Contreras-Vidal, J. L. (2006). Development of forward models for hand localization and movement control in 6-to 10-year-old children. *Human movement science*, 25(4-5), 634-645. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2006.07.006>
- Cooper, L. Z. (2005). Developmentally appropriate digital environments for young children. *Library trends*, 54(2), 286-302. <https://doi.org/10.1353/lib.2006.0014>.

- Crescenzi, L., Jewitt, C., & Price, S. (2014). The role of touch in preschool children's learning using iPad versus paper interaction. *Australian Journal of Language and Literacy*, 37(2), 86-95.
- Dietrich, A., & Haider, H. (2015). Human creativity, evolutionary algorithms, and predictive representations: The mechanics of thought trials. *Psychonomic bulletin & review*, 22(4), 897-915. <https://doi.org/10.3758/s13423-014-0743-x>
- Dubé, A. K., & McEwen, R. N. (2015). Do gestures matter? The implications of using touchscreen devices in mathematics instruction. *Learning and Instruction*, 40, 89-98. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2015.09.002>
- Duff, W. (1767). *An essay on original genius: and its various modes of exertion in philosophy and the fine arts, particularly in poetry*. Edward and Charles Dilly.
- Fleury, S., Agnes, A., Vanukuru, R., Goumillout, E., Delcombel, N., & Richir, S. (2020). Studying the effects of visual movement on creativity. *Thinking skills and Creativity*, 36, 100661.
- Gaggioli, A., Falletta, E. M., Ferrise, F., Graziosi, S., Gallace, A., D'Ausilio, A., ... & Chirico, A. (2019). Effects of interpersonal sensorimotor synchronization on dyadic creativity: Gender matters. *Frontiers in psychology*, 9, 2604.
- Galton, F. (1879). Psychometric experiments. *Brain*, 2(2), 149-162.
- Galton, F. (1883). *Inquiries into human faculty and its development*. Macmillan.
- Geist, E. A. (2012). A qualitative examination of two year-olds interaction with tablet based interactive technology. *Journal of Instructional Psychology*, 39(1).
- Geist, E. (2014). Using tablet computers with toddlers and young preschoolers. *Young Child*. 69, 58–62.
- Gerth, S., Klassert, A., Dolk, T., Fliesser, M., Fischer, M. H., Nottbusch, G., & Festman, J. (2016). Is handwriting performance affected by the writing surface? Comparing preschoolers', second graders', and adults' writing performance on a tablet vs. Paper. *Frontiers in psychology*, 7, 1308.
- Goodenough, F. L. (1926). *Measurement of intelligence by drawings*. Harcourt, Brace & World, New York (1926)
- Guilbert, J., Alamargot, D., & Morin, M. F. (2019). Handwriting on a tablet screen: Role of visual and proprioceptive feedback in the control of movement by children and adults. *Human movement science*, 65, 30-41.
- Guilbert, J., Jouen, F., & Molina, M. (2018). Motor imagery development and proprioceptive integration: Which sensory reweighting during childhood?. *Journal of experimental child psychology*, 166, 621-634.
- Guilford, J. P. (1956). The structure of intellect. *Psychological bulletin*, 53(4), 267. <https://doi.org/10.1037/h0040755>
- Guilford, J. P. (1967). Creativity: Yesterday, today and tomorrow. *The Journal of Creative Behavior*, 1(1), 3-14. <https://doi.org/10.1002/j.2162-6057.1967.tb00002.x>
- Hay, L. (1978). Accuracy of children on an open-loop pointing task. *Perceptual and Motor Skills*, 47(3_suppl), 1079-1082. <https://doi.org/10.2466/pms.1978.47.3f.1079>

- Hay, L. (1979). Spatial-temporal analysis of movements in children: motor programs versus feedback in the development of reaching. *Journal of Motor Behavior*, 11(3), 189-200. <https://doi.org/10.1080/00222895.1979.10735187>
- Holst-Wolf, J. M., Yeh, I., & Konczak, J. (2016). Development of proprioceptive acuity in typically developing children: normative data on forearm position sense. *Frontiers in human neuroscience*, 10, 436.
- James, W. (1880). *The feeling of effort*. The Society.
- Jeannerod, M. (1994). The representing brain: Neural correlates of motor intention and imagery. *Behavioral and Brain sciences*, 17(2), 187-201.
- Kandel, S., & Perret, C. (2015). How do movements to produce letters become automatic during writing acquisition? Investigating the development of motor anticipation. *International Journal of Behavioral Development*, 39(2), 113-120.
- Karmiloff-Smith, A. (1990). Constraints on representational change: Evidence from children's drawing. *Cognition*, 34(1), 57-83. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(90\)90031-E](https://doi.org/10.1016/0010-0277(90)90031-E)
- Kawato, M. (1999). Internal models for motor control and trajectory planning. *Current opinion in neurobiology*, 9(6), 718-727.
- Korkman, M., Kirk, U., & Kemp, S. (2014). *NEPSY-II*. Madrid: Pearson.
- Laszlo, J. I., & Bairstow, P. J. (1984). Handwriting: Difficulties and possible solutions. *School Psychology International*, 5(4), 207-213. <https://doi.org/10.1177/0143034384054004>
- Lubart, T. I., & Georgsdottir, A. S. (2004). Créativité, haut potentiel et talent. *Psychologie française*, 49(3), 277-291.
- Lubart, T., Mouchiroud, C., Tordjam, S., & Zenasni, F. (2003). *Psychologie de la créativité*. Paris: Armand Colin.
- MacKinnon, D. W. (1962). The nature and nurture of creative talent. *American psychologist*, 17(7), 484. <https://doi.org/10.1037/h0046541>
- Mayer, R. E. (2005). Cognitive theory of multimedia learning. *The Cambridge handbook of multimedia learning*, 41, 31-48.
- Mayer, R. E., & Moreno, R. (2003). Nine ways to reduce cognitive load in multimedia learning. *Educational psychologist*, 38(1), 43-52.
- McManis, L. D., & Gunnewig, S. B. (2012). Finding the education in educational technology with early learners. *Young Children*, 67(3), 14-24.
- Miall, R. C., & Wolpert, D. M. (1996). Forward models for physiological motor control. *Neural networks*, 9(8), 1265-1279.
- Molina M., Tijus C., & Jouen F. (2008). The emergence of motor imagery in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 99, 196-209. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2007.10.001>

- Nikolaeva, E. I., Novikova, A. V., & Vergunov, E. G. (2018). The correlation between intelligence, creativity and the parameters of sensorimotor integration in children of different ages. *Psychology in Russia: State of the art*, 11(2), 68-80.
- Mouchiroud, C., & Lubart, T. I. (2001). Children's original thinking : An empirical examination of alternative measures derived from divergent thinking tasks. *Journal of Genetic Psychology*, 162(4), 382-401. <https://doi.org/10.1080/00221320109597491>
- Ochse, R. (1990). *Before the gates of excellence: The determinants of creative genius*. CUP Archive.
- Patchan, M. M., & Puranik, C. S. (2016). Using tablet computers to teach preschool children to write letters: Exploring the impact of extrinsic and intrinsic feedback. *Computers & Education*, 102, 128-137. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.07.007>
- Piotrowski, J. T., & Meester, L. (2018). Can apps support creativity in middle childhood? *Computers in Human Behavior*, 85, 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.03.030>
- Runco, M. A. (1991). The evaluative, valiative, and divergent thinking of children. *The Journal of Creative Behavior*, 25(4), 311-319.
- Sakr, M. (2018). Multimodal participation frameworks during young children's collaborative drawing on paper and on the iPad. *Thinking Skills and Creativity*, 29, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2018.05.004>
- Smits-Engelsman, B. C., & Wilson, P. H. (2013). Age-related changes in motor imagery from early childhood to adulthood: probing the internal representation of speed-accuracy trade-offs. *Human Movement Science*, 32(5), 1151-1162. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2012.06.006>
- Sternberg, R. J. (1988). A three-facet model of creativity. *The nature of creativity*, 125-147.
- Sternberg, R. J., & Lubart, T. I. (1991). An investment theory of creativity and its development. *Human development*, 34(1), 1-31. <https://doi.org/10.1159/000277029>
- Sternberg, R. J., & Lubart, T. I. (1995). *Defying the crowd: Cultivating creativity in a culture of conformity*. Free press.
- Sternberg, R. J., & Lubart, T. I. (1996). Investing in creativity. *American psychologist*, 51(7), 677.
- Sweller, J., Ayres, P., & Kalyuga, S. (2011). *Cognitive load theory*. New-York: Springer.
- Torrance, E. P. (1968). A longitudinal examination of the fourth grade slump in creativity. *Gifted Child Quarterly*, 12(4), 195-199.
- Villamor, C., Willis, D., & Wroblewski, L. (2010). Touch gesture reference guide. *Touch Gesture Reference Guide*.
- von Hofsten, C., & Rösblad, B. (1988). The integration of sensory information in the development of precise manual pointing. *Neuropsychologia*, 26(6), 805-821. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(88\)90051-6](https://doi.org/10.1016/0028-3932(88)90051-6)
- Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. (2004). Computational motor control. *Science*, 269, 1880-1882.

- Wolpert, D. M., Ghahramani, Z., & Jordan, M. I. (1995). An internal model for sensorimotor integration. *Science*, 269(5232), 1880-1882.
- Wolpert, D. M., & Kawato, M. (1998). Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural networks*, 11(7-8), 1317-1329.

CHAPITRE 11 – UNE PISTE D’INTERVENTION POUR DES ADOLESCENTS PRESENTANT DES TROUBLES DU COMPORTEMENT

La précédente étude (cf. Chapitre 9) a permis de mettre en lumière un lien entre la créativité et l’afférence sensorielle. Utiliser le doigt sur tablette tactile permettait d’augmenter l’originalité des enfants de 6 à 14 ans, tandis qu’utiliser le stylet sur tablette tactile n’apportait des bénéfices que pour les enfants ayant un développement prédictif et une capacité d’intégration sensorielle suffisamment avancés pour compenser la perte de retour sensoriel inhérente à l’utilisation du stylet sur tablette tactile (*i.e.* après 7-8 ans). La croissance des scores d’originalité observés de 6 à 14 ans suggéraient également un chevauchement du développement de la créativité et du développement des capacités prédictives.

Nous nous sommes demandé si l’utilisation des afférences sensorielles pour moduler la créativité pouvait également permettre d’aider des adolescents présentant des troubles du comportement qui sont connus pour retentir sur une difficulté de mobilisation de leurs pensées. La présente étude vise à déterminer si les effets précédemment observés peuvent se retrouver auprès d’enfants et adolescents présentant des difficultés à mobiliser leurs pensées comme cela est reconnu chez les enfants et adolescents présentant un trouble des comportements externalisés. Ces troubles peuvent se comprendre comme une difficulté à mobiliser le sens de l’agentivité. Ce sens de l’agentivité étant dépendant de la sensorimotricité, nous suggérons que l’interaction avec des outils qui favorisent ou contraignent un rehaussement des afférences sensorielles pour le contrôle sensorimoteur de l’action, pourrait, en retour, permettre à ces adolescents de mobiliser positivement leurs pensées dans une tâche créative qui dépend de ces afférences sensorielles.

**CREATIVE DRAWING ON TOUCHSCREEN: POSITIVE ACTING FOR ADOLESCENTS WITH
DISRUPTIVE BEHAVIOR**

Fabien Bitu^{a*}, Béatrice Galinon-Mélénec^b, and Michèle Molina^a

^a*Laboratory of Psychology of Caen Normandy (LPCN EA 7452), University of Caen
Normandy, Caen, France*

^b*Identity and Differentiation of Spaces, Environment and Societies (UMR IDEES 6266
CNRS), University Le Havre Normandy, Le Havre, France*

**Corresponding author: fabien.bitu@unicaen.fr*

Author's note

Fabien Bitu, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4507-042X>

This article is currently being submitted for publication.

Résumé

Les troubles du comportement (TC) peuvent être liés à un manque de contrôle sur une situation, i.e., une altération de la conscience du soi agent. La créativité et le sens de l'agentivité dépendent tous les deux des afférences sensorielles utilisées dans la tâche. Des études récentes ont montré que l'utilisation de tablettes tactiles est particulièrement adaptée pour modifier l'expérience sensorielle, augmentant la créativité des dessins d'enfants et adolescents typiques. Cette étude cherchait à déterminer si l'utilisation de tablettes tactiles pouvait aider des adolescents présentant des TC à mobiliser plus efficacement leurs pensées lors d'une tâche créative. Un total de 31 adolescents avec TC ($m_{age} = 12$ ans, 4 mois) étaient amenés à dessiner un bonhomme qui existe et un bonhomme qui n'existe pas, au doigt ou au stylet tablette, et au crayon sur papier. Les dessins originaux étaient comparés aux dessins non originaux. Un échange post-expérimental a permis de collecter l'expérience subjective des participants après la tâche. Il était attendu que l'utilisation de la tablette au doigt ou au stylet permettrait aux adolescents avec TC de produire plus de dessins originaux comparés à l'utilisation du crayon sur papier, et à exprimer plus d'agréabilité en utilisant les outils qui favorisent un meilleur contrôle de leur action en tant qu'agent. Les résultats ont montré des scores d'originalité plus élevés pour les dessins réalisés sur tablette au doigt ou au stylet en comparaison de ceux réalisés au crayon sur papier. Les participants préféraient l'utilisation de tablettes tactiles plutôt que le papier, lié à l'agréabilité et la sensibilité haptique que le support tactile leur apportait. Cette étude a mis en avant le potentiel de la tablette tactile comme un outil inclusif, améliorant le sens de l'agentivité pour les adolescents avec TC au travers de l'agir positif.

Mot-clés : Créativité, Agentivité, Afférences Sensorielles, Trouble du Comportement, Adolescent

Abstract

Disruptive behavioral disorders (DBD) can be linked to a lack of control over a situation, i.e. an alteration in the awareness of self-agent. Creativity and sense of agency both depends on sensory afferences used in the task. Previous studies showed that using tablets is particularly suitable for modifying sensory experience, increasing typical children and adolescents' creativity in drawings. This study questioned whether the use of tablets could help adolescents with DBD to more efficiently mobilize their thoughts on a creative task. A total of 31 adolescent with DBD ($m_{age} = 12$ years, 4 months) were asked to draw a man that exist and a man that does not exist with finger or stylus on tablet, and with pen on paper. Original drawings were compared to unoriginal ones. An interview allowed to collect subjective experiences of participants after the task. It was expected that the use of a tablet with finger or stylus would allow adolescents with DBD to produce more original drawings compared to the use of pen on paper, and to express more pleasure using the tools that favors a better control of their action as a self-agent. The results showed higher originality scores for drawings realized on tablet with finger or stylus than on paper with a pen. The participants preferred tablets over the paper medium, due to the pleasantness and the haptic sensitivity this support provided. This study highlighted the tablet's potential as inclusive tools, enhancing the sense of agency for DBD adolescents with positive acting.

Keywords: Creativity, Agency, Sensory Afference, Disruptive Behavior Disorder, Adolescent

I. Introduction

Disruptive behavioral disorders are, according to the DSM-V, “disruptive, impulse-control and conduct disorders” (American Psychiatric Association [APA], 2013, p. 461). They are defined as behavioral and emotional self-control troubles, affecting the rights of others at physical (e.g. aggression) and material (e.g. destruction of property) levels, and/or exposing the subject to situations of conflict with societal norms or authority figures (APA, 2013). In children and adolescents, these disorders reveal socially inappropriate behaviors, externalized in the form of aggression, rule breaking, and trivialized violence (Fergusson et al., 2005; Rivenbark et al., 2018). To be diagnosed, so-called externalized disruptive behavior disorders must cause a significant alteration in social, academic, or professional functioning, demonstrating a disorganization of the child, most often externalized in the form of aggression or violence, at home and at school (Krotenberg & Lambert, 2012). Although behavioral disturbances can be observed in multiple disorders identified in the DSM-V, such as, predominantly, neurodevelopmental disorders of attention with or without hyperactivity, or autism spectrum, this diagnosis is set in children and adolescents with no associated neurodevelopmental disorder, without cognitive, perceptual, or motor deficit (APA, 2013). There are traditionally two main types of disruptive behavior disorders: oppositional defiant disorders and conduct disorders. Oppositional defiant disorders are characterized by transgression, opposition, and provocation behaviors, leading to regular conflicts with the child or adolescent’s social environment (APA, 2013; Krotenberg & Lambert, 2012). These disorders are diagnosed with levels of irritability, anger, and defiant behavior, while conduct disorders are characterized by behaviors violating the rights of others, or major age-appropriate societal norms or rules relating to the age of the child (APA, 2013). Conduct disorder thus includes all the behaviors of oppositional defiant disorder to which is added the repeated violation of the fundamental rights of others and of societal norms (Krotenberg & Lambert, 2012). Children and adolescents with

oppositional defiant disorders and conduct disorders together represent between 3% and 12% of young people (Nock et al., 2007). This prevalence is significantly more represented in boys than girls (Berkout et al., 2011; Demmer et al., 2017), varying from 6 to 16% for boys and from 2 to 9% for girls (Krotenberg & Lambert, 2012). This high prevalence makes disruptive behavior disorders the second most diagnosed mental disorder in the world during childhood and adolescence after anxiety (Merikangas et al., 2009). These disorders are considered as major risk factors that can lead to persistent antisocial behavior, substance abuse or depression (Fergusson et al., 2005; Rivenbark et al., 2018).

Given these externalized characteristics, disruptive behavior disorders have a significant impact on the educational and school environment of children and adolescents (Edwards-Duke et al., 2002). Many studies report significant and repeated school failures for children and adolescents with this type of disorder (Barry et al., 2002; Birchwood & Daley, 2012; Risser, 2013; Stipek & Miles, 2008). More specifically, the externalized violence of students with behavioral issues is significantly associated with lower academic performance, significant academic failure, but also with increased conflicts with teachers and peers (Risser, 2013; Stipek & Miles, 2008; Sturaro et al., 2011). Indeed, the disruptive behaviors of these children and adolescents can quickly disturb the activity within the class (Edwards-Duke et al., 2002), compromising their own, but also their peers', academic development (Thomas et al., 2011). These disruptive behaviors generally lead to conflicts and rejection by both peers and teachers, the main consequence of which is to reinforce the externalized disorders of the child and adolescent (Silver et al., 2005; Sturaro et al., 2011; Stipek & Miles, 2008; Tyler et al., 2019). The teacher is quickly disturbed and adopts, in order to defend himself, very rigid and authoritarian attitudes, leading to a stalemate whose only escape is punishment (Canat, 2005). Children and adolescents with disruptive behavior disorder thus suffer multiple disciplinary sanctions, going as far as expulsion from schools, which can be perceived by the child or the adolescent as a

form of rejection by educational institutions (Barker et al., 2010; Harris et al., 2008; Munn & Lloyd, 2005). A study in the United Kingdom reported that the most common reason for expulsion was children and adolescents with persistent disruptive behaviors, accounting for 34% of permanent expulsions from English schools (Martin-Denham, 2020; Department for Education, 2019). School expulsion, far from reducing behavioral problems in children (Bowman-Perrott et al. 2013; Skiba, 2000), has devastating consequences for the schooling of these children and adolescents (Atkinson, 2012), reinforcing the school failure (Brown, 2007), school disinterest (Reschly & Christenson, 2006) and school dropout (Christle et al., 2005). Repeated school failures weaken the bond of trust with the other, with the teacher, and with the demands of the school institution (Canat, 2005). The school institution thus becomes a source of threat for the child or adolescent with this type of disorder (Canat, 2005), who can only have two possible reactions: fight or run away (Krotenberg & Lambert, 2012). In other words, in the context of disruptive behavior disorders, aggression could take the form of a protective shield against a feeling of vulnerability in the relationship to the other or to the institution that is beyond the control of the child or adolescent (Bat Or et al., 2019). The threat prevents these children and teenagers from thinking, putting words, giving meaning, and pushes them towards acting out. As a result, despite preserved cognitive, motor and sensory abilities, the child or adolescent does not show any availability for learning, as he is overwhelmed by his behavioral problems which he is unable to overcome (Krotenberg & Lambert, 2012). For this reason, children and adolescents with disruptive behavior disorders are considered as children with specific educational needs, requiring educational accommodations. The question then arises of finding the pedagogical means to bring these children and adolescents back to learning activities. This question is all the more important in a dynamic of school inclusion (Canat, 2021) as the dominant prerogative since the successive laws of February 11, 2005 and July 8, 2013 in France, which, in the context of disruptive behavior disorders, lead to a paradox between the

necessary school inclusion and the systematic exclusion of the school institution. For these reasons, restoring and developing academic skills in the child or adolescent while re-establishing their connection with the environment seems to be essential (Fortun-Carillat, 2015). The question then arises as to how to get them to reinvest school activities in a positive way.

In order to achieve this objective, it is necessary to question the processes behind these disorders. It is consensually accepted that disruptive behavior disorders have a multifactorial origin, being linked to biological, genetic, social, cultural, family or personal factors (Chabrol, 2004). Regarding to the manifestation of these disorders, several meanings are attributed to it. According to Loisy (1999), behavioral disorders would result from a lack of symbolization leading the child or adolescent to manifest through disruptive behavior disorders, what he cannot or does not know how to verbalize. For other authors such as Canat (2005), these troubles would be the expression of a perpetual search for limits, linked to a difficulty in containing oneself in a given space and framework. The dominant aggressiveness in these disorders is also conceived as the main way to communicate for these children and adolescents. Aggression could thus be considered as a movement towards someone or something (Krotenberg & Lambert 2012). This aggressiveness could also be considered as a way for the child or adolescent to protect himself against hostility or rejection from his environment (Davies & Sturge -Apple, 2014), that is, against a situation over which they have little influence (Bat Or et al., 2019).

A common point emerges from these different interpretations of disruptive behavior disorders: the aggressiveness of young people with disruptive behavior disorders would reflect a lack of control over a situation. It could then be suggested that aggressiveness is underpinned by a loss of the ability to place oneself in the relationship to another (Bat Or et al., 2019; Guilé and

Cohen, 2010). This lack of control over one's own actions and thoughts can be interpreted within the framework of agency. The sense of agency is one of the constitutive phenomenological experiences of self-awareness (Gallagher, 2000; Pacherie & Jeannerod, 2004). It is defined as the ability to recognize that one is the cause (or the origin) of an action or a thought (Gallagher, 2000) and that one can therefore distinguish what is caused by oneself of what is caused by others (Balconi, 2010). As an agent, we are aware of controlling our own actions and our own thoughts and we can, through this control of action and/or thought, influence our physical and relational environment (Knox, 2011; Schwarz et al., 2019). In the case of children and adolescents with externalized disruptive behavior disorders, aggressiveness would then reflect an alteration in the control of actions and in the awareness of the self-agent during social interaction. This interpretation of disruptive behavior disorders could open up a new avenue of intervention with these young people by offering them situations of action that promote the control of their action and thoughts.

The sense of agency is rooted in sensorimotor experience and, that way, can be understood from an embodied and situated perspective of cognition. According to this perspective, cognitive activity is embodied in a sensorimotor system in which sensory afferences and efferences are produced during interaction with the environment (Gallagher, 2006; Kiefer & Harpaintner, 2020; Soliman et al., 2013; Wilson, 2002). It has indeed been shown that the sense of agency depends on external sensory information that reaches us from our environment (Wegner, 2002, 2003), as well as internal sensory information integrated into the motor control of action (Blakemore et al., 2002; Hagard, 2005). The two sources of information would thus play an essential role in the construction of the sense of agency (Kranick & Hallett, 2013; Moore et al., 2009; Moore & Fletcher, 2012; Synofzik et al., 2008a; 2008b; Wegner & Sparrow, 2004; Wegner et al., 2004). More specifically, motor control is managed through the mobilization of internal models (Lebon et al., 2013) according to which the central nervous system would model

the sensory consequences of the action to be performed. This modeling is based on direct models which allow to define the motor sequence to be executed and inverse models which allow to predict the sensory consequences of the motor sequence carried out (Wolpert, 1997; Wolpert & Miall, 1996; Wolpert et al., 1998). The sense of agency would emerge from the comparison between the sensory predictions generated by the inverse models and the sensory consequences of the performed action. The congruence between the predicted and effective sensory consequences of the action would allow to consider oneself as being at the origin of the produced action (Jeannerod, 2009; Wegner, 2003). Therefore, Limerick et al. (2014) suggest that the sense of agency might be enhanced when there is a greater congruence between the internally predicted action, and the actual sensory feedback of that same action. These authors also suggest that, since the sense of agency relies on sensorimotor processes, a greater use of these systems should also enhance the sense of agency. As we mentioned previously, it has been proposed that the aggressiveness of children and adolescents with disruptive behavior disorders could be linked to an alteration in the control of actions involved in the sense of agency, preventing them from mobilizing their cognitive abilities in a task, leading to school dropout. Adapting the sensorimotor action context by favoring the control of the self-agent in a task could be a way of remobilizing the cognitive skills of these children and adolescents. Creative activities offer a context of action that is particularly favorable to the expression of self-awareness as an agent. The creative process necessarily presupposes that the subject can explicitly and intentionally think of himself as being at the origin of the production of a new idea (Dasgupta, 2004; Dietrich & Haider, 2015). Creativity, defined as the ability to produce something that is both new and adapted to the context (Lubart et al., 2015), is a fundamental skill in education, considered an essential aspect of learning (Harris & De Bruin, 2018). For this reason, creativity is seen by teachers, in schools but also in specific education, as the most important educational objective to develop for typical children and for children with specific

educational needs (Kasirer & Shnitzer -Meirovich, 2021). Creativity could constitute a positive context of action that would allow children and adolescents with disruptive behavior disorders to reinforce the experience of the self-agent because of the relationships it maintains with the sensorimotor experience.

Indeed, creativity has recently been conceived as a predictive capacity resulting from sensorimotor action (Dietrich & Haider, 2015; Matheson & Kennett, 2020, 2021). According to this hypothesis, the creative process would be based on a predictive system analogous to the internal models of the motor control of action (Dietrich & Haider, 2015), in which the direct models would allow to explicitly predict the creative idea and the inverse models would predict the sensorimotor solutions to realize it. The comparison between the mechanism for predicting the new idea to be carried out, and the prediction of the motor plans to achieve it, would allow to select the idea that is the most original and adapted to the context of action. The selection of this original idea would be based on a sensorimotor prediction of the creative solution that is the most suited to the context. According to this conception of creativity, the confrontation between the sensorimotor prediction (the generated creative idea), and the result produced (the realized creative idea) would lead to the consciousness of the self-agent. Creativity is thus thought of as an embodied system that relies on the sensory afferences generated by a particular situation of action. Creativity, and the sense of agency it imposes, can therefore be modulated by the different sensorimotor contexts in which it operates: it should be increased in contexts that reinforce sensorimotor control of the action.

The use of touchscreens is particularly suitable for modifying the creative experience (Bitu et al., 2022) and the control of the sensorimotor action resulting from it, according to the sensory interactions proposed by these tools (Limerick et al., 2014). Recent studies have shown that interacting physically with the touchscreen improves creativity during a drawing task in typical

children aged 6-7 and 8-9 (Bitu et al., 2019) and typical adolescents aged 13-14 years (Bitu et al., 2021). In these studies, the authors varied sensory information by asking participants to draw a man (Bitu et al., 2019) or a house (Bitu et al., 2021) that exists and that does not exist, on a traditional support such as paper, and on a tablet. The tablet allowed to vary the sensory inputs using the finger or the stylus on the interface, resulting in modifications of the creative performances according to the tools used. Indeed, the use of the finger on tablet increases haptic information due to the greater friction induced by moving the finger on the screen (Patchan & Puranik, 2016), while the use of the stylus reduces them, causing a sliding effect on the screen surface (Alamargot & Morin, 2015). The effect of these sensory differences modifications on the creative process was observed more specifically with 70 typical children and adolescents aged 6 to 14 from ordinary schools who were asked to draw on a tablet with their fingers, with a stylus, and on paper with a pen (Bitu et al., 2022). The results of this study showed that, at all age, participants produced more original drawings on tablet than on paper, this effect being linked to changes in sensory information induced by the tool used on tablet. Indeed, the increase in haptic information following the use of the finger on tablet made it possible to improve originality scores at all ages. The use of the stylus also provided similar benefits, but only from the age of 8 (Bitu et al., 2022). According to the authors, this last effect could be explained by the fact that, at this age, children are able to implement sensorimotor strategies to control and compensate for the loss of sensory information induced by the stylus (Guilbert et al., 2019). In other words, this study reveals that creativity is increased in situations that offer a better sensorimotor control of actions due to the reinforced haptic information in a finger creative drawing task. In situations that induce a decrease of this same information, creativity is also increased but only from the age of 8, when children would have the possibility to rely on sensorimotor control strategies allowing them to compensate for the loss of sensory inputs. These studies have focused exclusively on the creative productions of children and adolescents

without questioning the sense of agency induced by the graphic production these situations proposed. However, these studies reveal that young people's creativity is increased when the participant acts in situations that favors the sensorimotor control of action, either because the situation reinforces the available haptic information during finger drawing, or because it forces to find sensorimotor control solutions to compensate for a loss of haptic information such as when drawing with a stylus. In these two cases, children and adolescents are more original when they are placed in situations which increase their sensorimotor control of action. Although it was not studied in these studies, one could also expect that this increase in sensorimotor control of action would also induce a greater satisfaction with the use of digital devices, due to an enhanced control of the situation as an agent.

Given the absence of neurodevelopmental, cognitive, or perceptual disorders, but also the preserved sensorimotor control of action capacities (Eliasson et al., 2004) of children and adolescents presenting disruptive behavior disorders without comorbidity, we suggest that this type of population could benefit from the use of interactive technologies to promote the control of their own action as an agent through creative tasks, and thus reconnect with positive acting. More specifically, we hypothesize that the use of a touchscreen medium with a finger or a stylus would allow adolescents with this type of disorder to more efficiently mobilize creative capacities compared to the use of a paper medium. If the increase in creative abilities when interacting with the digital tablet is linked to a better sense of control of the action, adolescents should express a preference for the use of tablet compared to paper support. In other words, they will express more pleasure in using the tool which allows a better control of their action as an agent. The results of this study will be compared with those previously obtained from typical adolescents observed in the study of Bitu et al. (2022) to determine whether the possible benefits of the tablet on creativity are comparable between the two adolescent populations.

II. Method

II.1. Participants

Participants were recruited in three Therapeutic, Educative and Pedagogical Institutes (ITEP) located in Normandy, France. The law article of May 14, 2007³ defines in France an institutional framework governing the ITEP which “*welcomes children, adolescents or young adults who present psychological difficulties whose expression, in particular the intensity of the disruptive behavior disorders, seriously disturbs the socialization and access to learning. These children, adolescents and young adults find themselves, despite preserved intellectual potential, engaged in a disabling process that requires the use of combined actions and personalized support*”. In line with this definition, the recruited adolescents did not show any neurodevelopmental, cognitive, or perceptual disorders. To avoid a potential comorbidity effect, this experience was proposed to every adolescent without any known trouble other than disruptive behavior disorders. The participants were then recruited on a voluntary basis, following an agreement which defined the collection of data, with the agreement of each institute and the written authorization of the legal tutor. On an initial sample of 45 participants, eleven were unable to participate in the study because they did not meet the inclusion criteria or were not allowed to participate. In addition, 3 participants expressed their wish to stop the experimentation before the end of the procedure, leading to a total of 31 adolescents aged 10 to

³ Article D. 312-59-1 of the inter-ministerial circular DGAS/DGS/SD3C/SD6C no. 2007-194 of 14 May 2007 relating to therapeutic, educational and pedagogical institutes and the care of foster children.

15 years ($m_{age} = 12$ years, 4 months; $min = 10$ years, 2 months; $max = 15$ years, 0 months) retained for this study.

II.2. Materials

The digital drawings were made on a Microsoft Surface Pro 4 tablet, with a 12.3" screen with a resolution of 2736 x 1824 px. The stylus drawings were produced using a Microsoft Surface Pen, measuring 144 x 9.5 x 10.2 mm. The drawings were made on an application developed by the authors' laboratory, presenting a white surface on which the participant could draw with a stylus or finger with black traits only, without the possibility of modifying the width of the line. It was impossible to erase the lines produced, neither on the tablet app, nor on the paper. For drawings on traditional media, sheets of paper measuring the same size as the tablet screen (260 x 175 mm) and a black pencil were used.

II.3. Inclusion and exclusion criteria

Prior to the experiment, a series of tests was carried out to define exclusion criteria for each participant.

First of all, one to two weeks before the experiment, the participants were asked to carry out the complete battery of the Wechsler Intelligence Scale for Children (WISC, version IV or V), in order to exclude from the study, each child or adolescent with an intellectual disability.

On the day of the experiment and before it was carried out, each participant had to complete the NEPSY-II instructions comprehension task (Korkman et al., 2014) in order to ensure that each child and adolescent had the ability to understand the given instructions during the procedure. This subtest was specifically developed to assess the ability to receive, process, and

carry out verbal instructions. At each instruction given by the experimenter, the participant had to point the appropriate stimulus, leading to a total instruction comprehension score.

The last set of exclusion criteria was related to the feasibility of the task, such as the identification of a severe visual deficit (e.g., blindness) or a heavy motor deficit (e.g., excessive weakness, paralysis), which would prevent the participant from completing the task correctly. To make sure adolescents were able to complete a graphomotor task, they were asked to perform the visuomotor precision task of the NEPSY-II (Korkman et al., 2014), after completing the instruction comprehension task, allowing to measure graphomotor speed and precision of each adolescent during a graphic task. In this task, the participant was asked to draw a line between two lines as quickly and precisely as possible. The number of errors and the completion time are recorded to compute a visuomotor accuracy score. The lower the score, the higher the level of visuomotor precision.

Altogether, these different tests made it possible to exclude intellectual disorders, comprehension of instructions, and visuomotor precision that could affect a creative drawing task. Participants with results below 2 standard deviations from the standardized mean for their age group were thus excluded from the data analysis.

After carrying out the inclusion and exclusion tests, the participants could take a break before starting the experimental session.

II.4. Control task

Before starting the experiment, and after completing the exclusion tests, each participant was asked to perform a functional task. This task allowed to control for the participant's knowledge of the core actions required to interact with a touchscreen tablet, referenced in the guide of Villamor et al. (2010). Participants were asked to perform 8 main movements inspired by this guide, on Instagram app used offline. If the child or adolescent was in difficulty for one of the

instructions presented, the experimenter could help by verbalizing the required movement to accomplish the targeted action (e.g., "to open the app, you have to double tap"). Table I summarizes the detailed description of each target instruction and movement.

Table 11. Description of the functional task instructions and their correspondence with the reference guide.

Tableau 12. Description des consignes de la tâche fonctionnelle et leur correspondance avec le guide de référence.

Instruction	Targeted movement from Villamor (2010)
Move Instagram icon on desktop	Press & drag
Start Instagram app	Double-tap
Take a picture and add a smiley	Single-tap
Enlarge the smiley	Spread
Shrink it	Pinch
Move it	Tap & drag
Rotate it	Rotate
Turn smiley page to see recent smileys	Flick

II.5. Experimental procedure

Each child and adolescent was met individually in a quiet room within each ITEP. The child was seated on a chair facing a table on which the tablet or a sheet of paper was placed.

Each participant was asked to produce original and non-original drawings of a man, with each tool (finger on tablet, stylus on tablet, pen on paper). The drawings were made following the procedure described by Karmiloff- Smith (1990) initially used with pencil on paper. The teenagers were thus asked to “draw a man who exists” for the non-original drawing, and to

“draw a man who does not exist” for the original drawing. The order of presentation of the instruction (original or non-original) and the medium (pencil on paper, finger on tablet, or stylus on tablet) were systematically counterbalanced for each participant. The duration of the drawing task was free, the participants decided themselves when each drawing was completed. As soon as a drawing was produced, it was removed from the experiment table before the beginning of the next one. The experimenter remained available near the participant throughout the experiment to help him/her in the understanding of the task if necessary.

II.6. Creativity rating

A total of 186 digital drawings (124) and paper drawings (62) were collected for analysis: half of the drawings being original drawings, and the other half non-original drawings. In order to compute an originality score to each drawing, we used the originality rating scale used in Bitu et al. (2022) study. The logic of the scale was to consider as original, each modification made on the original drawing in comparison with the non-original drawing produced by the same adolescent. Thus, points were awarded to items identified on the non-original production (i.e. "a man who does not exist") each time the graphic characteristic was different from the one observed on the non-original drawing version (i.e. "a man who exists").

This scale, based on the original work of Karmiloff-Smith (1990), considered 7 categories of changes observed for the drawing that does not exist compared to the drawing that exists:

- The addition or deletion of elements (e.g., two heads instead of one, the deletion of arms), coded in our scale as the addition or deletion of elements that were already drawn in the drawing of a man who exist;
- The modification operated on the shape of the elements (e.g., a triangular head instead of a round head);

- The modification operated on the size of the elements (e.g., a head twice as large as the trunk);
- The insertion of new elements (e.g., wings added to the trunk), referring to the insertion of something that was not drawn on the drawing of a man who exists;
- Modifications of position, orientation, and perspective of the elements or of the drawing as a whole (e.g., eyes and mouth reversed);
- Cross-conceptual modifications of the drawing as a whole (e.g., an animal-shaped man);
- Changes made to the general shape of the drawing, as a whole (e.g. a triangle-shaped man).

These seven categories evaluated both changes made to the overall drawing and local changes made to elements of the drawing. The local elements of the drawing were defined by the 15 constitutive elements of the drawing of a man inspired by Goodenough (1926)'s scale, namely the head, the eyes, the nose, the mouth, the nostrils, the ears, the hairs, the neck, the trunk, the arms, the hands, the fingers, the legs, and the feet. Bitu et al. (2022) added teeth as an item that could be modified within the specific framework of creative drawing.

The experimenter attributed 0.5 point to each modification identified on the elements between the original drawing and the non-original drawing. Each modification made to the entire drawing was awarded 1 point, that is the double of the points awarded for local modifications. The only exception to this rule concerned the item "position, orientation and perspective" which could be attributed up to 1.5 points only, since the modification could concern both global and local elements. On the other hand, a local modification of position was awarded only 0.5 point although two local elements could be concerned. For example, exchanging the mouth with an eye implies a change of position of the two items which would result in a multiplication of points for the same local modification. The local modification of this specific item was therefore only awarded 0.5 points, regardless of the number of concerned items.

The addition of each point obtained for each local and global modification made between the original and non-original drawing produced by the same participant allowed to compute an originality score. The originality score calculated on the basis of a difference between an original and a non-original production of the same participant, was consistent with the definition of originality described as the ability to evaluate and select a new idea among others, depending on one's individual knowledge (Lubart & Georgsdottir, 2004; Runco, 1991).

Table 13. Rating scale of the original man inspired from Bitu et al. (2022).

Tableau 13. Echelle de cotation du bonhomme original inspiré de Bitu et al. (2022).

Graphical change	Description	Type of change	Awarded points (min-max)
Addition/deletion	Element in the drawing of a man who exist (head, eyes, nose, mouth, nostrils, teeth, ears, hairs, neck, trunk, arms, hands, fingers, legs, feet) replicated or deleted	Local element	0 – 7.5
Shape of elements	Element (head, eyes, nose, mouth, nostrils, teeth, ears, hairs, neck, trunk, arms, hands, fingers, legs, feet) whose shape was different from the drawing of the man who exist	Local element	0 – 7.5
Size of elements	Element (head, eyes, nose, mouth, nostrils, teeth, ears hairs, neck, trunk, arms, hands, fingers, legs, feet) whose size was different from the drawing of a man who exist	Local element	0 – 7.5
Insertion of elements	New element (head, eyes, nose, mouth, nostrils, teeth, ears hairs, neck, trunk, arms, hands, fingers, legs, feet) that were not present on the drawing of a man who exist	Local element	0 – 7.5
Position, orientation, and perspective	Elements (head, eyes, nose, mouth, nostrils, teeth, ears, hairs, neck, trunk, arms, hands, fingers, legs, feet) and/or the whole drawing different in position, orientation, and perspective from the drawing of a man who exist	Local element and on the whole	0 – 1.5
Cross-conceptual categories	Whole drawing presenting insertions crossed with other conceptual categories (trees, animals, technology, ...)	On the whole	0 – 1
Form of the whole	Element in the drawing of a man who exist (head, eyes, nose, mouth, nostrils,	On the whole	0 – 1

	teeth, ears, hairs, neck, trunk, arms, hands, fingers, legs, feet) replicated or deleted		
		TOTAL	0 – 33.5

Three originality scores were thus calculated using this rating scale (Table II), one for each original drawing executed on a tablet with a finger, with a stylus, or on paper with a pen. Originality scores were therefore scored out of a total of 33.5 points for each original drawing.

II.7. Qualitative interview

Once the creative task was completed, discussion session was set with the participant in order to collect their subjective feedback. This semi-structured interview was organized around the following questions:

- 1) Which medium did he prefer (tablet or paper)?
 - 1.bis) Why did he prefer this medium?
- 2) Which tool did he prefer on the tablet (finger or stylus)?
 - 2.bis) Why did he prefer this tool on the tablet?
- 3) On which medium did he have the most creative ideas (tablet or paper)?
- 4) On which medium did he prefer to produce movements (tablet or paper)?
- 5) Why did he prefer this medium to produce creative ideas and/or movements?

For each question asked during these interviews, the participants' answers were transcribed manually by the experimenter.

II.8. Data analysis

To ensure the instructions were properly understood, an interrater agreement score was calculated from a random sample of 50 original and 50 non-original drawings produced with the three media (pencil on paper, stylus on tablet, finger on tablet). Two naive observers categorized the designs as original or unoriginal. Cohen's Kappa revealed a strong inter-rater agreement between the two raters ($K = .93$), confirming that the instruction did lead the adolescents to produce original drawings.

Before any statistical analysis, the normality of the originality score residuals was tested with the Shapiro-Wilk test, allowing us to perform a parametric analysis to assess the originality of the drawings ($W = .98$, $p = .17$). We then conducted a mixed model analysis with the Jamovi statistical software (version 1.6, 2021), including originality scores as the dependent variable, the tool used (pen on paper, stylus on tablet, finger on tablet) as repeated factor, and participants' age as a continuous covariate.

III. Results

A first analysis was carried out to control the effects related to the multiple drawings produced on different tools and with different instructions. A first ANOVA was carried out in order to analyze the effect of instruction order (01: exists then does not exist; 02: does not exist then exists) and the effect of the order of presentation of the tool (01: pen, stylus, finger; 02: pen, finger, stylus; 03: stylus, pen, finger; 04: stylus, finger, pen; 05: finger, pen, stylus; 06: finger, stylus, pen). The results revealed no significant difference of instruction order, $F(1.29) = 0.028$, $p = .86$, neither of the tool order, $F(4.26) = 2.31$, $p = .09$, on originality scores. For this reason, we removed these control variables from subsequent analyses.

III.1. Originality measures

III.1.1. The effect of the tool on originality scores

The main analysis was conducted with a mixed model analysis in order to analyze the originality scores obtained with different tools (pen on paper, stylus on tablet, finger on tablet) taking the age of the participants as a continuous variable. The results revealed no significant effect of age, $F(1, 29) = 2.19, p = .15$.

The ANOVA also showed a significant effect of the tool used (pen on paper, stylus on tablet, finger on tablet) on originality scores, $F(2, 60) = 23.37, p < .001$. As presented in Figure 1., Bonferroni's post-hoc analyzes revealed that adolescents produced more original drawings using finger on tablet ($p < .001; M = 4.39, SD = 1.51$) or stylus on tablet ($p < .001; M = 3.90, SD = 1.77$), compared to pencil on paper ($M = 2.39, SD = 1.36$). No difference were observed between drawings made on a tablet with a stylus and those made with a finger ($p = .355$).

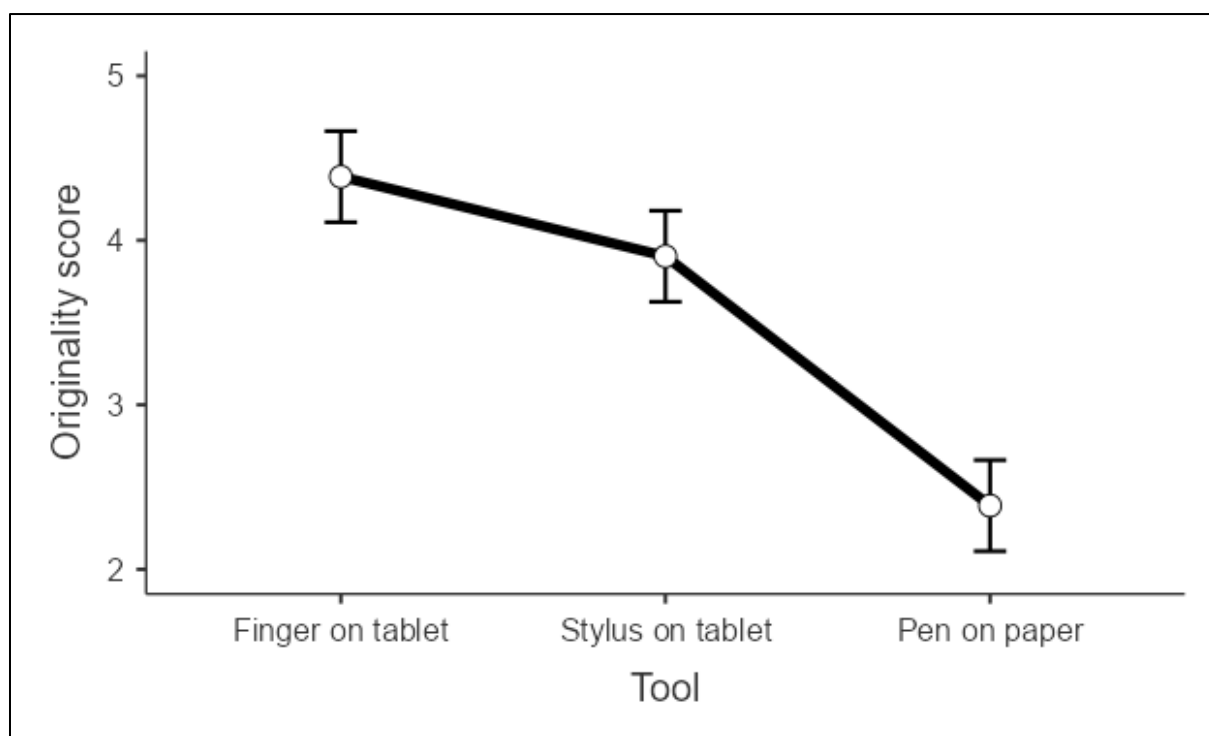


Figure 24. Scores d'originalité en fonction de l'outil utilisé (doigt sur tablette, stylet sur tablette, crayon sur papier)

Figure 254. Originality scores according to the tool used (finger on tablet, stylus on tablet, pen on paper)

III.1.2. Comparison to a typical adolescent population

The originality scores of our sample of adolescents with disruptive behavior disorders were then compared to the average scores observed with typical adolescents and reported in the study of Bitu et al. (2022). The objective of this comparison is to determine whether the performance of adolescents with disruptive behavior disorders differ from typical adolescents. This comparison is based on the fact that the present study uses the same protocol as the one proposed in the experiment of Bitu et al. (2022) and that the calculation of originality scores was carried out according to the same criteria.

A student *t* test was carried out in order to compare the mean scores of each population for each tool (Table III). The results showed no difference between the mean scores observed in adolescents with disruptive behavior disorder and the mean scores observed in typical adolescents, both for finger drawings on tablet $t(30) = 0.90, p = .37$, stylus on tablet $t(30) = -1.28, p = .21$, and pen on paper $t(30) = -1.60, p = .12$.

Table 14. Comparison of originality scores (mean and standard deviation) according to the tool used between adolescents with disruptive behavior disorder and typical adolescents

Tableau 14. Comparaison des scores d'originalité (moyenne et écart-type) en fonction de l'outil utilisé entre les adolescents avec troubles du comportement et les adolescents typiques

Population	Finger on tablet M (SD)	Stylus on tablet M (SD)	Pen on paper M (SD)
Disruptive behavior disorder adolescents (n =31)	4.39 (1.51)	3.90 (1.77)	2.39 (1.36)

Typical adolescents (n =32)	4.14 (1.40)	4.31 (1.33)	2.78 (1.26)
<i>t</i>	.37	.21	.12

t indicates the *p* result of the Student *t* test

III.2. Qualitative measures

The interviews conducted following the experiment were analyzed using descriptive analyses. Chi² tests were applied to determine whether preferences varied according to the media and tools used, then to analyze the main reported arguments justifying these preferences.

III.2.1. Preferences of the support and the tool used

The preferences expressed relating to the media used are presented in Table IV. First of all, the participants were significantly more likely to report a preference for the tablet (64.5%) than for the paper (22.6%) to perform the creative drawing task, with a minority that did not make any difference between the two mediums (12.9%), $\chi^2(2) = 14, p < .001$.

In terms of generated ideas, the Chi² analysis did not show that young people felt significantly more able to generate creative ideas by drawing on a tablet or on paper, $\chi^2(3) = 4.48, p = .21$: 38.7% of participants reported they had more ideas while drawing on a tablet compared to 16.1% of teenagers who reported they had more ideas while drawing on paper, 29% reported they did not know if they felt more creative with either medium.

Concerning the production of movements to realize the original drawing, the majority of the participants declared to have preferred to act on the tablet (64.5%) rather than on the paper (6%), although 29% declared they did not know if there was a difference between the two mediums, $\chi^2(2) = 15.9, p < .001$.

Table 15. Media Usage Preference

Tableau 15. Préférence d'utilisation des médias

	Tablet % (n)	Paper % (n)	Do not know % (n)	No answer % (n)
Preferred medium	64.5% (20)	22.6% (7)	12.9% (4)	0% (0)
Ideas	38.7% (12)	16.1% (5)	29% (9)	16% (5)
Movements	64.5% (20)	6.4% (2)	29%% (9)	0% (0)

Finally, as shown in Table V., when drawing on a tablet, the participants preferred to use the stylus (64.5%) rather than the finger (22.6%), and 12.9% could not decide, $\chi^2(2) = 14.0$, $p < .001$.

Table 16. Tool usage preference

Tableau 16. Préférence d'utilisation des outil

	Finger % (n)	Stylus % (n)	Do not know % (n)	No answer % (n)
Favorite tool	22.6% (7)	64.5% (20)	12.9% (4)	0% (0)

III.2.2. Justifications relating to the chosen support and tool

Each justification collected from the teenagers was grouped by semantic entry, allowing to highlight thematic categories for the statistical analysis purpose. Additional elements were identified, which did not fit into any theme, gathered under the “other” category. For example, some teenagers indeed explained that the tablet was a "better tool for working" ($n = 1$), that it was "better for thinking" ($n = 2$), but also that it "makes you want to carry out the task" ($n = 1$) and that it “tires less than paper” ($n = 1$). Also, the speeches of two participants reported a link between haptic sensation and creative ideas, such as the haptic sensation allowed on the tablet made it possible to improve creative ideas on this medium ($n = 2$). Table VI summarizes the semantic grouping into 6 themes: pleasantness, ease of use, haptic sense, habit, precision, and other arguments.

Table 17. Thematic grouping of the arguments put forward by the participants to justify their choices

Tableau 17. Groupement thématique des arguments avancés par les participants pour justifier leurs choix

Thematic	Definition	Examples of transcripts
Pleasantness	Regroups the reasons mentioned relating to the fun, attractive, or motivating aspect of the task.	“more pleasant”; “fun”; “It's motivating”; “attractive”; “comfortable”.
Ease of use	Regroups arguments related to performance.	“better for drawing”; “easier”.
Haptic sense	Regroups arguments referring to movement and its sensations.	“faster”; “slides better”; “best feelings”.
Habit	Regroups the justifications referring to the habit of use.	“more accustomed”, “often use it”, “it's as usual”
Precision	Elements referring to the accuracy of the graphical gesture.	“more precise”; “aims better”.
Other Arguments	Additional elements identified, which did not fit into any theme.	“best [support] for working”; “better to think”.

A first analysis aimed to determine the main reasons given by young people to justify their preference for the most preferred medium, namely tablet medium. Several categories of arguments were expressed for each participant, leading to a total of 52 arguments analyzed. Table VII summarizes the distribution of arguments within the thematic categories. The analysis reveals that the preference for the tablet was mainly justified by the haptic sense (36.5% of the arguments) and the pleasantness (26.9% of the arguments), $\chi^2(5) = 22.3$, $p < .001$.

Table 18. Thematic analysis of the elements justifying the preference for tactile support

Tableau 18. Analyse thématique des éléments justifiant la préférence pour le support tactile

	Pleasantness % (n)	Ease of use % (n)	Haptic sense % (n)	Habit % (n)	Precision % (n)	Others % (n)	Do not know % (n)
Justifications (n=52)	26.9% (14)	9.6% (5)	36.5% (19)	0% (0)	0% (0)	13.5% (7)	13.5% (7)

A second analysis was aimed to determine the main justifications explaining the preferences for the stylus on tablet, since it is the most preferred tool on this medium. Given that each participant reported only one theme to justify their choice, this analysis involved a total of 20

arguments, corresponding to the number of participants who expressed a preference for this tool. As reported in Table VIII, the analysis reveals that the preference for the stylus was mainly justified by the habit of using the writing tool (55%), $\chi^2(3) = 11.2$, $p = .01$.

Table 19. Thematic analysis of the elements justifying the preference for the stylus

Tableau 19. Analyse thématique des éléments justifiant la préférence pour le stylet

	Pleasantness % (n)	Ease of use % (n)	Haptic sense % (n)	Habit % (n)	Precision % (n)	Others % (n)	Do not know % (n)
Justifications (n = 20)	5% (1)	0% (0)	0% (0)	55% (11)	25% (5)	0% (0)	15% (3)

IV. Discussion

The aim of this study was to determine whether the modification of sensory inputs induced by the tablet could help adolescents with disruptive behavior disorders to mobilize their creative thoughts in a graphic task more efficiently. We hypothesized that the use of tablet with the finger or the stylus during a creative task would allow to mobilize the creative process of these adolescents more efficiently compared to paper, thanks to an increase in available sensory information induced by touchscreen interface. We also hypothesized that this sensory increase would facilitate the control of action as a self-agent, leading participants to express a preference for the tablet.

The results presented in this study were obtained from a relatively small sample, making it impossible to generalize the results to the entire population with disruptive behavior disorders. Nevertheless, the results of our study showed that adolescents with disruptive behavior disorders produced more original drawings on tablet with finger and stylus, compared to productions on paper with a pen, and this regardless of the age of the participants, validating

our first hypothesis. These results are in line with previous studies showing benefits from sensory afferences modifications on the creative performances of typical adolescents (Bitu et al., 2019, 2021, 2022). More specifically, this study confirms the results of Bitu et al. (2022) who showed that the modifications induced by the use of the finger and the stylus on tablet modified the performance in terms of originality in typical children and adolescents. Our results allow to extend the observation of the benefits of using tablets on the production of original drawings initially observed in typical children and adolescents (Bitu et al., 2022), to adolescents presenting disruptive behavior disorders and difficulties in mobilizing their cognitive abilities for positive activities. These benefits can be understood as resulting from the different sensory inputs that the tablet offers during an action performed with the finger or the stylus on the screen. Indeed, unlike the interaction of the pen on a paper surface, the direct use of the finger on tablet increases the haptic information thanks to an amplification of the friction between the fingertip and the surface of the screen (Patchan & Puranik, 2016). The use of the stylus on a tablet also leads to a modification of sensory information during the action due to the sliding effect of the stylus on the tablet. In children over 8 years old, motor control strategies such as exaggeration of movements, allow to compensate for the sliding effect of the stylus on the tablet (Guilbert et al., 2019). These observable benefits in adolescents with disruptive behavior disorders suggest that the touchscreen tablet could be used to re-establish the link with the environment in a positive way (Fortun-Carillat, 2015). More specifically, the comparison of originality scores obtained by adolescents with disruptive behavior disorders to those obtained by typical adolescents in the study of Bitu et al. (2022) did not show any difference, highlighting similar gains for both types of populations with each tool. These similar benefits for the two types of population suggest that the use of tablets could be a particularly interesting tool for bringing children and adolescents with disruptive behavior disorders back to learning activities while meeting the needs of inclusive education (Canat, 2021).

Our second hypothesis suggested that the modification of sensory inputs enabled by the tablet would lead adolescents to express a preference for tablet compared to paper. Our results confirm this hypothesis by showing that adolescents expressed a significant preference for tablet compared to paper. This result leads us to conclude that the sensory inputs available during interaction on the tablet increase performance in terms of originality on a touchscreen tablet (Bitu et al., 2022), and could also create a feeling of greater control over one's own actions and thoughts produced on this medium. This link between creativity and awareness of the self-agent is based on a commonly shared sensorimotor component. Creativity, as a sensorimotor prediction system (Dietrich & Haider, 2015) is modulated by the sensory inputs on which predictions are realized (Bitu et al., 2022). At the same time, these same sensory components support the sense of action control and agency (Blakemore et al., 2002; Haggard, 2005; Jeannerod, 2009; Kranick & Hallett, 2013; Moore et al., 2009; Moore & Fletcher, 2012; Synofzik et al., 2008a, 2008b; Wegner & Sparrow, 2004; Wegner, 2002, 2003; Wegner et al., 2004) which results from a congruence between the realized action and the prediction of its sensory consequences. As a result, by increasing the sensory input into the task through the use of tablet, the participants were able to benefit from a better creative process but also from a strengthened sense of control over their own actions (self-agent), allowing them to more effectively mobilize their thoughts in this creative task.

However, and contrary to our expectations, no significant difference was observed regarding the medium preferred by the participants to generate creative ideas. If 38.7% of adolescents preferred touchscreen medium against 16.1% the paper medium, a large part was undecided (29%) and a minority did not wish to answer (16%). Indecision and lack of response, representing a total of 45% of the sample questioned in this study, illustrate the difficulties encountered by these young people in mobilizing their cognitive and metacognitive abilities (thinking about their thoughts). On the other hand, the participants overwhelmingly favored the

tablet concerning the realization of the gestures to produce the original drawing, which could illustrate a better feeling of action control. Indeed, in the proposed experiment, the adolescents declared a preference for the tool with which they were more original. The main arguments put forward to justify this preference refer to the pleasantness and haptic sensations that the support produces. These two main arguments could be interpreted with regard to the feeling of control over their own actions that adolescents were able to experience with the tablet. It could thus be suggested that the interaction with a tablet, which promotes an increase in sensory information, leads adolescents to experience stronger haptic sensations and greater pleasantness, which reinforce their feeling of control over the action situation and therefore their experience of self as an agent (Gallagher, 2000). These results show us that the interaction with a tablet to perform a creative task allows adolescents with disruptive behavior disorders to appreciate the gestures produced and to feel a greater haptic sensitivity consecutive to these gestures, which could allow them to regain control over their own thoughts.

However, if the majority of adolescents favored the tablet, they reported a preference for using the stylus rather than the finger, although the originality scores are similar for these two tools. The preference for the stylus, which was justified, in a minority way, by better precision, could be explained by the discomfort caused to visual information processing by the use of the hand on the interface (Kirkorian et al., 2020). Indeed, a recent study compared the handwriting of adults with a visual feedback of the hand but also of the generated trace, with a visual feedback of the hand without any trace generated. Their results showed that the absence of feedback on the generated trace led to a loss of precision (Unell et al., 2021). It could be suggested that the use of the finger on the interface prevents participants from accessing the visual feedback of the trace generated at their fingertip, leading to a loss of precision. This idea is all the more important since the population of our study is in a period of strong growth which results in a period of neglect of proprioceptive information in favor of the use of visual afferences

(Assaïante, 2012; Mallau et al., 2010; Viel et al., 2009). Although our procedure allows to control the effect of a possible loss of precision on originality scores by comparing the original and non-original drawings produced on the same support and with the same tool, subsequent studies could determine whether using a finger or a stylus on tablet could lead to qualitative modifications of the lines produced, which could be coarser on the finger, or wider, as has been reported in the context of stylus writing (Alamargot & Morin, 2015; Gerth et al., 2016). These suggestions highlight the need for further studies to increase knowledge about the sensory modulations generated by the use of tablets. Nevertheless, our results showed that the preference for the stylus over the finger was mainly justified by a greater habit of using the writing tool. These results could suggest that adolescents prefer to stay in a comfort zone by preferring to use a writing tool that they are used to manipulate, rather than the finger on the interface which could place them outside of their comfort zone. Indeed, the use of tablet with finger could have led the adolescents to find themselves in a less familiar situation than with the stylus, pushing them to move away from a pre-established framework. This ability to get out of the pre-established framework depends both on the individual and on the history of the individual (Galinon-Mélénec, 2021). More specifically, the disruptive behavior disorders presented by the population of our study can externalize itself in the form of rule transgressions (Rivenbark et al., 2018) when the framework is not sufficiently containing (Robbes & Afgoustidis, 2015). With regard to the arguments expressed by adolescents to justify their preference for tactile support, it could be suggested that the preference for the stylus relates to a particular interest in the tool that requires the greatest sensorimotor control, due to the constraints imposed by the sliding surface. The tablet used with a stylus could thus offer the most containing framework for the teenager presenting this type of disorder.

This exploratory study raises the question of the relationship between action control and thought production in adolescents with disruptive behavior disorders. It is confronted with a main

limitation related to a lack of data to support post-experimental interview results. Indeed, our conclusions on the capacity of adolescents to feel themselves as being at the origin of their own actions are based on post-experimental interviews carried out with them. During these interviews, they mostly reported a preference for the tool with which they were more creative and for which they expressed a greater haptic sensation. Participants seem to have felt a better sense of control over their actions on the medium where they were more creative. This study paves the way for future research that, using direct measures of action control and agency, could determine more precisely the role that it plays in the generation of creative ideas for these adolescents with specific educational needs. Moreover, although the modulation of sensory afferences led to a modification of the originality scores of adolescents with disruptive behavior disorder, we did not precisely measure the sensory parameters that could have led to the mobilization of a sense of agency. Further studies could, using specific motion capture or eye tracker equipment, more specifically isolate and measure the different sensory inputs, in particular visual and haptic ones, in order to determine whether the control of the situation felt by the adolescents when interacting on a tablet could be linked to one or the other source of information.

V. Conclusion

Our study aimed to determine if the modification of sensory afferences induced by the tablet could help adolescents with disruptive behavior disorders to mobilize their thoughts more effectively in a graphic task. Children and adolescents with this type of disorder are confronted with a feeling of loss of control of the situation which leads to greater aggression (Davies & Sturge -Apple, 2014; Krotenberg & Lambert, 2012; Bat Or et al., 2019). The feeling of control over one's own actions and thoughts (self-agency) is generated by the congruence between the

predicted and performed action (Jeannerod, 2009; Wegner, 2003). The creative process can be seen as an analogy of the sensorimotor control system, based on sensory afferences (Dietrich & Haider, 2015). The modification of these afferences leading to a modulation of creativity (Bitu et al., 2022), it could also lead to a more effective feeling of control for children and adolescents with disruptive behavior disorders. Our results have indeed shown that the use of a tablet led adolescents with this type of disorder to produce more original drawings with a finger and a stylus, than on paper with a pen. The results of this study lead us to conclude that the sensory inputs available in the creative task can increase the originality of drawings produced on tablet, and could reinforce the feeling of control of the situation in adolescents with disruptive behavior disorders.

Taken together, the results of this study lead us to suggest that tactile interaction could allow to positively reinvest the learning environment through more engaging tasks to better mobilize the cognitive resources of adolescents with disruptive behavior disorders, which allows to reduce behavioral problems (Edwards-Duke et al., 2002; Thomas et al., 2011; Tyler et al., 2019). These results confirm and extend the observations of Campigotto, McEwen, and Epp (2013) which showed that the use of tactile tools led to an increase in the interest of young people in difficulty during school tasks, improving the essential motivation to school learning, through the use of “fun” tools (Campignotto et al., 2013; Schunk, 2012). The use of the tablet could make it possible to reduce the expression of disruptive behavior disorders (Kirkpatrick et al., 2022) by offering a (creative) way of expression making it possible to channel aggression through a better control over the situation. The use of tablets could thus allow them to reconnect with school learning that has been weakened in the context of their disorders.

REFERENCES

- American Psychiatric Association (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders: DSM-5* (Vol. 5). Washington, DC: American psychiatric association.
- Alamargot, D., & Morin, M. F. (2015). Does handwriting on a tablet screen affect students' graphomotor execution? A comparison between grades two and nine. *Human movement science*, 44, 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2015.08.011>
- Atkinson, M. (2012). They never give up on you. *Office of the Children's Commissioner school exclusions inquiry: Executive summary*.
- Balconi, M. (2010). *Neuropsychology of the Sense of Agency*. New York, NY: Nova Science Publishers.
- Barker, J., Alldred, P., Watts, M., & Dodman, H. (2010). Pupils or prisoners? Institutional geographies and internal exclusion in UK secondary schools. *Area*, 42(3), 378-386.
- Barry, T. D., Lyman, R. D., & Klinger, L. G. (2002). Academic underachievement and attention-deficit/hyperactivity disorder: The negative impact of symptom severity on school performance. *Journal of school psychology*, 40(3), 259-283.
- Bat Or, M., Kourkoutas, E., Smyrnaki, M., & Potchebutzky, H. (2019). Two drawing tasks to illuminate self-agency representations of children with disruptive behavior problems. *Art Therapy*, 36(1), 30-39.
- Berkout, O. V., Young, J. N., & Gross, A. M. (2011). Mean girls and bad boys: Recent research on gender differences in conduct disorder. *Aggression and Violent Behavior*, 16(6), 503-511.
- Birchwood, J., & Daley, D. (2012). Brief report: The impact of attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) symptoms on academic performance in an adolescent community sample. *Journal of adolescence*, 35(1), 225-231.
- Blakemore, S. J., Wolpert, D. M., & Frith, C. D. (2002). Abnormalities in the awareness of action. *Trends in cognitive sciences*, 6(6), 237-242.
- Bowman-Perrott, L., Benz, M. R., Hsu, H. Y., Kwok, O. M., Eisterhold, L. A., & Zhang, D. (2013). Patterns and predictors of disciplinary exclusion over time: An analysis of the SEELS national data set. *Journal of emotional and behavioral disorders*, 21(2), 83-96.
- Brown, T. M. (2007). Lost and turned out: Academic, social, and emotional experiences of students excluded from school. *Urban Education*, 42(5), 432-455.
- Canat, S. (2005). Quels besoins scolaires spécifiques pour accueillir des enfants ayant des troubles du comportement et du caractère. *Enfance/adolescence et ses troubles*, 335-350.
- Canat, S. (2021). Atelier 3. L'Unité d'enseignement externalisée, de l'inclusion scolaire au fonctionnement en DITEP. In *Société inclusive et solidaire: entre ambition et réalité, le DITEP accélérateur de pratiques* (pp. 224-236). Champ social.
- Chabrol, H. (2004). *Psychopathologie de l'adolescent*. Belin.

- Christle, C. A., Jolivet, K., & Nelson, C. M. (2005). Breaking the school to prison pipeline: Identifying school risk and protective factors for youth delinquency. *Exceptionality*, 13(2), 69-88.
- Dasgupta, S. (2004). Is creativity a Darwinian process? *Creativity Research Journal*, 16, 403–413.
- Davies, P. T., & Sturge-Apple, M. L. (2014). Family context in the development of psychopathology. In *Handbook of developmental psychopathology* (pp. 143-161). Springer, Boston, MA.
- Demmer, D. H., Hooley, M., Sheen, J., McGillivray, J. A., & Lum, J. A. (2017). Sex differences in the prevalence of oppositional defiant disorder during middle childhood: a meta-analysis. *Journal of abnormal child psychology*, 45(2), 313-325.
- Department for Education (2019) Permanent and fixed-period exclusions in England: 2017 to 2018. London: DfE.
- Dietrich, A., & Haider, H. (2015). Human creativity, evolutionary algorithms, and predictive representations: The mechanics of thought trials. *Psychonomic bulletin & review*, 22(4), 897-915. <https://doi.org/10.3758/s13423-014-0743-x>
- Edwards-Duke, B., Boswell, B., McGhee, S., & Decker, J. (2002). Creative educational dance and children with behavior disorders: Encouraging a spirit of cooperation. *Journal of Dance Education*, 2(1), 23-31.
- Eliasson, A. C., Rösblad, B., & Forssberg, H. (2004). Disturbances in programming goal-directed arm movements in children with ADHD. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 46(1), 19-27.
- Fergusson, D. M., John Horwood, L., & Ridder, E. M. (2005). Show me the child at seven: the consequences of conduct problems in childhood for psychosocial functioning in adulthood. *Journal of child psychology and psychiatry*, 46(8), 837-849.
- Fortun-Carillat, V. (2015). Accompagner en Itep des enseignants débutants dans la construction d'une relation pédagogique avec des élèves présentant des troubles du comportement. *La Nouvelle Revue de l'Adaptation et de la Scolarisation*, 72(4), 85-105.
- Gallagher, S. (2000). Philosophical conceptions of the self: Implications for cognitive science. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(1), 14–21
- Gallagher, S. (2006). *How the body shapes the mind*. Clarendon Press.
- Goodenough, F. L. (1926). *Measurement of intelligence by drawings*. Harcourt, Brace & World, New York (1926)
- Guilbert, J., Alamargot, D., & Morin, M. F. (2019). Handwriting on a tablet screen: Role of visual and proprioceptive feedback in the control of movement by children and adults. *Human movement science*, 65, 30-41.
- Guilé, J. M., & Cohen, D. (2010). Les perturbations de l'empathie sont au cœur des troubles des conduites de l'enfant et de l'adolescent. *Neuropsychiatrie de l'enfance et de l'adolescence*, 58(4), 241-247.
- Haggard, P. (2005). Conscious intention and motor cognition. *Trends in cognitive sciences*, 9(6), 290-295.

- Harris, A., & De Bruin, L. R. (2018). Secondary school creativity, teacher practice and STEAM education: An international study. *Journal of Educational Change*, 19(2), 153-179.
- Harris, B., Vincent, K., Thomson, P., & Toalster, R. (2006). Does every child know they matter? Pupils' views of one alternative to exclusion. *Pastoral Care in Education*, 24(2), 28-38.
- Jamovi project (2021). *jamovi* (Version 1.6) [Computer Software]. Retrieved from <https://www.jamovi.org>
- Jeannerod, M. (2009). *Le cerveau volontaire*. Odile Jacob.
- Jeannerod, M., & Pacherie, E. (2004). Agency, simulation and self-identification. *Mind & language*, 19(2), 113-146.
- Karmiloff-Smith, A. (1990). Constraints on representational change: Evidence from children's drawing. *Cognition*, 34(1), 57-83. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(90\)90031-E](https://doi.org/10.1016/0010-0277(90)90031-E)
- Kiefer, M., & Harpaintner, M. (2020). Varieties of abstract concepts and their grounding in perception or action. *Open Psychology*, 2(1), 119-137.
- Kirkpatrick, M., Rivera, G., & Akers, J. (2022). Systematic review of behavioral interventions using digital technology to reduce problem behavior in the classroom. *Journal of Behavioral Education*, 31(1), 69-93.
- Knox, J. (2011). *Self-Agency in Psychotherapy: Attachment, Autonomy, and Intimacy (Norton Series on Interpersonal Neurobiology)*. WW Norton & Company.
- Korkman, M., Kirk, U., & Kemp, S. (2014). *NEPSY-II*. Madrid: Pearson.
- Kranick, S. M., & Hallett, M. (2013). Neurology of volition. *Experimental brain research*, 229(3), 313-327.
- Krotenberg, A., & Lambert, E. (2012). *Scolarité et troubles du comportement*. Champ social Editions.
- Lebon, F., Gueugneau, N., & Papaxanthis, C. (2013). Modèles internes et imagerie motrice. *Movement & Sport Sciences-Science & Motricité*, (82), 51-61.
- Limerick, H., Coyle, D., & Moore, J. W. (2014). The experience of agency in human-computer interactions: a review. *Frontiers in human neuroscience*, 8, 643.
- Loisy, J. (1999). Qui sont ces enfants présentant des troubles de la conduite et du comportement ? Un éduc en ITEP. In E. Furstos (Ed.) (1999, 2006). <http://un.educ.en.itep.free.fr/les%20tcc.html>
- Lubart, T. I., & Georgsdottir, A. S. (2004). Créativité, haut potentiel et talent. *Psychologie française*, 49(3), 277-291.
- Lubart, T., Mouchiroud, C., Tordjman, S., & Zenasni, F. (2015). *Psychologie de la créativité-2e édition*. Armand Colin.
- Martin-Denham, S. (2020). A review of school exclusion on the mental health, well-being of children and young people in the City of Sunderland.
- Matheson, H. E., & Kenett, Y. N. (2020). The role of the motor system in generating creative thoughts. *NeuroImage*, 213, 116697.

- Matheson, H. E., & Kenett, Y. N. (2021). A novel coding scheme for assessing responses in divergent thinking: An embodied approach. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*.
- Merikangas, K. R., Nakamura, E. F., & Kessler, R. C. (2009). Prevalence rates of anxiety disorders in recent community surveys. *Dialogues Clinical Neuroscience*, 11(1), 7-20.
- Miall, R. C., & Wolpert, D. M. (1996). Forward models for physiological motor control. *Neural networks*, 9(8), 1265-1279.
- Moore, J. W., & Fletcher, P. C. (2012). Sense of agency in health and disease: a review of cue integration approaches. *Consciousness and cognition*, 21(1), 59-68.
- Moore, J. W., Wegner, D. M., & Haggard, P. (2009). Modulating the sense of agency with external cues. *Consciousness and cognition*, 18(4), 1056-1064.
- Munn, P., & Lloyd, G. (2005). Exclusion and excluded pupils. *British Educational Research Journal*, 31(2), 205-221.
- Nock, M. K., Kazdin, A. E., Hiripi, E., & Kessler, R. C. (2007). Lifetime prevalence, correlates, and persistence of oppositional defiant disorder: results from the National Comorbidity Survey Replication. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 48(7), 703-713.
- Patchan, M. M., & Puranik, C. S. (2016). Using tablet computers to teach preschool children to write letters: Exploring the impact of extrinsic and intrinsic feedback. *Computers & Education*, 102, 128-137. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.07.007>
- Reschly, A. L., & Christenson, S. L. (2006). Prediction of dropout among students with mild disabilities: A case for the inclusion of student engagement variables. *Remedial and special education*, 27(5), 276-292.
- Risser, S. D. (2013). Relational aggression and academic performance in elementary school. *Psychology in the Schools*, 50(1), 13-26.
- Rivenbark, J. G., Odgers, C. L., Caspi, A., Harrington, H., Hogan, S., Houts, R. M., ... & Moffitt, T. E. (2018). The high societal costs of childhood conduct problems: evidence from administrative records up to age 38 in a longitudinal birth cohort. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 59(6), 703-710.
- Robbes, B., & Afgoustidis, D. (2015). Relation d'autorité et troubles du comportement: quels choix pédagogiques pour les enseignants?. *La nouvelle revue de l'adaptation et de la scolarisation*, 72(4), 59-72.
- Runco, M. A. (1991). The evaluative, valiative, and divergent thinking of children. *The Journal of Creative Behavior*, 25(4), 311-319.
- Schwarz, K. A., Weller, L., Pfister, R., & Kunde, W. (2019). Connecting action control and agency: Does action-effect binding affect temporal binding?. *Consciousness and Cognition*, 76, 102833.
- Silver, R. B., Measelle, J. R., Armstrong, J. M., & Essex, M. J. (2005). Trajectories of classroom externalizing behavior: Contributions of child characteristics, family characteristics, and the teacher-child relationship during the school transition. *Journal of school psychology*, 43(1), 39-60.

- Skiba, R. J. (2000). Zero Tolerance, Zero Evidence: An Analysis of School Disciplinary Practice. Policy Research Report.
- Soliman, T., Gibson, A., & Glenberg, A. M. (2013). Sensory motor mechanisms unify psychology: the embodiment of culture. *Frontiers in psychology*, 4, 885.
- Stipek, D., & Miles, S. (2008). Effects of aggression on achievement: Does conflict with the teacher make it worse?. *Child development*, 79(6), 1721-1735.
- Sturaro, C., Van Lier, P. A., Cuijpers, P., & Koot, H. M. (2011). The role of peer relationships in the development of early school-age externalizing problems. *Child development*, 82(3), 758-765.
- Synofzik, M., Vosgerau, G., & Newen, A. (2008a). Beyond the comparator model: a multifactorial two-step account of agency. *Consciousness and cognition*, 17(1), 219-239.
- Synofzik, M., Vosgerau, G., & Newen, A. (2008b). I move, therefore I am: A new theoretical framework to investigate agency and ownership. *Consciousness and cognition*, 17(2), 411-424.
- Thomas, D. E., Bierman, K. L., Powers, C. J., & Conduct Problems Prevention Research Group. (2011). The influence of classroom aggression and classroom climate on aggressive-disruptive behavior. *Child development*, 82(3), 751-757.
- Tyler, P. M., White, S. F., Thompson, R. W., & Blair, R. J. R. (2019). Applying a cognitive neuroscience perspective to disruptive behavior disorders: implications for schools. *Developmental Neuropsychology*, 44(1), 17-42.
- Unell, A., Eisenstat, Z. M., Braun, A., Gandhi, A., Gilad-Gutnick, S., Ben-Ami, S., & Sinha, P. (2021). Influence of visual feedback persistence on visuo-motor skill improvement. *Scientific Reports*, 11(1), 1-10.
- Villamor, C., Willis, D., & Wroblewski, L. (2010). Touch gesture reference guide. *Touch Gesture Reference Guide*.
- Wegner, D. (2002). The illusion of conscious will. MIT Press
- Wegner, D. M. (2003). The mind's best trick: How we experience conscious will. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 65-69. doi:10. 1016/S1364-6613(03)00002-0
- Wegner, D. M., & Sparrow, B. (2004). Authorship processing.
- Wegner, D. M., Sparrow, B., & Winerman, L. (2004). Vicarious agency: experiencing control over the movements of others. *Journal of personality and social psychology*, 86(6), 838.
- Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic bulletin & review*, 9(4), 625-636. <https://doi.org/10.3758/BF03196322>
- Wolpert, D. M. (1997). Internal models in human motor control: A computational and psychophysical perspective. *The Journal of Physiology*, 501, S12-S12.
- Wolpert, D. M., Miall, R. C., & Kawato, M. (1998). Internal models in the cerebellum. *Trends in cognitive sciences*, 2(9), 338-347.

DISCUSSION GENERALE

I - Synthèse des études expérimentales

Cette thèse avait pour objectif de déterminer dans quelle mesure les afférences sensorielles peuvent moduler la créativité des enfants et adolescents. Nous dressions l'hypothèse générale selon laquelle les afférences sensorielles seraient un élément central du processus créatif. Cette hypothèse repose sur le modèle de Dietrich et Haider (2015), qui considère la créativité comme un processus itératif d'essai-erreur. L'analogie dressée dans ce modèle rapproche le processus créatif au système de contrôle de l'action sensorimotrice, et nous amène à suggérer que les afférences sensorielles occupent une place centrale dans le processus créatif, comme dans le système de contrôle de l'action sensorimotrice. Nous avançons ainsi l'hypothèse qu'une modification des afférences sensorielles lors de l'utilisation d'un support tactile numérique devrait mener à une modification de la créativité. Nous avançons également que la modification des afférences sensorielles n'aurait pas le même effet sur la créativité selon le développement des capacités de traitement de l'information sensorielle. Enfin, nous faisons l'hypothèse que cet effet des afférences sensorielles sur la créativité aiderait les adolescents présentant des troubles du comportement à remobiliser leurs pensées.

Pour tester ces hypothèses, nous avons demandé à des enfants et adolescents âgés de 6 à 14 ans, recrutés en école ordinaire et en ITEP, de produire des dessins originaux et non originaux sur support tactile numérique au doigt et au stylet, et sur papier au stylo afin de faire varier les afférences sensorielles. Les scores d'originalité étaient définis par une grille de cotation comparant les productions originales et non originales réalisées par un même enfant.

Nous nous attendions à ce que l'augmentation des afférences sensorielles au doigt sur tablette apporte une plus grande originalité dans les dessins à tout âge en comparaison de l'utilisation de stylo sur papier. Nous nous attendions à retrouver ces bénéfices lors de l'utilisation du stylet sur tablette en comparaison du stylo sur papier à partir de 8 ans, âge auquel les enfants sont en capacité de compenser la perte de retour sensorielle initiale par une exagération de mouvements maximisant les afférences sensorielles. Ces bénéfices au stylet ne devraient pas se retrouver chez des enfants avant 8 ans. Enfin, nous nous attendions à ce que des adolescents présentant des troubles du comportement bénéficient de ces outils pour remobiliser leurs pensées dans une tâche.

La première étude (Bitu *et al.*, 2019 ; Chapitre 8) avait pour objectif de déterminer, de façon exploratoire, si l'utilisation d'une la tablette tactile au doigt permettait d'améliorer les productions graphiques d'enfants d'âge scolaire. Dans cette première expérience, des dessins originaux d'un bonhomme, produits par des enfants recrutés en CP (6-7 ans) et en CE2 (8-9 ans) au doigt sur tablette et au stylo sur papier, ont été comparés. Les résultats ont révélé que, si les enfants de CE2 produisent des dessins plus créatifs que ceux de CP, tous les enfants obtiennent de meilleurs scores de créativité graphique lorsqu'ils dessinent sur un support numérique que sur un support papier. Cette première étude confirmait l'hypothèse selon laquelle l'utilisation du doigt sur tablette tactile pouvait mener à des dessins plus originaux qu'avec un crayon sur papier.

La deuxième étude (Bitu *et al.*, 2021 ; Chapitre 9) visait à déterminer, de façon exploratoire, si les bénéfices liés à l'utilisation du doigt sur tablette tactile pouvaient se retrouver chez les adolescents de 13-14 ans, tout en comparant ces effets à l'utilisation du stylet. Dans cette deuxième expérience, les adolescents dessinaient des maisons originales au doigt et au stylet sur tablette et au crayon sur papier. Nous nous attendions à ce que les performances sur tablette tactile soient meilleures que celles au crayon sur papier. Les résultats ont montré que les scores d'originalité étaient supérieurs pour les dessins réalisés sur tablette plutôt que sur papier au stylo, sans différence significative entre le doigt et le stylet. Cette deuxième étude a confirmé l'hypothèse selon laquelle l'utilisation du doigt sur tablette tactile pouvait apporter les mêmes bénéfices pour des adolescents de 13-14 ans que pour des enfants de 6-7 ans et 8-9 ans dans la première étude. Ces effets se retrouvaient avec un sujet de dessin différent de la première étude, avec une maison plutôt qu'un bonhomme.

Le troisième étude (Bitu *et al.*, 2022 ; Chapitre 10) avait pour but d'explorer la modification des afférences sensorielles sur l'originalité des enfants de 6 à 14 ans. En se reposant sur les théories de la charge cognitive, il était attendu que les ressources dévouées au contrôle moteur du geste graphique soient réduites lors de l'utilisation du doigt sur tablette tactile. A l'inverse, l'utilisation du stylet impliquant une perte d'informations proprioceptives, nous nous attendions à ce que les dessins produits avec cet outil soient les moins originaux consécutivement à une charge cognitive accrue pour compenser cette perte d'informations. Les résultats n'ont que partiellement confirmé nos attentes. Tandis que l'utilisation du doigt sur tablette tactile menait aux scores d'originalité les plus élevés, utiliser le stylet sur tablette tactile ne diminuait pas les scores d'originalité du dessin. L'utilisation du stylet sur tablette tactile

permettait aux enfants et adolescents après 8 ans d'exprimer davantage d'originalité dans leurs dessins qu'avec un crayon sur papier. L'hypothèse formulée selon le cadre théorique de la charge cognitive n'a donc pas été validée. En revanche, les modifications d'afférences lors de l'utilisation du doigt ou du stylet ayant impacté les scores d'originalité à tout âge, ces résultats permettaient de conclure à un rôle central joué par les afférences sensorielles dans le processus créatif.

La quatrième étude (Chapitre 11) avait pour objectif de déterminer si des adolescents présentant des troubles du comportement pouvaient également bénéficier de la tablette tactile au doigt et au stylet lors d'une tâche créative. Les troubles du comportement mènent les adolescents à une rupture dans les activités éducatives. Etant donné que les afférences sensorielles semblent jouer un rôle constitutif dans le processus créatif, tout comme dans le sens de l'agentivité, nous faisons l'hypothèse que l'utilisation de cet outil au doigt comme au stylet allait permettre aux adolescents de remobiliser efficacement leurs pensées. Dans cette quatrième étude, des adolescents présentant des troubles du comportement ont dessiné des bonhommes originaux au doigt et au stylet sur tablette tactile, et au stylo sur papier. Etant donné que l'utilisation du support tactile devrait leur permettre d'augmenter le sentiment de contrôle de l'action, nous nous attendions à ce que les participants présentent des scores d'originalité plus élevée sur tablette tactile que sur papier et qu'ils exprimeraient une préférence pour ce support. Les résultats ont montré que les adolescents bénéficiaient de l'utilisation du doigt et du stylet sur tablette en comparaison du stylo sur papier. Les participants rapportaient également une préférence pour la tablette tactile en comparaison du support papier, notamment pour produire les gestes graphiques constituant le dessin créatif. Cette quatrième étude confirmait l'hypothèse selon laquelle l'utilisation d'un support tactile permettrait d'apporter des bénéfices pour des adolescents présentant des troubles du comportement, qui, du fait de leurs troubles, éprouvent des difficultés à mobiliser leurs pensées dans une tâche.

Dans les sections suivantes, nous allons discuter de chacun de ces résultats et de leurs implications théoriques et pratiques.

II – Modifier les afférences sensorielles sur tablette tactile numérique module l'originalité

Au travers de quatre études, les résultats ont montré que l'utilisation de la tablette tactile menait, de façon générale, à de meilleurs scores d'originalité. Ces résultats sont en accord avec de nombreuses études ayant observé des bénéfices de l'utilisation de la tablette tactile sur diverses composantes créatives, dans les apprentissages scolaires (Behnamnia *et al.*, 2020a, 2020b ; Kim *et al.*, 2016 ; Marsh *et al.*, 2015, 2018 ; Marsh *et al.*, 2021) ou dans la collaboration avec les pairs (Sakr, 2018, 2019).

Cette performance plus élevée pourrait s'expliquer par la nouveauté de l'outil utilisé. En effet, l'utilisation de support numérique pourrait permettre de casser les représentations conventionnelles du dessin, amenant à des dessins plus originaux sur ce support en comparaison des dessins réalisés sur papier. Picard *et al.* (2014) ont en effet observé que les enfants de 5-6 et 7-8 ans tendaient à réaliser des dessins de la maison qui étaient plus prototypiques lorsqu'ils étaient réalisés au stylo sur papier qu'au doigt sur tablette tactile. L'outil numérique aurait donc pu permettre de s'écarter des symbolisations conventionnelles pour faire émerger de nouvelles représentations en utilisant un nouvel outil. Cependant, plusieurs études montrent une utilisation accrue des technologies tôt dans l'enfance, réduisant l'aspect de nouveauté de la tablette tactile. Par exemple, Cristia et Seidl (2015) ont rapporté que 87 à 91% des enfants de leur étude réalisée en France avaient déjà utilisé une tablette à 2 ans. De plus, il est estimé qu'environ 84% des 13-14 ans utilisent des tablettes tactiles au quotidien (Rideout, 2016). Dans les études 3 et 4 de cette thèse, la tâche fonctionnelle permettant d'évaluer la maîtrise d'utilisation d'une tablette tactile numérique en s'inspirant du guide de Villamor et al (2010), a été réalisée sans difficulté par tous les enfants et adolescents. Nous pouvons donc supposer que les enfants et adolescents évalués dans nos études avaient déjà une connaissance des tablettes tactiles, amoindrissant l'hypothétique effet de nouveauté.

Le potentiel de l'utilisation des outils tactiles numériques sur l'expression créative des enfants pourrait alors se comprendre dans une perspective incarnée et située de la cognition. Selon cette perspective, la variation du système d'afférences tactilo-kinesthésiques pourrait influencer des processus cognitifs (Clark, 1998 ; Foglia & Wilson, 2013 ; Lederman & Klatzky, 1987). Concernant la créativité plus précisément, Dietrich et Haider (2015) ont proposé de la concevoir comme une forme abstraite de prédiction sensorimotrice reposant sur les modèles internes du contrôle de l'action sensorimotrice (Kawato, 1999 ; Miall & Wolpert, 1996 ;

Wolpert & Ghahramani, 2004 ; Wolpert *et al.*, 1995). Les modèles internes, utilisés dans le cadre de la créativité, permettraient de générer et d'évaluer des idées originales, dans un processus d'essai-erreur, par un chainage de multiples boucles de contrôle (Dietrich & Haider, 2015). Comme nous l'évoquions au chapitre 6, les afférences sensorielles étant centrales au contrôle moteur de l'action, elles pourraient également être au cœur du processus de génération et d'évaluation de l'idée créative. Modifier les informations sensorielles disponibles dans la tâche aurait ainsi pu moduler le processus créatif. Pris de façon générale, les résultats obtenus ont en effet montré que les scores de créativité des enfants et adolescents ont varié en fonction des afférences proprioceptives disponibles dans la tâche de dessin créatif. Nos résultats valident ainsi notre première hypothèse générale selon laquelle une modification d'afférences sensorielles pourrait moduler les scores d'originalité des enfants et adolescents.

Nous allons discuter de cet effet au regard des capacités d'intégration sensorielles, observables par l'utilisation du doigt, puis du stylet, sur l'interface tactile.

III – L'effet des afférences sensorielles sur l'originalité dépend des capacités d'intégration sensorielles

Nous défendons l'idée selon laquelle les afférences sensorielles pourraient être un élément constitutif de la créativité. Observer les performances d'enfants et adolescents sur tablette tactile est particulièrement intéressant au regard du développement des capacités d'intégration sensorielles pendant l'enfance et l'adolescence. Notamment, l'information proprioceptive est traitée de façon secondaire et séparément de l'information visuelle avant 7 ans (Bard & Hay, 1983 ; Contreras-Vidal, 2006 ; King *et al.*, 2012 ; Van Roon *et al.*, 2008). L'amélioration considérable des capacités de traitement de l'information proprioceptive entre 4 et 6-7 ans (King *et al.*, 2012 ; Laszlo & Bairstow, 1980 ; Shumway-Cook & Woollacott, 1985 ; Sigmundsson *et al.*, 2000 ; Von Hofsten & Rösblad, 1988) mène à une intégration optimale des afférences proprioceptives traitées de façon multimodale à partir de 8 ans (Bard & Hay, 1983 ; Chicoine *et al.*, 1992 ; Contreras-Vidal, 2006 ; Ferrel-Chapus *et al.*, 2002 ; Gori *et al.*, 2008 ; Hay, 1978, 1979 ; Van Roon *et al.*, 2008 ; Von Hofsten & Rösblad, 1988), ce qui leur permet de compenser une perte de retour sensoriel (Guilbert *et al.*, 2019). Cette capacité d'intégration sensorielle optimale est mise en difficulté lorsqu'une période de négligence des informations proprioceptives survient à l'adolescence, favorisant temporairement les afférences

visuelles (Assaiante, 2012 ; Mallau *et al.*, 2010 ; Viel *et al.*, 2009). Nous avançons l'hypothèse que l'originalité des dessins produits par les enfants et adolescents serait modulée par le développement des capacités de traitement de l'information sensorielle dont dépendent les processus prédictifs. Pour confirmer ces hypothèses, nous allons discuter des résultats obtenus spécifiquement au doigt et au stylet sur tablette tactile.

III.1. Modifier l'afférence sensorielle au doigt : des bénéfices à tout âge

Les résultats ont montré que l'utilisation du doigt sur tablette tactile menait à des scores d'originalité à tout âge, indépendamment de la capacité à intégrer les afférences proprioceptives. Deux pistes peuvent être avancées pour expliquer ces résultats.

Tout d'abord, il pourrait être avancé que l'utilisation du doigt aurait pu forcer le traitement d'informations proprioceptives dans la tâche. En effet, avant 7 ans, la faiblesse de traitement de l'information proprioceptive (Bairstow & Laszlo, 1981 ; Contreras-Vidal, 2006 ; Laszlo & Bairstow, 1984) entraîne une sous-utilisation de cette source proprioceptive pour le contrôle du mouvement (Babinsky *et al.*, 2012a ; King *et al.*, 2012). Comme nous l'avons évoqué au chapitre 6, les enfants de 6-7 ans privilégieraient les réafférences visuelles pour le contrôle de l'action en cours plutôt que les informations proprioceptives (Bard & Hay, 1983 ; Van Roon *et al.*, 2008). Cependant, l'amélioration de la capacité de traitement de l'information proprioceptive entre 4 et 6-7 ans (King *et al.*, 2012 ; Laszlo & Bairstow, 1980 ; Shumway-Cook & Woollacott, 1985 ; Sigmundsson *et al.*, 2000 ; Von Hofsten & Rösblad, 1988) permet d'intégrer les afférences proprioceptives dans le fonctionnement des modèles internes de l'action à partir de 7 ans. Comme l'ont montré Molina, *et al.* (2008), un renforcement des afférences proprioceptives permettrait d'améliorer les capacités de simulation des conséquences proprioceptives dès 7 ans. Utiliser la tablette tactile au doigt aurait donc pu permettre aux enfants les plus jeunes de bénéficier d'une augmentation des afférences haptiques. Cet effet aurait également pu se retrouver chez les adolescents qui, pourtant, se trouvent dans une période de négligence des afférences proprioceptives, et privilégient de ce fait le retour visuel. Toutefois, Kirkorian *et al.* (2020) avançaient l'idée que l'utilisation du doigt sur tablette tactile pourrait gêner l'utilisation d'informations visuelles pour guider le dessin. Il se pourrait alors que les adolescents en période pubertaire et qui tendent à privilégier l'utilisation d'afférences visuelles, se trouvent contraint de recourir davantage aux informations proprioceptives lors du dessin au doigt.

Une deuxième piste d'explication pourrait se trouver dans les théories de la charge cognitive (Sweller *et al.*, 2011). En effet, plusieurs études rapportent un effet facilitateur de la tablette utilisée au doigt par les enfants les plus jeunes, pour qui les compétences motrices ne seraient pas suffisamment développées pour contrôler un outil scripteur de façon optimale (Braswell & Rosengren, 2008 ; Kirkorian *et al.*, 2020). Utiliser le doigt sur la tablette nécessiterait moins de compétences fines, réduisant la charge cognitive allouée au contrôle de l'outil scripteur. Utiliser le doigt sur tablette tactile aurait donc pu réduire la charge cognitive en comparaison du stylo sur papier, en maximisant les afférences haptiques disponibles au cours de la tâche, utilisées pour contrôler le mouvement, mais également en simplifiant la tâche en retirant le recours à l'outil scripteur. Si l'on se réfère à Mayer et Moreno (2003), ces deux éléments auraient pu permettre de réduire la charge allouée au contrôle moteur de l'action (charge intrinsèque), favorisant l'utilisation de ressources cognitives pour le processus créatif (charge essentielle). Les résultats obtenus lorsque les enfants et adolescents dessinaient au stylet sur tablette tactile nous permettent de préciser ces pistes d'explications.

III.2. Modifier l'afférence sensorielle au stylet : des bénéfices à partir de 8 ans

L'utilisation du stylet sur tablette tactile induit un effet glissant qui diminue la friction entre le stylet et l'écran, menant à une perte d'informations haptiques disponibles pendant la tâche (Alamargot & Morin, 2015). De ce fait, la perte d'informations haptiques aurait dû augmenter la charge intrinsèque dévouée au contrôle moteur, réduisant la charge essentielle allouée au processus cognitif, que ce soit pour les plus jeunes qui ont des difficultés à utiliser l'information proprioceptive, comme pour les enfants après 8 ans qui ont la capacité de compenser cette perte d'information. Cependant, les résultats ont montré que les enfants et adolescents, à tout âge, n'ont pas été impactés négativement par l'utilisation du stylet. À partir de 8 ans, les enfants ont tiré des bénéfices de cette situation qui aurait dû réduire leurs performances.

Cet âge correspond à une période clé de l'intégration sensorimotrice, durant laquelle la dépendance majoritaire aux informations visuelles serait remplacée par un traitement multisensoriel des différentes sources d'informations (Chicoine *et al.*, 1992 ; Gori *et al.*, 2008). Les capacités d'intégration de l'information visuelle et proprioceptive devenant optimales, permettraient une amélioration considérable du contrôle prédictif de l'action (Bard & Hay, 1983 ; Chicoine *et al.*, 1992 ; Contreras-Vidal, 2006 ; Ferrel-Chapus *et al.*, 2002 ; Hay, 1978 ;

1979 ; Molina *et al.*, 2008 ; Smits-Engelsman & Duysens, 2008 ; von Hofsten & Rösblad, 1988). Cette évolution majeure permet aux enfants à partir de cet âge, de compenser une perte d'informations sensorielles en amplifiant leurs mouvements afin de maximiser l'entrée sensorielle (Guilbert *et al.*, 2019).

L'utilisation de prédictions sensorielles pour compenser la perte de feedback sensoriel aurait également dû augmenter la charge intrinsèque, résultant en des scores d'originalité plus faibles au stylet sur tablette qu'au crayon sur papier. L'effet bénéfique du stylet ne semble donc pas lié à une modification de la charge cognitive qui aurait pu être en faveur de la tâche, comme pour l'utilisation du doigt sur tablette tactile. En revanche, l'effet bénéfique du stylet à partir de 8 ans pourrait se comprendre selon la piste incarnée de la créativité. En effet, en maximisant l'entrée sensorielle à partir de 8 ans, les enfants et adolescents maximisent également les informations sensorielles utilisées pour le processus créatif, conçu comme une analogie des modèles internes du contrôle de l'action (Dietrich & Haider, 2015). L'augmentation des afférences sensorielles permises par les capacités de compensation à partir de 8 ans aurait ainsi pu permettre de maximiser les informations sensorielles nécessaires au processus créatif, menant à des scores d'originalité plus élevés au stylet qu'au crayon sur papier. Nos résultats confirment donc notre deuxième hypothèse selon laquelle l'originalité des dessins produits par les enfants et adolescents serait modulée par le développement des capacités de traitement de l'information sensorielle dont dépendent les processus prédictifs.

IV – Des applications possibles auprès d'enfants et adolescents à BEP

Notre troisième hypothèse principale avançait que des adolescents présentant des troubles du comportement qui perturbent la mobilisation optimale de leur pensée, pourraient bénéficier de l'utilisation d'outils tactiles numériques lors d'une tâche de créativité. Nous nous attendions à ce que les adolescents présentant des troubles du comportement présentent les mêmes bénéfices que les enfants et adolescents typiques. Nous nous attendions également à ce qu'ils expriment une préférence pour le support tactile en comparaison d'un outil traditionnel comme le papier. Les résultats ont validé notre hypothèse en montrant que les adolescents présentant des troubles du comportement pouvaient bénéficier de l'utilisation du doigt et du stylet sur tablette tactile, en comparaison du crayon sur papier, en exprimant une plus grande originalité sur support tactile numérique. Les données qualitatives rapportent également une

préférence de ces adolescents pour l'outil tactile numérique qui leur apportait une plus grande agréabilité et de meilleures sensations haptiques.

En étendant les observations réalisées pendant les études 1 à 3 auprès d'enfants typiques, à des adolescents présentant des troubles du comportement, nos résultats mènent à suggérer que la modification d'afférences sensorielles pourrait également venir moduler le sentiment de contrôle de l'action. En effet, les adolescents présentant des troubles du comportement sont confrontés à un sentiment de perte de contrôle, traduit de façon explicite par une plus grande agressivité (Davies & Sturge-Apple, 2014 ; Krotenberg & Lambert, 2012 ; Bat Or *et al.*, 2019). Ce sentiment de contrôle de ses propres actions et pensées repose sur l'expérience sensorimotrice de soi en interaction avec l'environnement (Gallagher, 2006 ; Kiefer & Harpaintner, 2020 ; Soliman *et al.*, 2013), au travers d'informations sensorielles prédites et réelles utilisées dans le contrôle de l'action sensorimotrice (Blakemore *et al.*, 2002 ; Haggard, 2005 ; Kranick & Hallett, 2013 ; Moore *et al.*, 2009 ; Moore & Fletcher, 2012 ; Synofzik *et al.*, 2008a ; 2008b ; Wegner & Sparrow, 2004 ; Wegner, 2002, 2003 ; Wegner *et al.*, 2004). Etant donné que la modification d'afférences sensorielles induite par le doigt ou le stylet sur l'interface peut moduler les performances créatives des enfants et adolescents, il pourrait être suggéré que cette modification d'afférences pourrait également moduler le sentiment de contrôle de l'action. En apportant une plus grande agréabilité et de meilleures sensations pendant la réalisation de la tâche, l'utilisation de ces outils pourrait permettre aux enfants et adolescents présentant des troubles du comportement de mieux mobiliser leurs capacités cognitives pour compléter entièrement la tâche proposée. Des études ultérieures devraient explorer cette perspective.

De façon générale, les résultats de notre 4^e étude sont en accord avec les précédentes menées auprès des populations typiques (études 1 à 3), mais également avec les nombreuses études ayant observé des bénéfices de l'utilisation de tablettes tactiles pour des populations à besoin éducatif particulier (*e.g.* Campignotto *et al.*, 2013 ; Schunk, 2012), ou les quelques études ayant observé une réduction des troubles du comportement lors d'activités de danse créative (Edwards-Duke *et al.*, 2002 ; Thomas *et al.*, 2011 ; Tyler *et al.*, 2019). Les résultats de notre 4^e étude permettent d'étendre ces observations en suggérant que l'utilisation d'un support tactile numérique pourrait s'avérer particulièrement bénéfique pour des adolescents présentant des troubles du comportement. Ce support pourrait permettre de réinvestir l'environnement d'apprentissage de façon positive, au travers de tâches plus engageantes permettant de remobiliser les ressources cognitives des jeunes présentant ce type de trouble. Le recours à ce

type de support pour ces adolescents pourrait ainsi leur permettre de renouer avec l'institution scolaire qui est considéré par ces jeunes comme une menace (Canat, 2005), limitant le taux élevé de décrochage et de désintérêt scolaire (Atkinson, 2012 ; Barry *et al.*, 2002 ; Birchwood & Daley, 2012 ; Brown, 2007 ; Christle *et al.*, 2005 ; Reschly & Christenson, 2006 ; Risser, 2013 ; Stipek & Miles, 2008). De ce fait, les bénéfices de ces technologies autant pour les enfants et adolescents typiques (études 1 à 3) que les enfants et adolescents à BEP (étude 4) pourraient mener à une dynamique d'inclusion scolaire telle que prônée par les institutions gouvernementales.

V – Limites

V.1. L'effet des différents types d'informations sensorielles

La limite principale qui pourrait être soulevée au travers de cette thèse se trouve dans la mesure et le contrôle des différentes sources d'informations sensorielles. En effet, bien que les études menées reposent sur une littérature suggérant que l'utilisation de tablettes tactiles pourrait modifier les afférences sensorielles, aucune de ces études n'a mesuré les paramètres sensoriels permettant de conclure à un lien observable entre la créativité et les afférences sensorielles à l'œuvre dans l'action sensorimotrice. De plus, il a été rapporté que les enfants avant 7 ans utilisent de façon majoritaire les afférences visuelles plutôt que proprioceptives dans le contrôle de mouvement (Bard & Hay, 1983 ; Van Roon, Caeyenberghs, Swinnen & Smits-Engelsman, 2008). Ce primat visuel se retrouve également à la période pubertaire qui implique une période de négligence du traitement de l'information proprioceptive en faveur de la prise en compte de l'information visuelle (Assaiante, 2012 ; Cignetti *et al.*, 2013 ; Mallau *et al.*, 2010 ; Viel *et al.*, 2009). Bien que nos études se soient concentrées sur une modification d'afférences haptiques au travers de différents outils, il est probable que les informations visuelles aient également été modifiées. Comme le rapportent Kirkorian *et al.* (2020), l'utilisation du doigt sur tablette pourrait empêcher l'utilisation d'afférences visuelles pour le contrôle de mouvement, ce qui pourrait avoir une incidence sur le processus créatif. A l'inverse, la perte d'afférences proprioceptives lors de l'utilisation du stylet après 8 ans pourrait mener l'enfant et l'adolescent à se reposer sur un recours massif aux afférences visuelles pour compenser la perte initiale (Guilbert *et al.*, 2019).

Pour ces raisons, des études ultérieures devraient tenter d'isoler les différentes sources d'informations sensorielles, notamment visuelles et haptiques, comme dans l'étude de Guilbert *et al.* (2019), mais également de les mesurer (au travers d'un eye tracker et des mesures de mouvement par exemple) afin de pouvoir observer le rôle et l'importance de chaque source d'information sensorielle dans le processus créatif.

Au delà des afférences visuelles et proprioceptives majoritairement utilisées pour contrôle de l'action sensorimotrice, il serait intéressant d'évaluer les effets d'autres modalités sensorielles. La tablette tactile de nos jours ne permet de contrôler que les informations visuelles, haptiques et auditives. Or, d'autres sources d'informations comme les informations olfactives, représentent une part significative de la compréhension de notre corps dans l'environnement (Cameron, 2018 ; Sarafoleneanu *et al.*, 2009). Celles-ci pourraient également être utilisées pour nourrir le processus créatif, comme tend à le montrer l'étude de Gonçalves *et al.* (2017) observant une écriture d'histoires plus créatives à l'aide de stimulations olfactives.

V.2. L'utilisation du doigt sur papier

Au travers de nos études expérimentale, la principale limite méthodologique pourrait se trouver dans le design expérimental. En effet, au travers des quatre études, nous avons fait varier les afférences sensorielles au doigt sur tablette, au stylet sur tablette, et au crayon sur papier. Cependant, aucune comparaison n'a été effectuée avec le doigt utilisé sur papier qui aurait pu être utilisé comme 4^e condition. Ce choix méthodologique peut s'expliquer par une limite pratique qui réside dans l'ajout de matière nécessaire sur le doigt, comme de la peinture, dans cette condition, et qui implique deux contraintes. Premièrement, cet ajout de matière empêcherait l'enfant d'utiliser directement son doigt sur le papier, à la différence du support tactile numérique. Les retours sensoriels liés au support papier, comme le grain du papier, ne pourraient pas être observés indépendamment des retours liés à l'ajout de matière. Les effets de la matière ajoutée et du support (le grain de papier) pourraient donc s'en trouver confondus. Secondement, cet ajout pourrait perturber les afférences sensorielles de la même façon que le stylet, avec un effet qui ne serait cependant pas lié au support mais à la texture de la matière utilisée, pouvant provoquer dans le cadre d'ajout de peinture par exemple, un effet glissant.

De plus, Crescenzi *et al.* (2014) ont observé que l'utilisation de la peinture au doigt en comparaison de la tablette tactile au doigt pouvait perturber l'activité créative. En effet, l'enfant

doit régulièrement rompre avec l'activité en cours, parfois sans terminer le tracé commencé, pour remettre de la peinture sur le doigt. Cette pause nécessaire pour recharger la matière aurait pu perturber le dessin et le processus créatif que nous souhaitons observer.

Cependant, afin de pouvoir évaluer les effets du doigt sur papier sans ajout de matière, et pour isoler les différentes sources d'informations sensorielles, des études ultérieures pourraient utiliser un film imitant le grain du papier à appliquer sur la tablette tactile, afin de pouvoir comparer l'utilisation du doigt sur un grain papier et son utilisation sur l'écran lisse de la tablette tactile.

V.3. Une influence multifactorielle

Une seconde limite à nos résultats pourrait être soulevée, correspondant à l'influence des multiples facteurs constitutifs de la créativité. En effet, bien que notre travail ait mis en avant que la sensorimotricité pourrait être un facteur constitutif de la créativité, cette dernière est également influencée par de multiples facteurs que nous n'avons pas pu contrôler au travers de nos études, et qui auraient pu exercer une influence sur nos résultats. L'étude de la créativité illustre l'interaction continue des nombreuses variables des systèmes dynamiques complexes décrits dans l'Homme-Trace (Galinon-Mélénec, 2021), prises en compte dans le développement des capacités cognitives. Ces facteurs influencent notamment la construction de l'enfant et de l'adolescent, pouvant être considérés comme des « conséquences-traces » de leur histoire de vie (Galinon-Mélénec, 2021). Les dessins créatifs recueillis au travers des 4 études menées dans cette thèse pourraient être le reflet d'un « magma complexe d'informations intériorisées » (Galinon-Mélénec, 2013, p.4), de traces qui s'échoient, qu'elles soient culturelles, biologiques, physiques, chimiques, tant subjectives qu'objectives, visibles qu'invisibles (Galinon-Mélénec, 2019). Ainsi, comme l'avance Runco (1998), les états internes auraient pu influencer la production créative.

De ce fait, les dessins créatifs recueillis dans nos études auraient pu être analysés au regard du facteur émotionnel et de l'histoire de vie des enfants. En effet, comme nous l'évoquons au chapitre 1, les émotions exercent une influence sur la créativité (Hammershøj, 2021 ; Isen, 1999 ; Kaufmann & Vosburg, 1997). La tâche de dessin constitue en outre un support privilégié dans l'analyse du développement de l'expression des émotions (Brechet *et al.*, 2005, 2007). Les émotions ressenties par l'enfant auraient pu particulièrement impacter le

dessin réalisé. Notre analyse créative aurait ainsi pu être enrichie par les aspects émotionnels du dessin, mais également au travers du discours de l'enfant au sujet de sa production. En effet, produire un dessin est équivalent à produire une histoire (Greig, 2013). Nos études auraient pu chercher à analyser les histoires créatives prenant vie au travers du dessin, en demandant à l'enfant et à l'adolescent de raconter l'histoire qu'il créait au travers du dessin, permettant de lui donner vie dans une perspective créative. Plusieurs tests de créativité incluent en effet cette dimension en demandant par exemple à l'enfant de nommer son dessin à l'aide d'un titre, comme dans le CAP (Williams, 1993) ou l'EPOC (Lubart *et al.*, 2011). De plus, travailler autour de l'histoire décrite au travers du dessin est une pratique courante en psychologie (*e.g.* Drory, 2018), notamment au travers de l'art-thérapie (*e.g.* Dubois, 2013), et qui aurait pu être pris en compte dans nos études, particulièrement concernant les adolescents présentant des troubles du comportement.

Le facteur motivationnel aurait pu également jouer un rôle important dans le cadre du dessin créatif sur tablette tactile. Comme indiqué au chapitre 1, il a été suggéré que la motivation à réaliser une tâche créative pouvait impacter la performance dans sa réalisation (Amabile, 1996 ; Hennessey *et al.*, 1989 ; Sternberg & Lubart, 1995). Utiliser une tablette tactile semble apporter une meilleure motivation et un meilleur engagement dans la tâche (Campignotto *et al.*, 2013 ; Clark & Luckin, 2013 ; Dubé & McEwen, 2015 ; Schunk, 2012). Plus précisément, la facilité d'utilisation des tablettes tactiles et l'interaction physique simple qu'elle induit, engage intensément l'enfant dans une tâche multimodale, menant à une motivation plus élevée (Amadiou & Tricot, 2014 ; Crescenzi *et al.*, 2014 ; Dubé & McEwen, 2015 ; Geist, 2014). Les données rapportées dans l'étude 4 plus particulièrement, sont en accord avec cette littérature en montrant la préférence des enfants et adolescents pour l'outil tactile, notamment lorsqu'il est utilisé au stylet. Les scores de créativité pourraient ainsi tenir autant d'une modification d'afférences impliquant un sens de l'agentivité plus élevé, qu'à une motivation plus grande à réaliser la tâche. Ce facteur, que nous n'avons pas contrôlé, pourrait être responsable d'une partie de la différence des scores obtenus entre le support tactile et le support papier, plus traditionnel. Pour ces raisons, des études ultérieures devraient isoler cette composante pour déterminer la part des bénéfices liés à la motivation induite par l'utilisation de ces outils.

VI - Pour aller plus loin

VI.1. Le développement de la créativité pourrait-il dépendre du développement des capacités de prédiction sensorimotrice ?

Les études menées au travers de cette thèse ont révélé un lien systématique entre l'âge des participants et les performances créatives. Que le dessin soit réalisé sur tablette tactile ou sur papier, les scores d'originalité ont montré une croissance linéaire en fonction de l'âge des participants. Ce résultat pourrait être en accord avec le développement globalement croissant de la créativité (Torrance, 1962, 1963, 1967, 1968), mais il ne montre aucune période de chute dans le développement créatif. Les âges des participants choisis pour cette étude ont été définis par rapport aux périodes critiques identifiées dans le développement de l'intégration sensorielle et du contrôle moteur prédictif (6-7 ans, 8-9 ans, 11-12 ans, et 13-14 ans). Ces résultats permettent de suggérer que le développement de la créativité pourrait chevaucher celui de l'intégration sensorielle et du contrôle moteur prédictif. En réalité, le développement globalement croissant de la créativité pourrait tenir du développement globalement croissant des capacités d'intégration sensorielles et de contrôle de l'action sensorimotrice tout au long de l'enfance et de l'adolescence. Des recherches ultérieures devraient ainsi explorer ces liens, en évaluant le développement créatif au regard des capacités d'intégration sensorielle et de contrôle moteur prédictif.

VI.2. Les effets sur la créativité peuvent-ils s'étendre aux fonctions exécutives ?

Nos résultats ouvrent une autre piste d'exploration théorique relative aux fonctions exécutives. Les fonctions exécutives sont des compétences cognitives plus générales qui régulent et coordonnent l'activité cognitive. Celles-ci peuvent se distinguer en trois parties : la flexibilité, l'inhibition et la mise à jour en mémoire de travail (Miyake *et al.*, 2000). Différentes perspectives théoriques suggèrent que celles-ci seraient à l'œuvre dans la créativité. Par exemple Benedek *et al.* (2014) ont montré que la créativité serait prédite par la mise à jour en mémoire de travail et par l'inhibition, mais pas par la flexibilité cognitive.

En outre, divers auteurs suggèrent un lien entre fonctions exécutives et afférences sensorielles. En effet, la théorie de la charge cognitive illustre parfaitement le rôle que peuvent jouer les afférences sensorielles pour la mémoire de travail. Les afférences sensorielles disponibles dans la tâche déterminent la charge cognitive allouée en mémoire de travail pour

réaliser la tâche (Mayer & Moreno, 1998, 2003 ; Moreno & Mayer, 1999 ; Moreno *et al.*, 2001 ; Mousavi *et al.*, 1995 ; Sweller *et al.*, 2011). Augmenter les afférences sensorielles disponibles dans une tâche d'apprentissage permettrait de réduire la charge en mémoire de travail (Mayer & Moreno, 2003). Ce rôle des afférences sensorielles au sein des fonctions exécutives peut se comprendre de façon plus générale au travers des théories de la cognition incarnée et située. Koziol *et al.* (2012) proposent que les fonctions exécutives pourraient se baser sur un processus prédictif de contrôle de l'action, de la même façon que Dietrich et Haider (2015) suggéraient que la créativité puisse reposer sur les modèles internes du contrôle de l'action.

La question se pose alors du lien entre les afférences sensorielles, la créativité et les fonctions exécutives. Plus particulièrement, nous pouvons nous demander si les effets d'une modification d'afférences sensorielles observés sur la créativité chez l'enfant peuvent s'étendre aux fonctions exécutives.

VII - Conclusion

Cette thèse avait pour objectif de questionner les relations entre créativité et sensorimotricité. Cette interrogation découle des études de l'approche multivariée de la créativité mettant en avant le facteur environnemental comme un des piliers de la créativité. Il a notamment été suggéré que des approches pédagogiques comme l'approche Montessori pourrait favoriser la créativité (Besançon & Lubart, 2008), suggérant que la sensorimotricité pourrait jouer un rôle dans le processus créatif. Le facteur sensorimoteur de la créativité a notamment été mis en avant au travers des propositions de Dietrich et Haider (2015), qui, en prenant appui sur la perspective évolutionniste de la créativité, suggérait que celle-ci pourrait se définir comme un processus d'essai-erreur enraciné dans les modèles internes du contrôle de l'action. La perspective incarnée de la créativité soutient également cette idée, ayant montré par de nombreuses études expérimentales, des activations de réseaux neuronaux dédiées à la sensorimotricité lors de tâches créatives (*e.g.* Matheson & Kenett, 2021). Considérer le processus créatif comme une analogie des modèles internes du contrôle de l'action, comme le suggèrent Dietrich et Haider (2015), implique de placer les afférences sensorielles au centre de ce processus créatif. En effet, ces afférences sont essentielles au fonctionnement des modèles internes (Wolpert, 1997 ; Miall & Wolpert, 1996 ; Wolpert *et al.*, 1998) et devraient être au cœur du processus créatif. De ce fait, nous avons proposé au travers de cette thèse, que la

sensorimotricité pourrait être un facteur constitutif de la créativité, notamment par le biais des afférences sensorielles, étudiées chez l'enfant et l'adolescent. Les afférences sensorielles peuvent être modifiées sur tablette tactile, en les augmentant par l'utilisation directe du doigt sur l'interface (Patchan & Puranik, 2016), ou en les réduisant à l'aide d'un stylet sur la tablette tactile (Alamargot & Morin, 2015). Cependant, le traitement de ces afférences sensorielles diffère selon l'âge des enfants. Notamment, les enfants à partir de 8 ans sont en capacité de compenser une perte d'afférences sensorielles par un recours aux systèmes prédictifs, qui permettent d'amplifier les mouvements réalisés sur l'interface, et donc, de maximiser les entrées sensorielles (Guilbert *et al.*, 2019).

En prenant appui sur cette littérature, nous faisons l'hypothèse que la modification des afférences sensorielles consécutives à l'utilisation de l'interface tactile numérique devrait moduler la créativité. Nous faisons également l'hypothèse que l'originalité des dessins produits serait modulée par le développement des capacités de traitement de l'information sensorielle dont dépendent les processus prédictifs. Enfin, nous faisons l'hypothèse que des adolescents présentant des troubles du comportement pourraient bénéficier de l'utilisation d'outils tactiles numériques en augmentant le sentiment de contrôle de l'action par une modification des afférences sensorielles. Nous avons testé ces hypothèses au travers de quatre études expérimentales dans lesquelles des enfants et adolescents étaient amenés à produire des dessins originaux et non originaux sur tablette tactile au doigt, au stylet et au crayon sur papier. La première étude exploratoire a mis en avant que l'utilisation de la tablette tactile au doigt permettait d'augmenter l'originalité des dessins des enfants d'âge scolaire. Cette première étude a également permis l'élaboration de notre outil de mesure de l'originalité des dessins. Cependant, elle ne permettait pas de différencier l'effet inhérent l'outil utilisé (doigt ou crayon) de celui inhérent au support (tablette tactile ou papier), et proposait pour seul sujet le dessin du bonhomme. La deuxième étude a donc permis d'étendre, de façon exploratoire, les observations recueillies lors de la première étude, en montrant que les adolescents de 13-14 ans produisaient des dessins plus originaux sur tablette tactile au doigt et au stylet, qu'au crayon sur papier. Cet effet était observé à partir d'un dessin de la maison. La troisième étude visait à comprendre plus particulièrement cet effet au regard de l'évolution des capacités d'intégration sensorielle de 6 à 14 ans. Cette étude a montré que l'utilisation du doigt sur tablette tactile augmentait l'originalité des dessins produits à tout âge, tandis que le stylet n'apportait des bénéfices que pour les enfants après 8 ans, ayant acquis la capacité de compenser la perte de retour sensoriel initiale. La quatrième étude mettait en avant que ces bénéfices de l'interface tactile numérique se

retrouvaient auprès d'adolescents avec troubles du comportement, qui déclaraient préférer ce support, notamment pour l'agréabilité et le retour haptique procuré lors du dessin créatif.

Nous avons discuté de ces résultats au travers de plusieurs pistes explicatives. Ces résultats auraient pu être expliqués par un effet de nouveauté, cependant, des auteurs observent que l'effet de nouveauté des tablettes tactiles s'estompent, lié à une utilisation très forte utilisation de ces technologies par les enfants et adolescents (Cristia & Seidl, 2015 ; Rideout, 2016). De plus, notre procédure expérimentale permettait de contrôler cet effet de nouveauté. La piste d'une modification de charge cognitive a également été explorée, mais invalidée au travers de la troisième étude. En effet, le mécanisme de compensation utilisé lors de l'utilisation du stylet sur tablette tactile à partir de 8 ans (Guilbert *et al.*, 2019) aurait dû augmenter la charge cognitive, ayant pour conséquence de diminuer l'originalité des dessins à cet âge. Au contraire, nos résultats ont observé un effet d'augmentation.

Pris ensemble, nos résultats permettent de conclure qu'une modification des afférences sensorielles peut moduler le processus créatif des enfants et adolescents. Tisseron (2018) postulait que « plus les enfants passent du temps [...] devant des tablettes, et moins ils en ont pour le jeu créatif, des activités interactives et d'autres expériences cognitives [...] fondamentales » (p. 6). Les études que nous avons menées et la littérature sur laquelle elles se reposent suggèrent, au contraire, qu'une utilisation des tablettes tactiles dans des contextes particuliers pourrait servir de support pour des activités interactives, favorisant la créativité. Nos résultats suggèrent également que la tablette tactile pourrait être utilisée comme un outil de travail auprès des enfants et adolescents présentant des troubles du comportement, afin de renouer progressivement avec les apprentissages scolaires. Ces outils pourraient être utilisés pour l'inclusion scolaire, comme le prône la loi n°2019-791, en apportant des bénéfices similaires tant pour les enfants et adolescents typiques que les enfants et adolescents à BEP. Notre thèse a enfin permis d'apporter une contribution à la pratique du dessin dans son application thérapeutique, qui était majoritairement justifiée par des effets « presque magiques » (p. 11) de la cognition incarnée (Bara & Tricot, 2017). Nos résultats expérimentaux nous mènent à suggérer que les afférences sensorielles pourraient être à l'origine des bénéfices cognitifs lors de tâches réalisées sur tablette tactile. Cependant, étudier la créativité nécessite d'étudier un système complexe qui implique une interaction continue entre de nombreuses variables (Galinon-Mélénec, 2021). Cette thèse ouvre ainsi des perspectives d'études ultérieures afin d'explorer davantage les liens entre créativité et sensorimotricité au travers des

écrans tactiles numériques, en intégrant d'autres paramètres pouvant influencer les résultats obtenus, mais également en étendant ces résultats à d'autres fonctions qui pourraient être influencées par ce gain créatif sur tablette tactile, comme le sens de l'agentivité ou les fonctions exécutives, avec des enfants et adolescents typiques mais également à BEP.

BILBIOGRAPHIE GENERALE

- Adaman, J. E., & Blaney, P. H. (1995). The effects of musical mood induction on creativity. *The Journal of Creative Behavior*, 29(2), 95-108.
- Adams, J. L. (1986). *The care and feeding of ideas: A guide to encouraging creativity*. Stanford Alumni Association.
- Adès, J., Agid, Y., Bach, J. F., Barthélémy, C., Bégué, P., Berthoz, A., ... & Tisseron, S. (2019). Rapport 19-04. L'enfant, l'adolescent, la famille et les écrans: appel à une vigilance raisonnée sur les technologies numériques. *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine*, 203(6), 381-393.
- Agostinho, S., Tindall-Ford, S., Ginns, P., Howard, S. J., Leahy, W., & Paas, F. (2015). Giving learning a helping hand: Finger tracing of temperature graphs on an iPad. *Educational Psychology Review*, 27(3), 427-443.
- Alamargot, D., & Morin, M. F. (2015). Does handwriting on a tablet screen affect students' graphomotor execution? A comparison between grades two and nine. *Human movement science*, 44, 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2015.08.011>
- Alamargot, D., & Morin, M. F. (2015). Does handwriting on a tablet screen affect students' graphomotor execution? A comparison between grades two and nine. *Human movement science*, 44, 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2015.08.011>
- Albert, R. S., & Runco, M. A. (1999). A history of research on creativity. *Handbook of creativity*, 2, 16-31.
- Alquraini, T., & Gut, D. (2012). Critical components of successful inclusion of students with severe disabilities: Literature review. *International journal of special education*, 27(1), 42-59.
- Amabile, T. M. (1983). The social psychology of creativity: A componential conceptualization. *Journal of personality and social psychology*, 45(2), 357.
- Amabile, T. M. (1996). *Creativity and innovation in organizations* (Vol. 5). Boston: Harvard Business School.
- Amadiou, F., & Tricot, A. (2014). *Apprendre avec le numérique: mythes et réalités*. Retz.
- American Academy of Pediatrics Committee on Public Education. Media education. *Pediatrics*. 1999;104(2, pt 1):341-343.
- American Academy of Pediatrics, Committee on Public Education. Media education. *Pediatrics*. 1999;104(2 pt 1):341-343
- American Academy of Pediatrics. "American Academy of Pediatrics: children, adolescents, and television." *Pediatrics* 107.2 (2001): 423-426.
- American Psychiatric Association (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders: DSM-5* (Vol. 5). Washington, DC: American psychiatric association.

- Anderson, C. A., Shibuya, A., Ihori, N., Swing, E. L., Bushman, B. J., Sakamoto, A., ... & Saleem, M. (2010). Violent video game effects on aggression, empathy, and prosocial behavior in eastern and western countries: a meta-analytic review. *Psychological bulletin*, 136(2), 151.
- Anderson, D. R., & Pempek, T. A. (2005). Television and very young children. *American behavioral scientist*, 48(5), 505-522.
- Anderson, J. R., & Lebiere, C. J. (1998). *The atomic components of thought*. Psychology Press.
- Angel, R. W. (1976). Efference copy in the control of movement. *Neurology*, 26(12), 1164-1164.
- Anquetil, T., & Jeannerod, M. (2007). Simulated actions in the first and in the third person perspectives share common representations. *Brain research*, 1130, 125-129.
- Arden, R., Chavez, R. S., Grazioplene, R., & Jung, R. E. (2010). Neuroimaging creativity: a psychometric view. *Behavioural brain research*, 214(2), 143-156.
- Ashby, W. (1952). *Design for a brain: The origin of adaptive behaviour*. Springer Science & Business Media.
- Assaiante, C. (2012). Action and representation of action during childhood and adolescence: a functional approach. *Movement Sport Sciences*, 74(3), 65-79.
- Assaiante, C., Barlaam, F., Cignetti, F., & Vaugoyeau, M. (2014). Body schema building during childhood and adolescence: a neurosensory approach. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 44(1), 3-12.
- Assaiante, C., Mallau, S., Viel, S., Jover, M., & Schmitz, C. (2005). Development of postural control in healthy children: a functional approach. *Neural plasticity*, 12(2-3), 109-118.
- Assaiante, C., Woollacott, M., & Amblard, B. (2000). Development of postural adjustment during gait initiation: kinematic and EMG analysis. *Journal of motor behavior*, 32(3), 211-226.
- Atkinson, M. (2012). They never give up on you. *Office of the Children's Commissioner school exclusions inquiry: Executive summary*.
- Aziz, N. A. A. (2013). Children's interaction with tablet applications: Gestures and interface design. *Children*, 2(3), 447-450.
- Aziz-Zadeh, L., Liew, S. L., & Dandekar, F. (2013). Exploring the neural correlates of visual creativity. *Social cognitive and affective neuroscience*, 8(4), 475-480.
- Baber, C., Chemero, T., & Hall, J. (2019). What the jeweller's hand tells the jeweller's brain: tool use, creativity and embodied cognition. *Philosophy & Technology*, 32(2), 283-302.
- Babinsky, E., Braddick, O., & Atkinson, J. (2012a). The effect of removing visual information on reach control in young children. *Experimental brain research*, 222(3), 291-302.
- Babinsky, E., Braddick, O., & Atkinson, J. (2012b). Infants and adults reaching in the dark. *Experimental brain research*, 217(2), 237-249.
- Bach, J. F., Houdé, O., Léna, P., & Tisseron (2013). *L'enfant et les écrans. Un Avis de l'Académie des sciences*. Le Pommier.

- Bairstow, P. J., & Laszlo, J. I. (1981). Kinaesthetic sensitivity to passive movements and its relationship to motor development and motor control. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 23(6), 606-616. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1981.tb02042.x>
- Bal, S. (1988). Creativity, cognitive style and academic achievement amongst university students. *Psychological Studies*.
- Balconi, M. (2010). *Neuropsychology of the Sense of Agency*. New York, NY: Nova Science Publishers.
- Baldwin, J. M. (1906). *Mental development in the child and the race: Methods and processes*. Macmillan.
- Bar, M. (2007). The proactive brain: using analogies and associations to generate predictions. *Trends in cognitive sciences*, 11(7), 280-289.
- Bar, M. (2009). The proactive brain: memory for predictions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1521), 1235-1243.
- Bara, F., & Gentaz, E. (2011). Haptics in teaching handwriting: The role of perceptual and visuo-motor skills. *Human movement science*, 30(4), 745-759.
- Bara, F., & Tricot, A. (2017). Le rôle du corps dans les apprentissages symboliques: apports des théories de la cognition incarnée et de la charge cognitive. *Recherches sur la Philosophie et le Langage*, 33, 219-249.
- Barbot, B. (2008). Structures identitaires et expression créative à l'adolescence. *L'orientation scolaire et professionnelle*, (37/4), 483-507.
- Barbot, B., Lubart, T. I., & Besançon, M. (2016). "Peaks, slumps, and bumps": Individual differences in the development of creativity in children and adolescents. *New directions for child and adolescent development*, 2016(151), 33-45.
- Barbot, B., Rogh, W., Pritzker, S., & Runco, M. (2020). Developmental trends in creative abilities and potentials.
- Bard, C., & Hay, L. (1983). Etude ontogénétique de la coordination visuo-manuelle. *Canadian Journal of Psychology/Revue canadienne de psychologie*, 37(3), 390.
- Barker, J., Alldred, P., Watts, M., & Dodman, H. (2010). Pupils or prisoners? Institutional geographies and internal exclusion in UK secondary schools. *Area*, 42(3), 378-386.
- Barron, F. (1963). Creativity and psychological health.
- Barron, F. (1969). Creative person and creative process.
- Barron, F. (1988). Putting creativity to work. *The nature of creativity*, 76-98.
- Barrouillet, P., Fayol, M., & Chevrot, C. (1994). Le dessin d'une maison. Construction d'une échelle de développement. *L'Année Psychologique*, 94, 81-98.
- Barry, T. D., Lyman, R. D., & Klinger, L. G. (2002). Academic underachievement and attention-deficit/hyperactivity disorder: The negative impact of symptom severity on school performance. *Journal of school psychology*, 40(3), 259-283.

- Barsalou, Lawrence W. "Grounded cognition." *Annual review of psychology* 59.1 (2008): 617-645.
- Bashwiner, D. (2018). The neuroscience of musical creativity. *The Cambridge Handbook of the Neuroscience of Creativity*, 51, 495-516.
- Bashwiner, D., & Bacon, D. (2019). Musical creativity and the motor system. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 27, 146-153.
- Bashwiner, David M., *et al.* "Musical creativity “revealed” in brain structure: interplay between motor, default mode and limbic networks." *Scientific reports* 6.1 (2016): 1-8.
- Bat Or, M., Kourkoutas, E., Smyrnaki, M., & Potchebutzky, H. (2019). Two drawing tasks to illuminate self-agency representations of children with disruptive behavior problems. *Art Therapy*, 36(1), 30-39.
- Batey, M., & Furnham, A. (2006). Creativity, intelligence, and personality: A critical review of the scattered literature. *Genetic, social, and general psychology monographs*, 132(4), 355-429.
- Beaty, R. E. (2015). The neuroscience of musical improvisation. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 51, 108-117.
- Behnamnia, N., Kamsin, A., & Ismail, M. A. B. (2020). The landscape of research on the use of digital game-based learning apps to nurture creativity among young children: A review. *Thinking Skills and Creativity*, 37, 100666.
- Behnamnia, N., Kamsin, A., Ismail, M. A. B., & Hayati, A. (2020). The effective components of creativity in digital game-based learning among young children: A case study. *Children and Youth Services Review*, 116, 105227.
- Bell, V., Bishop, D. V., & Przybylski, A. K. (2015). The debate over digital technology and young people. *Bmj*, 351.
- Benedek, M., Jauk, E., Sommer, M., Arendasy, M., & Neubauer, A. C. (2014). Intelligence, creativity, and cognitive control: The common and differential involvement of executive functions in intelligence and creativity. *Intelligence*, 46, 73-83.
- Benedek, M., Schües, T., Beaty, R. E., Jauk, E., Koschutnig, K., Fink, A., & Neubauer, A. C. (2018). To create or to recall original ideas: Brain processes associated with the imagination of novel object uses. *Cortex*, 99, 93-102.
- Bengtsson, S. L., Csíkszentmihályi, M., & Ullén, F. (2007). Cortical regions involved in the generation of musical structures during improvisation in pianists. *Journal of cognitive neuroscience*, 19(5), 830-842.
- Bennett, S., & Maton, K. (2010). Beyond the ‘digital natives’ debate: Towards a more nuanced understanding of students' technology experiences. *Journal of computer assisted learning*, 26(5), 321-331.
- Bennett, S., Maton, K., & Kervin, L. (2008). The ‘digital natives’ debate: A critical review of the evidence. *British journal of educational technology*, 39(5), 775-786.
- Berkout, O. V., Young, J. N., & Gross, A. M. (2011). Mean girls and bad boys: Recent research on gender differences in conduct disorder. *Aggression and Violent Behavior*, 16(6), 503-511.

- Berkowitz, A. L., & Ansari, D. (2010). Expertise-related deactivation of the right temporoparietal junction during musical improvisation. *Neuroimage*, 49(1), 712-719.
- Berkowitz, T., Schaeffer, M. W., Maloney, E. A., Peterson, L., Gregor, C., Levine, S. C., & Beilock, S. L. (2015). Math at home adds up to achievement in school. *Science*, 350(6257), 196-198.
- Berthoz, A., & Debru, C. (2015). *Anticipation et prédiction: du geste au voyage mental*. Odile Jacob.
- Besançon, M., & Lubart, T. (2008). Differences in the development of creative competencies in children schooled in diverse learning environments. *Learning and individual differences*, 18(4), 381-389.
- Besançon, M., & Lubart, T. (2015). *La créativité de l'enfant: évaluation et développement*. Mardaga.
- Beyers, R. N. (2009). A five dimensional model for educating the net generation. *Journal of Educational Technology & Society*, 12(4), 218-227.
- Bigelow, E. C. (2013). *iWrite: Digital message making practices of young children*. Vanderbilt University.
- Binder, J. R., Desai, R. H., Graves, W. W., & Conant, L. L. (2009). Where is the semantic system? A critical review and meta-analysis of 120 functional neuroimaging studies. *Cerebral cortex*, 19(12), 2767-2796.
- Binet, A., & Simon, T. (1905). Méthodes nouvelles pour le diagnostic du niveau intellectuel des anormaux. *L'année Psychologique*, 11(1), 191-244.
- Bink, M. L., & Marsh, R. L. (2000). Cognitive regularities in creative activity. *Review of General Psychology*, 4(1), 59-78.
- Birchwood, J., & Daley, D. (2012). Brief report: The impact of attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) symptoms on academic performance in an adolescent community sample. *Journal of adolescence*, 35(1), 225-231.
- Bisoglio, J., Michaels, T. I., Mervis, J. E., & Ashinoff, B. K. (2014). Cognitive enhancement through action video game training: great expectations require greater evidence. *Frontiers in psychology*, 5, 136.
- Bitu, F., Jouen, F. & Molina, M. (2019). Les apports de l'interface tactile numérique dans l'expression créative graphique : une étude exploratoire chez des enfants d'âge scolaire. *Enfance*, 3, 357-373. <https://doi.org/10.3917/enf2.193.0357>
- Bitu, F., Galinon-Mélénec, B., & Molina, M. (2021). Digital touchscreens as a media for creativity during adolescence. *L'Année psychologique*, 121(4), 489-518.
- Bitu, F., Galinon-Mélénec, B., & Molina, M. (2022). Modifying Sensory Afferences on the Tablet Changes Originality in Drawings. *Frontiers in Psychology*. 13:806093.
- Black, J. B. (2010). An embodied/grounded cognition perspective on educational technology. In *New science of learning* (pp. 45-52). Springer, New York, NY.
- Black, J. B. (2010). An embodied/grounded cognition perspective on educational technology. In *New science of learning* (pp. 45-52). Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5716-0_3

- Blakemore, S. J., Smith, J., Steel, R., Johnstone, E. C., & Frith, C. D. (2000). The perception of self-produced sensory stimuli in patients with auditory hallucinations and passivity experiences: evidence for a breakdown in self-monitoring. *Psychological medicine*, 30(5), 1131-1139.
- Blakemore, S. J., Wolpert, D. M., & Frith, C. D. (2002). Abnormalities in the awareness of action. *Trends in cognitive sciences*, 6(6), 237-242.
- Blöte, A. W., & Hamstra-Bletz, L. (1991). A longitudinal study on the structure of handwriting. *Perceptual and motor skills*, 72(3), 983-994.
- Boasen, J., Takeshita, Y., Kuriki, S., & Yokosawa, K. (2018). Spectral-spatial differentiation of brain activity during mental imagery of improvisational music performance using MEG. *Frontiers in human neuroscience*, 12, 156.
- Boccia, M., Piccardi, L., Palermo, L., Nori, R., & Palmiero, M. (2015). Where do bright ideas occur in our brain? Meta-analytic evidence from neuroimaging studies of domain-specific creativity. *Frontiers in psychology*, 6, 1195.
- Borroni, P., Montagna, M., Cerri, G., & Baldissera, F. (2008). Bilateral motor resonance evoked by observation of a one-hand movement: role of the primary motor cortex. *European Journal of Neuroscience*, 28(7), 1427-1435.
- Borzekowski, D. L., & Robinson, T. N. (2005). The remote, the mouse, and the no. 2 pencil: the household media environment and academic achievement among third grade students. *Archives of Pediatrics & Adolescent Medicine*, 159(7), 607-613.
- Bowman-Perrott, L., Benz, M. R., Hsu, H. Y., Kwok, O. M., Eisterhold, L. A., & Zhang, D. (2013). Patterns and predictors of disciplinary exclusion over time: An analysis of the SEELS national data set. *Journal of emotional and behavioral disorders*, 21(2), 83-96.
- Boyd, R., & Richerson, P. J. (1985). *Culture and the Evolutionary Process*.
- Braswell, G. S., & Rosengren, K. S. (2002). The role of handedness in graphic production: Interactions between biomechanical and cognitive factors in drawing development. *British Journal of Developmental Psychology*, 20(4), 581-599.
- Braswell, G. S., Rosengren, K. S., & Pierrotsakos, S. L. (2007). Task constraints on preschool children's grip configurations during drawing. *Developmental psychobiology*, 49(2), 216-225.
- Braswell, G., & Rosengren, K. (2008). The interaction of biochemical and cognitive constraints in the production of children's drawing.
- Brechet, C., Picard, D., & Baldy, R. (2005). Développement de la représentation des émotions dans le dessin du bonhomme. *Actes du colloque, Congrès National de la Société Française de Psychologie*, p. 158
- Brechet, C., Picard, D., & Baldy, R. (2007). Expression des émotions dans le dessin d'un homme chez l'enfant de 5 à 11 ans. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 61(2), 142.
- Brown, A., & Council on Communications and Media. (2011). Media use by children younger than 2 years. *Pediatrics*, 128(5), 1040-1045.

- Brown, J. D., & Strasburger, V. C. (2007). From Calvin Klein to Paris Hilton and MySpace: adolescents, sex, and the media. *Adolescent Medicine: State of the Art Reviews*, 18(3), 484-507.
- Brown, M. C., McNeil, N. M., & Glenberg, A. M. (2009). Using concreteness in education: Real problems, potential solutions. *Child Development Perspectives*, 3(3), 160-164.
- Brown, S., Martinez, M. J., & Parsons, L. M. (2006). The neural basis of human dance. *Cerebral cortex*, 16(8), 1157-1167.
- Brown, T. M. (2007). Lost and turned out: Academic, social, and emotional experiences of students excluded from school. *Urban Education*, 42(5), 432-455.
- Bubic, A., Von Cramon, D. Y., & Schubotz, R. I. (2010). Prediction, cognition and the brain. *Frontiers in human neuroscience*, 4, 25.
- Buckner, R. L., & Carroll, D. C. (2007). Self-projection and the brain. *Trends in cognitive sciences*, 11(2), 49-57.
- Buege, C. (1993). The Effect of Mainstreaming on Attitude and Self-Concept Using Creative Drama and Social Skills Training. *Youth Theatre Journal*, 7(3), 19-22.
- Bushman, B. J., & Anderson, C. A. (2001). Media violence and the American public: Scientific facts versus media misinformation. *American Psychologist*, 56(6-7), 477.
- Byrge, C., & Tang, C. (2015). Embodied creativity training: Effects on creative self-efficacy and creative production. *Thinking Skills and Creativity*, 16, 51-61.
- Caeyenberghs, K., Tsoupas, J., Wilson, P. H., & Smits-Engelsman, B. C. (2009). Motor imagery development in primary school children. *Developmental neuropsychology*, 34(1), 103-121.
- Caeyenberghs, K., Wilson, P. H., Van Roon, D., Swinnen, S. P., & Smits-Engelsman, B. C. (2009). Increasing convergence between imagined and executed movement across development: evidence for the emergence of movement representations. *Developmental science*, 12(3), 474-483. <https://doi.org/10.1080/87565640802499183>
- Cameron, E. L. (2018). Olfactory perception in children. *World Journal of Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery*, 4(01), 57-66.
- Camp, G. C. (1994). A longitudinal study of correlates of creativity. *Creativity Research Journal*, 7(2), 125-144.
- Campbell, D. T. (1960). Blind variation and selective retentions in creative thought as in other knowledge processes. *Psychological review*, 67(6).
- Campbell, D. T. (1974). 'Downward causation' in hierarchically organised biological systems. In *Studies in the Philosophy of Biology* (pp. 179-186). Palgrave, London.
- Campigotto, R., McEwen, R., & Epp, C. D. (2013). Especially social: Exploring the use of an iOS application in special needs classrooms. *Computers & Education*, 60(1), 74-86.
- Canat, S. (2005). Quels besoins scolaires spécifiques pour accueillir des enfants ayant des troubles du comportement et du caractère. *Enfance/adolescence et ses troubles*, 335-350.

- Canat, S. (2021). Atelier 3. L'Unité d'enseignement externalisée, de l'inclusion scolaire au fonctionnement en DITEP. In *Société inclusive et solidaire: entre ambition et réalité, le DITEP accélérateur de pratiques* (pp. 224-236). Champ social.
- Cardinali, L., Brozzoli, C., & Farne, A. (2009). Peripersonal space and body schema: two labels for the same concept?. *Brain topography*, 21(3), 252-260.
- Catmur, C., Walsh, V., & Heyes, C. (2007). Sensorimotor learning configures the human mirror system. *Current biology*, 17(17), 1527-1531.
- Chabrol, H. (2004). *Psychopathologie de l'adolescent*. Belin.
- Chae, S. (2003). Adaptation of a picture-type creativity test for pre-school children. *Language Testing*, 20(2), 179-188.
- Chandler, P., & Tricot, A. (2015). Mind your body: The essential role of body movements in children's learning. *Educational Psychology Review*, 27(3), 365-370.
- Chanquoy, L., Tricot, A., & Sweller, J. (2007). *La charge cognitive: Théorie et applications*. Armand Colin.
- Charles, R. E., & Runco, M. A. (2001). Developmental trends in the evaluative and divergent thinking of children. *Creativity Research Journal*, 13(3-4), 417-437.
- Chartrel, E., & Vinter, A. (2006). Rôle des informations visuelles dans la production de lettres cursives chez l'enfant et l'adulte. *L'Année psychologique*, 106(1), 43-63.
- Chartrel, E., & Vinter, A. (2008). The impact of spatio-temporal constraints on cursive letter handwriting in children. *Learning and instruction*, 18(6), 537-547.
- Cheung, R. H. P. (2010). Designing movement activities to develop children's creativity in early childhood education. *Early Child Development and Care*, 180(3), 377-385.
- Chiappedi, M., Togni, R., De Bernardi, E., Baschenis, I. M. C., Battezzato, S., Balottin, U., ... & Bejor, M. (2012). Arm trajectories and writing strategy in healthy children. *BMC pediatrics*, 12(1), 1-6. <https://doi.org/10.1186/1471-2431-12-173>
- Chicoine, A. J., Lassonde, M., & Proteau, L. (1992). Developmental aspects of sensorimotor integration. *Developmental Neuropsychology*, 8(4), 381-394.
- Choi, S. K., & DiPaola, S. (2013). How a painter paints: an interdisciplinary understanding of embodied creativity. *Electronic Visualisation and the Arts (EVA 2013)*, 127-134.
- Chonchaiya, W., & Pruksananonda, C. (2008). Television viewing associates with delayed language development. *Acta Paediatrica*, 97(7), 977-982.
- Choudhury, S., Charman, T., Bird, V., & Blakemore, S. J. (2007a). Development of action representation during adolescence. *Neuropsychologia*, 45(2), 255-262. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.07.010>
- Choudhury, S., Charman, T., Bird, V., & Blakemore, S. J. (2007b). Adolescent development of motor imagery in a visually guided pointing task. *Consciousness and cognition*, 16(4), 886-896.

- Christakis, D. A. (2014). Interactive media use at younger than the age of 2 years: time to rethink the American Academy of Pediatrics guideline?. *JAMA pediatrics*, 168(5), 399-400.
- Christakis, D. A., Gilkerson, J., Richards, J. A., Zimmerman, F. J., Garrison, M. M., Xu, D., ... & Ypanel, U. (2009). Audible television and decreased adult words, infant vocalizations, and conversational turns: a population-based study. *Archives of pediatrics & adolescent medicine*, 163(6), 554-558.
- Christakis, D. A., Zimmerman, F. J., DiGiuseppe, D. L., & McCarty, C. A. (2004). Early television exposure and subsequent attentional problems in children. *Pediatrics*, 113(4), 708-713.
- Christenson, P. G., Henriksen, L., & Roberts, D. F. (2000). *Substance use in popular prime-time television*. The Office.
- Christle, C. A., Jolivette, K., & Nelson, C. M. (2005). Breaking the school to prison pipeline: Identifying school risk and protective factors for youth delinquency. *Exceptionality*, 13(2), 69-88.
- Cignetti, F., Caudron, S., Vaugoyeau, M., & Assaiante, C. (2013). Body schema disturbance in adolescence: from proprioceptive integration to the perception of human movement. *Journal of Motor Learning and Development*, 1(3), 49-58.
- Clark, A. (1998). *Being there: Putting brain, body, and world together again*. MIT press.
- Clark, A. (2008). *Supersizing the mind: Embodiment, action, and cognitive extension*. USA: Oxford University Press.
- Clark, W., & Luckin, R. (2013). iPads in the Classroom. *What The Research Says*.
- Clifford, M. M. (1988). Failure tolerance and academic risk-taking in ten-to twelve-year-old students. *British Journal of Educational Psychology*, 58(1), 15-27.
- Clifford, M. M., & Chou, F. C. (1991). Effects of payoff and task context on academic risk taking. *Journal of Educational Psychology*, 83(4), 499.
- Colder, B. (2011). Emulation as an integrating principle for cognition. *Frontiers in Human Neuroscience*, 5, 54.
- Comstock, G., & Paik, H. (1991). *Television and the American child*. Academic Press.
- Connell, S. L., Lauricella, A. R., & Wartella, E. (2015). Parental co-use of media technology with their young children in the USA. *Journal of Children and Media*, 9(1), 5-21.
- Contreras-Vidal, J. L. (2006). Development of forward models for hand localization and movement control in 6-to 10-year-old children. *Human movement science*, 25(4-5), 634-645. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2006.07.006>
- Cooper, L. Z. (2005). Developmentally appropriate digital environments for young children. *Library trends*, 54(2), 286-302. <https://doi.org/10.1353/lib.2006.0014>.
- Council on Communications and Media, & MBE. (2016). Media use in school-aged children and adolescents. *Pediatrics*, 138(5), e20162592.

- Council on communications and media, Strasburger, V. C., Hogan, M. J., Mulligan, D. A., Ameenuddin, N., Christakis, D. A., ... & Swanson, W. S. L. (2013). Children, adolescents, and the media. *Pediatrics*, 132(5), 958-961.
- Couse, L. J., & Chen, D. W. (2010). A tablet computer for young children? Exploring its viability for early childhood education. *Journal of research on technology in education*, 43(1), 75-96.
- Cousijn, J., Zanolie, K., Munsters, R. J., Kleibeuker, S. W., & Crone, E. A. (2014). The relation between resting state connectivity and creativity in adolescents before and after training. *PLoS One*, 9(9), e105780.
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and brain sciences*, 24(1), 87-114.
- Crescenzi, L., Price, S., & Jewitt, C. (2014). Paint on the finger or paint on the screen: A comparative study. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 140, 376-380.
- Crescenzi, L., Jewitt, C., & Price, S. (2014). The role of touch in preschool children's learning using iPad versus paper interaction. *Australian Journal of Language and Literacy*, 37(2), 86-95.
- Cristia, A., & Seidl, A. (2015). Parental reports on touch screen use in early childhood. *PloS one*, 10(6), e0128338.
- Cropley, A. J. (1999). Definitions of creativity. Encyclopedia of creativity. *Encyclopedia of creativity*, 1, 511-524.
- Csikszentmihalyi, M. (1988). Motivation and creativity: Toward a synthesis of structural and energistic approaches to cognition. *New Ideas in psychology*, 6(2), 159-176.
- Csikszentmihalyi, M. (2006). "Foreword: developing creativity" in *Developing creativity in higher education: An imaginative curriculum*, (ed) Norman Jackson, Martin Oliver, Malcolm Shaw & James Wisdom, Routledge: London, xviii-xx.
- Danna, J., & Velay, J. L. (2015). Basic and supplementary sensory feedback in handwriting. *Frontiers in psychology*, 6, 169.
- Darvishi, Z., & Pakdaman, S. (2012). "Fourth grade slump in creativity": Development of creativity in primary school children. *GSTF Journal of Law and Social Sciences (JLSS)*, 1(2), 40.
- Darwin, C. (1859). On the origin of species. *published on*, 24, 1.
- Darwin, C. (1871). The descent of man. *New York: D. Appleton*.
- Dasgupta, S. (2004). Is creativity a Darwinian process? *Creativity Research Journal*, 16, 403-413.
- Daugherty, M. (1993). Creativity and private speech: Developmental trends. *Creativity Research Journal*, 6(3), 287-296.
- Davies, P. T., & Sturge-Apple, M. L. (2014). Family context in the development of psychopathology. In *Handbook of developmental psychopathology* (pp. 143-161). Springer, Boston, MA.
- Decety, J., & Ingvar, D. H. (1990). Brain structures participating in mental simulation of motor behavior: A neuropsychological interpretation. *Acta psychologica*, 73(1), 13-34.

- Demmer, D. H., Hooley, M., Sheen, J., McGillivray, J. A., & Lum, J. A. (2017). Sex differences in the prevalence of oppositional defiant disorder during middle childhood: a meta-analysis. *Journal of abnormal child psychology*, 45(2), 313-325.
- Dennis, R. (2013). Viewpoints, creativity and embodied learning: Developing perceptual and kinaesthetic skills in non-dancers studying undergraduate university drama. *Theatre, Dance and Performance Training*, 4(3), 336-352.
- Department for Education (2019). Permanent and fixed-period exclusions in England: 2017 to 2018. London: DfE.
- Desmurget, M. (2011). *TV lobotomie: la vérité scientifique sur les effets de la télévision-Essais-documents*. Max Milo.
- Desmurget, M., & Grafton, S. (2000). Forward modeling allows feedback control for fast reaching movements. *Trends in cognitive sciences*, 4(11), 423-431.
- Diedrichsen, J., Verstynen, T., Hon, A., Zhang, Y., & Ivry, R. B. (2007). Illusions of force perception: the role of sensori-motor predictions, visual information, and motor errors. *Journal of neurophysiology*, 97(5), 3305-3313.
- Dienes, Z., & Perner, J. (1999). A theory of implicit and explicit knowledge. *Behavioral and brain sciences*, 22(5), 735-808.
- Dietrich, A. (2013). *The Mechanics of Thought Trials*. International Conference on Computational Creativity.
- Dietrich, A. (2015). *How creativity happens in the brain*. Springer.
- Dietrich, A. (2019a). Where in the brain is creativity: a brief account of a wild-goose chase. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 27, 36-39.
- Dietrich, A. (2019b). Types of creativity. *Psychonomic bulletin & review*, 26(1), 1-12.
- Dietrich, A., & Haider, H. (2015). Human creativity, evolutionary algorithms, and predictive representations: The mechanics of thought trials. *Psychonomic bulletin & review*, 22(4), 897-915. <https://doi.org/10.3758/s13423-014-0743-x>
- Dietrich, A., & Haider, H. (2015). Human creativity, evolutionary algorithms, and predictive representations: The mechanics of thought trials. *Psychonomic bulletin & review*, 22(4), 897-915. <https://doi.org/10.3758/s13423-014-0743-x>
- Dietrich, A., & Kanso, R. (2010). A review of EEG, ERP, and neuroimaging studies of creativity and insight. *Psychological bulletin*, 136(5), 822.
- Dixon, R. M., Verenikina, I., Costley, D., & Pryor, S. (2015). The use of iPads in the home setting for students with autism spectrum disorders. *Journal of Special Education Technology*, 30(4), 193-206.
- Downing, K. L. (2009). Predictive models in the brain. *Connection Science*, 21(1), 39-74.
- Drory, D. (2018). Pour écouter un enfant, entendons ses dessins. *Carnet de notes sur les maltraitances infantiles*, 7(1), 48-58.

- Dubé, A. K., & McEwen, R. N. (2015). Do gestures matter? The implications of using touchscreen devices in mathematics instruction. *Learning and Instruction*, 40, 89-98. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2015.09.002>
- Dubois, A. M. (2013). *Art-thérapie, Principes, méthodes et outils pratiques, 1: Art-thérapie*. Elsevier Health Sciences.
- Dudek, S. Z., Strobel, M. G., & Runco, M. A. (1993). Cumulative and proximal influences on the social environment and children's creative potential. *The Journal of Genetic Psychology*, 154(4), 487-499.
- Duff, W. (1767). *An essay on original genius: and its various modes of exertion in philosophy and the fine arts, particularly in poetry*. Edward and Charles Dilly.
- Duijzer, C. A., Shayan, S., Bakker, A., Van der Schaaf, M. F., & Abrahamson, D. (2017). Touchscreen tablets: Coordinating action and perception for mathematical cognition. *Frontiers in Psychology*, 8, 144.
- Durkin, K. (2010). Videogames and young people with developmental disorders. *Review of General Psychology*, 14(2), 122-140.
- Edwards-Duke, B., Boswell, B., McGhee, S., & Decker, J. (2002). Creative educational dance and children with behavior disorders: Encouraging a spirit of cooperation. *Journal of Dance Education*, 2(1), 23-31.
- Eggermont, S., & Van den Bulck, J. (2006). Nodding off or switching off? The use of popular media as a sleep aid in secondary-school children. *Journal of paediatrics and child health*, 42(7-8), 428-433.
- Eliasson, A. C., Rösblad, B., & Forssberg, H. (2004). Disturbances in programming goal-directed arm movements in children with ADHD. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 46(1), 19-27.
- Ellickson, P. L., Collins, R. L., Hambarsoomians, K., & McCaffrey, D. F. (2005). Does alcohol advertising promote adolescent drinking? Results from a longitudinal assessment. *Addiction*, 100(2), 235-246.
- Elson, M., & Ferguson, C. J. (2014). Twenty-five years of research on violence in digital games and aggression: empirical evidence, perspectives, and a debate gone astray. *European Psychologist*, 19(1), 33.
- Epstein, L. H., Roemmich, J. N., Robinson, J. L., Paluch, R. A., Winiewicz, D. D., Fuerch, J. H., & Robinson, T. N. (2008). A randomized trial of the effects of reducing television viewing and computer use on body mass index in young children. *Archives of pediatrics & adolescent medicine*, 162(3), 239-245.
- Ericsson, K. A., Krampe, R. T., & Tesch-Römer, C. (1993). The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychological review*, 100(3), 363.
- Eysenck, H. J. (1995). *Genius: The natural history of creativity* (No. 12). Cambridge University Press.
- Facaoaru, C. (1985). *Kreativität in Wissenschaft und Technik [Creativity in science and technology]*. Bern: Huber.

- Feist, G. J. (1998). A meta-analysis of personality in scientific and artistic creativity. *Personality and social psychology review*, 2(4), 290-309.
- Feist, G. J. (1999). The Influence of Personality on Artistic and Scientific Creativity. *Handbook of creativity*, 273.
- Feldhusen, J. F. (1995). Creativity: A knowledge base, metacognitive skills, and personality factors. *The Journal of creative behavior*, 29(4), 255-268.
- Fergusson, D. M., John Horwood, L., & Ridder, E. M. (2005). Show me the child at seven: the consequences of conduct problems in childhood for psychosocial functioning in adulthood. *Journal of child psychology and psychiatry*, 46(8), 837-849.
- Ferrel-Chapus, C., Hay, L., Olivier, I., Bard, C., & Fleury, M. (2002). Visuomanual coordination in childhood: adaptation to visual distortion. *Experimental brain research*, 144(4), 506-517.
- Festinger, L., & Canon, L. K. (1965). Information about spatial location based on knowledge about efference. *Psychological Review*, 72(5), 373.
- Fielding, K., & Murcia, K. (2022). Research linking digital technologies to young children's creativity: An interpretive framework and systematic review. *Issues in Educational Research*, 32(1), 105-125.
- Fink, A., Graif, B., & Neubauer, A. C. (2009). Brain correlates underlying creative thinking: EEG alpha activity in professional vs. novice dancers. *NeuroImage*, 46(3), 854-862.
- Flanagan, J. R., & Wing, A. M. (1997). The role of internal models in motion planning and control: evidence from grip force adjustments during movements of hand-held loads. *Journal of Neuroscience*, 17(4), 1519-1528.
- Fleury, S., Agnes, A., Vanukuru, R., Goumillout, E., Delcombel, N., & Richir, S. (2020). Studying the effects of visual movement on creativity. *Thinking skills and Creativity*, 36, 100661.
- Flewitt, R., Messer, D., & Kucirkova, N. (2015). New directions for early literacy in a digital age: The iPad. *Journal of Early Childhood Literacy*, 15(3), 289-310.
- Fodor, J. A. (1985). Precis of the modularity of mind. *Behavioral and brain sciences*, 8(1), 1-5. <https://doi.org/10.1017/S0140525X0001921X>
- Fogassi, L., & Gallese, V. (2004). Action as a binding key to multisensory integration. *The handbook of multisensory processes*, 425-441.
- Foglia, L., & Wilson, R. A. (2013). Embodied cognition. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 4(3), 319-325. <https://doi.org/10.1002/wcs.1226>
- Fortun-Carillat, V. (2015). Accompagner en Itep des enseignants débutants dans la construction d'une relation pédagogique avec des élèves présentant des troubles du comportement. *La Nouvelle Revue de l'Adaptation et de la Scolarisation*, 72(4), 85-105.
- Fourkas, A. D., Ionta, S., & Aglioti, S. M. (2006). Influence of imagined posture and imagery modality on corticospinal excitability. *Behavioural brain research*, 168(2), 190-196.
- Freud, S. (1908). La morale sexuelle civilisée et la maladie nerveuse des temps modernes. *La vie sexuelle*, 28-46.

- Friston, K. J., & Stephan, K. E. (2007). Free-energy and the brain. *Synthese*, 159(3), 417-458.
- Frith, C. D. (1992). *The Cognitive Neuropsychology of Schizophrenia*. Psychology press.
- Frith, E., Miller, S., & Loprinzi, P. D. (2020). A review of experimental research on embodied creativity: revisiting the mind–body connection. *The Journal of Creative Behavior*, 54(4), 767-798.
- Furnham, A. (1994). A content, correlational and factor analytic study of four tolerance of ambiguity questionnaires. *Personality and Individual Differences*, 16(3), 403-410.
- Futuyma, D. J. (1998). Wherefore and whither the naturalist?. *The American Naturalist*, 151(1), 1-6.
- Gaggioli, A., Falletta, E. M., Ferrise, F., Graziosi, S., Gallace, A., D'Ausilio, A., ... & Chirico, A. (2019). Effects of interpersonal sensorimotor synchronization on dyadic creativity: Gender matters. *Frontiers in psychology*, 9, 2604.
- Galinon-Mélénec, B. (2013). Expérience incarnée, construction cognitive et jugement. Le rôle des «signes-traces» du corps dans la signification. *Revue Française des Sciences de l'Information et de la Communication*, (3).
- Galinon-Melenec, B. (Ed.). (2019). *L'homme-trace: des traces du corps au corps-trace*. CNRS Éditions via OpenEdition.
- Galinon-Melenec, B. (2021). *The Trace Odyssey 1: A Journey Beyond Appearances*. John Wiley & Sons.
- Gallagher, S. (2000). Philosophical conceptions of the self: Implications for cognitive science. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(1), 14-21
- Gallagher, S. (2000). Philosophical conceptions of the self: Implications for cognitive science. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(1), 14-21
- Gallagher, S. (2006). *How the body shapes the mind*. Clarendon Press.
- Gallagher, S. (2006). *How the body shapes the mind*. Clarendon Press.
- Gallese, V., & Metzinger, T. (2003). Motor ontology: the representational reality of goals, actions and selves. *Philosophical psychology*, 16(3), 365-388.
- Gallistel, C. R. (1980). From Muscles to Motivation: Three distinct kinds of elementary units of behavior combine to form complex units whose coordination by selective potentiation and depotentiation yields motivated behavior. *American Scientist*, 68(4), 398-409.
- Gallivan, J. P., McLean, D. A., Valyear, K. F., & Culham, J. C. (2013). Decoding the neural mechanisms of human tool use. *elife*, 2, e00425.
- Galton, F. (1879). Psychometric experiments. *Brain*, 2(2), 149-162.
- Galton, F. (1883). *Inquiries into human faculty and its development*. Macmillan.
- Gardner, H. (1982). *Art, mind, and brain: A cognitive approach to creativity*. Basic Books.
- Geist, E. (2014). Using tablet computers with toddlers and young preschoolers. *Young Child*. 69, 58–62.

- Geist, E. A. (2012). A qualitative examination of two year-olds interaction with tablet based interactive technology. *Journal of Instructional Psychology*, 39(1).
- Geist, E. A., & Gibson, M. (2000). The effect of network and public television programs on four and five year olds ability to attend to educational tasks. *Journal of Instructional Psychology*, 27(4), 250.
- Gentili, R., Cahouet, V., Ballay, Y., & Papaxanthis, C. (2004). Inertial properties of the arm are accurately predicted during motor imagery. *Behavioural brain research*, 155(2), 231-239.
- Georgopoulos, Apostolos P. "Neural aspects of cognitive motor control." *Current opinion in neurobiology* 10.2 (2000): 238-241.
- Georgsdottir, A. S., Ameel, E., & Lubart, T. I. (2002). Cognitive flexibility and logical reasoning in school aged children. In *XVIIth Biennial Meeting of the International Society for the Study of Behavioural Development (ISSBD)*, Ottawa, Canada.
- Gerbner, G., Kamalipour, Y. R., & Rampal, K. R. (2001). Drugs in television, movies, and music videos. *Media, Sex, Violence, and Drugs in the Global Village*. Lanham: Rowman and Littlefield Publishers, 69-75.
- Gerth, S., Klassert, A., Dolk, T., Fliesser, M., Fischer, M. H., Nottbusch, G., & Festman, J. (2016). Is handwriting performance affected by the writing surface? Comparing preschoolers', second graders', and adults' writing performance on a tablet vs. Paper. *Frontiers in psychology*, 7, 1308.
- Getzels, J. W., & Jackson, P. W. (1962). Creativity and intelligence: Explorations with gifted students.
- Glantz, S. A., et al. "Smoking in top-grossing movies-United States, 1991-2009." *Morbidity and Mortality Weekly Report* 59.32 (2010): 1014-1017.
- Glăveanu, V. P. (2014). The psychology of creativity: A critical reading. *Creativity. Theories—Research—Applications*, 1(1), 10-32.
- Glenberg, A. M. (2010). Embodiment as a unifying perspective for psychology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 1(4), 586-596. <https://doi.org/10.1002/wcs.55>
- Glenberg, A. M. (2011). How reading comprehension is embodied and why that matters. *International Electronic Journal of Elementary Education*, 4(1), 5-18.
- Glenberg, A. M., Brown, M., & Levin, J. R. (2007). Enhancing comprehension in small reading groups using a manipulation strategy. *Contemporary Educational Psychology*, 32(3), 389-399.
- Glenberg, A. M., Gutierrez, T., Levin, J. R., Japuntich, S., & Kaschak, M. P. (2004). Activity and imagined activity can enhance young children's reading comprehension. *Journal of educational psychology*, 96(3), 424.
- Goble, D. J., Lewis, C. A., Hurvitz, E. A., & Brown, S. H. (2005). Development of upper limb proprioceptive accuracy in children and adolescents. *Human movement science*, 24(2), 155-170.
- Gonçalves, F., Cabral, D., Campos, P., & Schöning, J. (2017, September). I smell creativity: exploring the effects of olfactory and auditory cues to support creative writing tasks. In *IFIP Conference on Human-Computer Interaction* (pp. 165-183). Springer, Cham.

- Gonen-Yaacovi, G., De Souza, L. C., Levy, R., Urbanski, M., Josse, G., & Volle, E. (2013). Rostral and caudal prefrontal contribution to creativity: a meta-analysis of functional imaging data. *Frontiers in human neuroscience*, 7, 465.
- Goodenough, F. L. (1926). *Measurement of intelligence by drawings*. Harcourt, Brace & World, New York (1926)
- Goodwin, G. M., McCloskey, D. I., & Matthews, P. B. C. (1972). The contribution of muscle afferents to kinaesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralysing joint afferents. *Brain*, 95(4), 705-748.
- Gori, M., Del Viva, M., Sandini, G., & Burr, D. C. (2008). Young children do not integrate visual and haptic form information. *Current Biology*, 18(9), 694-698.
- Gough, H. G. (1961). A personality sketch of the creative research scientist. In *5th Annual Conference on Personnel and Industrial Relations Research, UCLA, Los Angeles, CA*.
- Gough, H. G. (1979). A creative personality scale for the adjective check list. *Journal of personality and social psychology*, 37(8), 1398.
- Grafton, S. T., & Hamilton, A. F. D. C. (2007). Evidence for a distributed hierarchy of action representation in the brain. *Human movement science*, 26(4), 590-616.
- Gralewski, J., Lebuda, I., Gajda, A., Jankowska, D. M., & Wiśniewska, E. (2016). Slumps and jumps: Another look at developmental changes in creative abilities. *Creativity. Theories—Research—Applications*, 3(1), 152-177.
- Grasso, R., Bianchi, L., & Lacquaniti, F. (1998). Motor patterns for human gait: backward versus forward locomotion. *Journal of neurophysiology*, 80(4), 1868-1885.
- Greenfield, S. (2015). *Mind change: How digital technologies are leaving their mark on our brains*. Random House.
- Greig, P. (2013). *L'enfant et son dessin*. Erès.
- Griffith, A. (2021). Embodied creativity in the fine and performing arts. *Journal of Creativity*, 31, 100010.
- Griffiths, M. (2003). The therapeutic use of videogames in childhood and adolescence. *Clinical child psychology and psychiatry*, 8(4), 547-554.
- Gross, H. M., Heinze, A., Seiler, T., & Stephan, V. (1999). Generative character of perception: A neural architecture for sensorimotor anticipation. *Neural Networks*, 12(7-8), 1101-1129.
- Grube, J. W., & Waiters, E. (2005). Alcohol in the media: content and effects on drinking beliefs and behaviors among youth. *Adolescent medicine clinics*, 16(2), 327.
- Grush, R. (1997). The architecture of representation. *Philosophical Psychology*, 10(1), 5-23.
- Grush, R. (2004). The emulation theory of representation: Motor control, imagery, and perception. *Behavioral and brain sciences*, 27(3), 377.

- Guilbert, J., Alamargot, D., & Morin, M. F. (2019). Handwriting on a tablet screen: Role of visual and proprioceptive feedback in the control of movement by children and adults. *Human movement science*, 65, 30-41.
- Guilbert, J., Fernandez, J., Molina, M., Morin, M. F., & Alamargot, D. (2021). Imagining handwriting movements in a usual or unusual position: effect of posture congruency on visual and kinesthetic motor imagery. *Psychological Research*, 85(6), 2237-2247.
- Guilbert, J., Jouen, F., & Molina, M. (2018). Motor imagery development and proprioceptive integration: Which sensory reweighting during childhood?. *Journal of experimental child psychology*, 166, 621-634.
- Guilbert, J., Jouen, F., Lehalle, H., & Molina, M. (2013). Imagerie motrice interne et simulation de l'action chez l'enfant. *L'Annee psychologique*, 113(3), 459-488.
- Guilbert, J., Molina, M., & Jouen, F. (2016). Rôle des afférences proprioceptives dans le développement de l'imagerie motrice chez l'enfant. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 70(4), 343.
- Guilé, J. M., & Cohen, D. (2010). Les perturbations de l'empathie sont au cœur des troubles des conduites de l'enfant et de l'adolescent. *Neuropsychiatrie de l'enfance et de l'adolescence*, 58(4), 241-247.
- Guilford, J. P. (1950). Creativity. *American Psychologist*, 5, 444-454.
- Guilford, J. P. (1956). The structure of intellect. *Psychological bulletin*, 53(4), 267. <https://doi.org/10.1037/h0040755>
- Guilford, J. P. (1967). Creativity: Yesterday, today and tomorrow. *The Journal of Creative Behavior*, 1(1), 3-14. <https://doi.org/10.1002/j.2162-6057.1967.tb00002.x>
- Guilford, J. P. (1968). Intelligence Has Three Facets: There are numerous intellectual abilities, but they fall neatly into a rational system. *Science*, 160(3828), 615-620.
- Guillot, A., Di Rienzo, F., MacIntyre, T., Moran, A., & Collet, C. (2012). Imagining is not doing but involves specific motor commands: a review of experimental data related to motor inhibition. *Frontiers in human neuroscience*, 6, 247.
- Haggard, P. (2005). Conscious intention and motor cognition. *Trends in cognitive sciences*, 9(6), 290-295.
- Hammershøj, L. G. (2021). Creativity in children as play and humour: Indicators of affective processes of creativity. *Thinking Skills and Creativity*, 39, 100784
- Hancox, R. J., Milne, B. J., & Poulton, R. (2005). Association of television viewing during childhood with poor educational achievement. *Archives of pediatrics & adolescent medicine*, 159(7), 614-618.
- Hancox, R. J., & Poulton, R. (2006). Watching television is associated with childhood obesity: but is it clinically important?. *International Journal of obesity*, 30(1), 171-175.
- Harlé, B., & Desmurget, M. (2012). Effets de l'exposition chronique aux écrans sur le développement cognitif de l'enfant. *Archives de pédiatrie*, 19(7), 772-776.

- Harrington, D. M., Block, J., & Block, J. H. (1983). Predicting creativity in preadolescence from divergent thinking in early childhood. *Journal of personality and social psychology*, 45(3), 609.
- Harris, J. L., Bargh, J. A., & Brownell, K. D. (2009). Priming effects of television food advertising on eating behavior. *Health psychology*, 28(4), 404.
- Harris, A., & De Bruin, L. R. (2018). Secondary school creativity, teacher practice and STEAM education: An international study. *Journal of Educational Change*, 19(2), 153-179.
- Harris, B., Vincent, K., Thomson, P., & Toalster, R. (2006). Does every child know they matter? Pupils' views of one alternative to exclusion. *Pastoral Care in Education*, 24(2), 28-38.
- Hay, L. (1978). Accuracy of children on an open-loop pointing task. *Perceptual and Motor Skills*, 47(3_suppl), 1079-1082. <https://doi.org/10.2466/pms.1978.47.3f.1079>
- Hay, L. (1979). Spatial-temporal analysis of movements in children: motor programs versus feedback in the development of reaching. *Journal of Motor Behavior*, 11(3), 189-200. <https://doi.org/10.1080/00222895.1979.10735187>
- Hay, L., Bard, C., Ferrel, C., Olivier, I., & Fleury, M. (2005). Role of proprioceptive information in movement programming and control in 5 to 11-year old children. *Human Movement Science*, 24(2), 139-154.
- Haydon, T., Hawkins, R., Denune, H., Kimener, L., McCoy, D., & Basham, J. (2012). A comparison of iPads and worksheets on math skills of high school students with emotional disturbance. *Behavioral Disorders*, 37(4), 232-243.
- Hennessey, B. A., Amabile, T. M., & Martinage, M. (1989). Immunizing children against the negative effects of reward. *Contemporary educational psychology*, 14(3), 212-227.
- Henriksen, L., Feighery, E. C., Schleicher, N. C., & Fortmann, S. P. (2008). Receptivity to alcohol marketing predicts initiation of alcohol use. *Journal of Adolescent Health*, 42(1), 28-35.
- Hesslow, G. (2002). Conscious thought as simulation of behaviour and perception. *Trends in cognitive sciences*, 6(6), 242-247.
- Hillman, M., & Marshall, J. (2009). Evaluation of digital media for emergent literacy. *Computers in the Schools*, 26(4), 256-270.
- Hirt, E. R., Levine, G. M., McDonald, H. E., Melton, R. J., & Martin, L. L. (1997). The role of mood in quantitative and qualitative aspects of performance: Single or multiple mechanisms?. *Journal of Experimental Social Psychology*, 33(6), 602-629.
- Hisler, G., Twenge, J. M., & Krizan, Z. (2020). Associations between screen time and short sleep duration among adolescents varies by media type: evidence from a cohort study. *Sleep medicine*, 66, 92-102.
- Hisrich, K., & Blanchard, J. (2009). Digital media and emergent literacy. *Computers in the Schools*, 26(4), 240-255.
- Holroyd, C. B., & Coles, M. G. (2002). The neural basis of human error processing: reinforcement learning, dopamine, and the error-related negativity. *Psychological review*, 109(4), 679.

- Holst, E., & Mittelstaedt, H. (1950). Das reafferenzprinzip. *Naturwissenschaften*, 37(20), 464-476.
- Holst-Wolf, J. M., Yeh, I., & Konczak, J. (2016). Development of proprioceptive acuity in typically developing children: normative data on forearm position sense. *Frontiers in human neuroscience*, 10, 436.
- Houk, J. C., Adams, J. L., & Barto, A. G. (1995). A Model of How the Basal Ganglia Generate and Use Neural Signals that Predict Reinforcement, Models of Information Processing in the Basal Ganglia (eds. JC Houk, JL Davis and DG Beiser), 249/270.
- Howe, N., & Strauss, W. (2000). *Millennials rising: The next great generation*. Vintage.
- Hu, F. T., Ginns, P., & Bobis, J. (2015). Getting the point: Tracing worked examples enhances learning. *Learning and Instruction*, 35, 85-93.
- Huber, B., Tarasuik, J., Antoniou, M. N., Garrett, C., Bowe, S. J., Kaufman, J., & Team, S. B. (2016). Young children's transfer of learning from a touchscreen device. *Computers in Human Behavior*, 56, 56-64.
- Huntsman, K. H. (1982). Improvisational Dramatic Activities: Key to Self-Actualization?. *Children's theatre review*, 31(2), 3-9.
- Institute of Medicine Staff, Committee on Crossing the Quality Chasm, Adaptation to Mental Health, Addictive Disorders, Institute of Medicine, Board on Health Care Services, & Institute of Medicine (US). Committee on Crossing the Quality Chasm. (2006). *Improving the quality of health care for mental and substance-use conditions: Quality chasm series*. National Academy Press.
- Isen, A. M. (1999). On the relationship between affect and creative problem solving. *Affect, creative experience, and psychological adjustment*, 3(17), 3-17.
- Isen, A. M., Daubman, K. A., & Nowicki, G. P. (1987). Positive affect facilitates creative problem solving. *Journal of personality and social psychology*, 52(6), 1122.
- Ishii, H. (2008). The tangible user interface and its evolution. *Communications of the ACM*, 51(6), 32. <https://doi.org/10.1145/1349026.1349034>
- James, W. (1880). *The feeling of effort*. The Society.
- Jastrzębska, D., & Limont, W. (2017). Not only jumps, slumps, but also mini plateau. Creative potential assessed by the test for creative thinking-drawing production. A cross-sectional study of Polish students aged from 7 to 18. *Creativity Research Journal*, 29(3), 337-342.
- Jay, D. (1991). Effect of a dance program on the creativity of preschool handicapped children. *Adapted Physical Activity Quarterly*, 8(4), 305-316.
- Jeanneret, O., Philippe, R. A., Trouilloud, D., Ohl, F., Chanal, J., Fürst, G., & Jimmy, G. (2012). Apport de mouvement et créativité chez des enfants âgés entre quatre et six ans. *Science & sports*, 27(4), 215-225.
- Jeannerod, M. (1994). The representing brain: Neural correlates of motor intention and imagery. *Behavioral and Brain sciences*, 17(2), 187-201.

- Jeannerod, M. (2001). Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition. *Neuroimage*, 14(1), S103-S109.
- Jeannerod, M. (2003a). The mechanism of self-recognition in humans. *Behavioural brain research*, 142(1-2), 1-15.
- Jeannerod, M. (2003b). Les troubles de la reconnaissance de soi: une approche neuropsychologique des symptômes positifs de la schizophrénie. *M/S: médecine sciences*, 19(5), 621-624.
- Jeannerod, M. (2006). *Motor cognition: What actions tell the self* (Vol. 42). OUP Oxford.
- Jeannerod, M. (2009). *Le cerveau volontaire*. Odile Jacob.
- Jeannerod, M., & Jacob, P. (2005). Visual cognition: a new look at the two-visual systems model. *Neuropsychologia*, 43(2), 301-312.
- Jeannerod, M., & Pacherie, E. (2004). Agency, simulation and self-identification. *Mind & language*, 19(2), 113-146.
- Jernigan, D. H. (2006). Importance of reducing youth exposure to alcohol advertising. *Archives of pediatrics & adolescent medicine*, 160(1), 100-102.
- Johnson, S. H. (2000). Thinking ahead: the case for motor imagery in prospective judgements of prehension. *Cognition*, 74(1), 33-70.
- Johnson, J. G., Cohen, P., Kasen, S., & Brook, J. S. (2007). Extensive television viewing and the development of attention and learning difficulties during adolescence. *Archives of pediatrics & adolescent medicine*, 161(5), 480-486.
- Jordan, A. B., Kramer-Golinkoff, E. K., & Strasburger, V. C. (2008). Does adolescent media use cause obesity and eating disorders. *Adolesc Med State Art Rev*, 19(3), 431-449.
- Jover, M., & Mellier, D. (2005). Connaissance du contexte et anticipation posturale chez l'enfant au cours du développement. *Année psychologique*.
- Kabali, H. K., Irigoyen, M. M., Nunez-Davis, R., Budacki, J. G., Mohanty, S. H., Leister, K. P., & Bonner, R. L. (2015). Exposure and use of mobile media devices by young children. *Pediatrics*, 136(6), 1044-1050.
- Kandel, S., & Perret, C. (2015). How do movements to produce letters become automatic during writing acquisition? Investigating the development of motor anticipation. *International Journal of Behavioral Development*, 39(2), 113-120.
- Karmiloff-Smith, A. (1990). Constraints on representational change: Evidence from children's drawing. *Cognition*, 34(1), 57-83. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(90\)90031-E](https://doi.org/10.1016/0010-0277(90)90031-E)
- Karmiloff-Smith, A. (1990). Constraints on representational change: Evidence from children's drawing. *Cognition*, 34(1), 57-83. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(90\)90031-E](https://doi.org/10.1016/0010-0277(90)90031-E)
- Karmiloff-Smith, B. A. (1994). Beyond modularity: A developmental perspective on cognitive science. *European journal of disorders of communication*, 29(1), 95-105.
- Kaufmann, G., & Vosburg, S. (1997). "Paradoxical" Mood Effects on Creative Problem-solving. *Cognition and Emotion*, 11(2), 151-170.

- Kaufmann, J. C. (1995). Les cadres sociaux du sentiment de solitude. *Sciences sociales et santé*, 13(1), 123-136.
- Kawato, M. (1999). Internal models for motor control and trajectory planning. *Current opinion in neurobiology*, 9(6), 718-727.
- Kawato, M., & Wolpert, D. (1998). Internal models for motor control. *Sensory guidance of movement*, 218, 291-307.
- Kawato, M., Furukawa, K., & Suzuki, R. (1987). A hierarchical neural-network model for control and learning of voluntary movement. *Biological cybernetics*, 57(3), 169-185.
- Kaye, L. (Ed.). (2016). *Young children in a digital age: Supporting learning and development with technology in early years*. Routledge.
- Kemp, R. (2018). Devising—embodied creativity in distributed systems. In *The Routledge Companion to Theatre, Performance, and Cognitive Science* (pp. 48-57). Routledge.
- Kenett, Y. N., Medaglia, J. D., Beaty, R. E., Chen, Q., Betzel, R. F., Thompson-Schill, S. L., & Qiu, J. (2018). Driving the brain towards creativity and intelligence: A network control theory analysis. *Neuropsychologia*, 118, 79-90.
- Kiefer, M., & Harpaintner, M. (2020). Varieties of abstract concepts and their grounding in perception or action. *Open Psychology*, 2(1), 119-137.
- Kim, K. H. (2011). The creativity crisis: The decrease in creative thinking scores on the Torrance Tests of Creative Thinking. *Creativity research journal*, 23(4), 285-295.
- Kim, S., Favotto, L., Halladay, J., Wang, L., Boyle, M. H., & Georgiades, K. (2020). Differential associations between passive and active forms of screen time and adolescent mood and anxiety disorders. *Social psychiatry and psychiatric epidemiology*, 55(11), 1469-1478.
- Kim, H. J., Park, J. H., Yoo, S., & Kim, H. (2016). Fostering creativity in tablet-based interactive classrooms. *Journal of Educational Technology & Society*, 19(3), 207-220.
- Kimmel, M., Hristova, D., & Kussmaul, K. (2018). Sources of embodied creativity: interactivity and ideation in contact improvisation. *Behavioral Sciences*, 8(6), 52.
- King, B. R., Oliveira, M. A., Contreras-Vidal, J. L., & Clark, J. E. (2012). Development of state estimation explains improvements in sensorimotor performance across childhood. *Journal of neurophysiology*, 107(11), 3040-3049.
- Kirkorian, H. L., Pempek, T. A., Murphy, L. A., Schmidt, M. E., & Anderson, D. R. (2009). The impact of background television on parent–child interaction. *Child development*, 80(5), 1350-1359.
- Kirkorian, H. L., Travers, B. G., Jiang, M. J., Choi, K., Rosengren, K. S., Pavalko, P., & Tolkin, E. (2020). Drawing across media: A cross-sectional experiment on preschoolers' drawings produced using traditional versus electronic mediums. *Developmental psychology*, 56(1), 28.
- Kleibeuker, S. W., De Dreu, C. K., & Crone, E. A. (2013). The development of creative cognition across adolescence: distinct trajectories for insight and divergent thinking. *Developmental science*, 16(1), 2-12.

- Knox, J. (2011). *Self-Agency in Psychotherapy: Attachment, Autonomy, and Intimacy (Norton Series on Interpersonal Neurobiology)*. WW Norton & Company.
- Korat, O., & Shamir, A. (2007). Electronic books versus adult readers: Effects on children's emergent literacy as a function of social class. *Journal of Computer Assisted Learning*, 23(3), 248-259.
- Kontos, P., Grigorovich, A., Kosurko, A., Bar, R. J., Herron, R. V., Menec, V. H., & Skinner, M. W. (2021). Dancing with dementia: exploring the embodied dimensions of creativity and social engagement. *The Gerontologist*, 61(5), 714-723.
- Korkman, M., Kirk, U., & Kemp, S. (2014). *NEPSY-II*. Madrid: Pearson.
- Kosslyn, S. M., Heldmeyer, K. H., & Locklear, E. P. (1977). Children's drawings as data about internal representations. *Journal of Experimental Child Psychology*, 23(2), 191-211.
- Koziol, L. F., & Lutz, J. T. (2013). From movement to thought: the development of executive function. *Applied Neuropsychology: Child*, 2(2), 104-115.
- Koziol, L. F., Budding, D. E., & Chidekel, D. (2012). From movement to thought: executive function, embodied cognition, and the cerebellum. *The Cerebellum*, 11(2), 505-525.
- Krampen, G. (2012). Cross-sequential results on creativity development in childhood within two different school systems: Divergent performances in Luxembourg versus German kindergarten and elementary school students. *Europe's Journal of Psychology*, 8(3), 423-448.
- Kranick, S. M., & Hallett, M. (2013). Neurology of volition. *Experimental brain research*, 229(3), 313-327.
- Krippner, S. (1967). The ten commandments that block creativity. *Gifted Child Quarterly*, 11(3), 144-156.
- Kristeller, P. O. (1983). Creativity" and" tradition. *Journal of the History of Ideas*, 44(1), 105-113.
- Kristensen, T. (2004). The physical context of creativity. *Creativity and innovation management*, 13(2), 89-96.
- Kronfeldner, M. E. (2010). Darwinian 'blind'hypothesis formation revisited. *Synthese*, 175(2), 193-218.
- Krotenberg, A., & Lambert, E. (2012). *Scolarité et troubles du comportement*. Champ social Editions.
- Kudlinski, C. (2015). *La souris, le stylet et l'enfant : une approche développementale des Interactions Enfant-Ordinateur*.
- Kunkel, D., Farrar, K. M., Eyal, K., Biely, E., Donnerstein, E., & Rideout, V. (2007). Sexual socialization messages on entertainment television: Comparing content trends 1997–2002. *Media Psychology*, 9(3), 595-622.
- Kuo, C. Y., & Yeh, Y. Y. (2016). Sensorimotor-conceptual integration in free walking enhances divergent thinking for young and older adults. *Frontiers in psychology*, 7, 1580.
- Lamarck, J. B. D. M. (1838). *Histoire naturelle des animaux sans vertebres, presentant les caracteres generaux et particuliers de ces animaux, leur distribution, leurs classes, leurs familles, leurs genres, et la citation des principales especes qui s'y rapportent*: 5. JB Bailliere.

- Labat, H., Ecalle, J., Baldy, R., & Magnan, A. (2014). How can low-skilled 5-year-old children benefit from multisensory training on the acquisition of the alphabetic principle?. *Learning and Individual Differences*, 29, 106-113.
- Landhuis, C. E., Poulton, R., Welch, D., & Hancox, R. J. (2007). Does childhood television viewing lead to attention problems in adolescence? Results from a prospective longitudinal study. *Pediatrics*, 120(3), 532-537.
- Lanna, L. C., & Oro, M. G. (2019). Touch gesture performed by children under 3 years old when drawing and coloring on a tablet. *International Journal of Human-Computer Studies*, 124, 1-12.
- Laszlo, J. I., & Bairstow, P. J. (1980). The measurement of kinaesthetic sensitivity in children and adults. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 22(4), 454-464.
- Laszlo, J. I., & Bairstow, P. J. (1984). Handwriting: Difficulties and possible solutions. *School Psychology International*, 5(4), 207-213. <https://doi.org/10.1177/0143034384054004>
- Laszlo, J. I., & Broderick, P. A. (1985). The perceptual-motor skill of drawing. *Visual order: The nature and development of pictorial representation*, 356-373.
- Lau, S., & Cheung, P. C. (2010). Creativity assessment: Comparability of the electronic and paper-and-pencil versions of the Wallach–Kogan Creativity Tests. *Thinking Skills and Creativity*, 5(3), 101-107.
- Laurson, K. R., Eisenmann, J. C., Welk, G. J., Wickel, E. E., Gentile, D. A., & Walsh, D. A. (2008). Combined influence of physical activity and screen time recommendations on childhood overweight. *The Journal of pediatrics*, 153(2), 209-214.
- Lebon, F., Gueugneau, N., & Papaxanthis, C. (2013). Modèles internes et imagerie motrice. *Movement & Sport Sciences-Science & Motricité*, (82), 51-61.
- Leboutet, L. (1970). La créativité. *L'année psychologique*, 70(2), 579-625.
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1987). Hand movements: A window into haptic object recognition. *Cognitive psychology*, 19(3), 342-368. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(87\)90008-9](https://doi.org/10.1016/0010-0285(87)90008-9)
- Leschziner, V., & Brett, G. (2019). Beyond two minds: Cognitive, embodied, and evaluative processes in creativity. *Social Psychology Quarterly*, 82(4), 340-366.
- Leung, A. K. Y., Kim, S., Polman, E., Ong, L. S., Qiu, L., Goncalo, J. A., & Sanchez-Burks, J. (2012). Embodied metaphors and creative “acts”. *Psychological science*, 23(5), 502-509.
- Lewontin, R. C. (1970). The units of selection. *Annual review of ecology and systematics*, 1-18.
- Li, J. (1997). Creativity in horizontal and vertical domains. *Creativity Research Journal*, 10(2-3), 107-132.
- Lim, W., & Plucker, J. A. (2001). Creativity through a lens of social responsibility: Implicit theories of creativity with Korean samples. *The Journal of Creative Behavior*, 35(2), 115-130.
- Limb, C. J., & Braun, A. R. (2008). Neural substrates of spontaneous musical performance: An fMRI study of jazz improvisation. *PLoS one*, 3(2), e1679.

- Limerick, H., Coyle, D., & Moore, J. W. (2014). The experience of agency in human-computer interactions: a review. *Frontiers in human neuroscience*, 8, 643.
- Lin, W. L., & Shih, Y. L. (2016). The developmental trends of different creative potentials in relation to children's reasoning abilities: From a cognitive theoretical perspective. *Thinking Skills and Creativity*, 22, 36-47.
- Linebarger, D. L., & Walker, D. (2005). Infants' and toddlers' television viewing and language outcomes. *American behavioral scientist*, 48(5), 624-645.
- Llinás, R. R. (2002). *I of the vortex: From neurons to self*. MIT press.
- Loisy, J. (1999). Qui sont ces enfants présentant des troubles de la conduite et du comportement ? Un éduc en ITEP. In E. Furstos (Ed.) (1999, 2006). <http://un.educ.en.itep.free.fr/les%20tcc.html>
- López-González, M., & Limb, C. J. (2012, January). Musical creativity and the brain. In *Cerebrum: the dana forum on brain science* (Vol. 2012). Dana Foundation.
- Lubart, T. I. (1990). Creativity and cross-cultural variation. *International journal of psychology*, 25(1), 39-59.
- Lubart, T. I. (1994). *Product-centered self-evaluation and the creative process* (Doctoral dissertation, Yale University).
- Lubart, T. I. (1999). Componential models. *Encyclopedia of creativity*, 1, 295-300.
- Lubart, T. I. (2003). In search of creative Intelligence. In R. J. Sternberg, J. Lautrey, & T. I. Lubart (Eds.), *Models of intelligence : International perspectives* (pp. 279-292). Washington, DC: American Psychological Association.
- Lubart, T., Besançon, M., & Barbot, B. (2011). *EPOC: évaluation du potentiel créatif*. Paris: Hogrefe.
- Lubart, T., Besançon, M., & Barbot, B. (2019). La créativité, ressource potentielle de l'enfant et l'adolescent, à évaluer, révéler et développer. *Neuropsychiatrie de l'Enfance et de l'Adolescence*, 67(3), 121-129.
- Lubart, T. I., & Georgsdottir, A. S. (2004a). Créativité, haut potentiel et talent. *Psychologie française*, 49(3), 277-291.
- Lubart, T. I., & Georgsdottir, A. (2004b). Creativity: Developmental and cross-cultural issues. In *Creativity: When east meets west* (pp. 23-54).
- Lubart, T. I., & Getz, I. (1998). The influence of heuristics on psychological science: A case study of research on creativity. *Journal for the Theory of Social Behaviour*, 28(4), 435-457.
- Lubart, T. I., & Lautrey, J. (1995, August). Relationships between creative development and cognitive development. In *Seventh European Conference on Developmental Psychology, Krakow, Poland*.
- Lubart, T.I., & Lautrey, J. (1996). *Development of creativity in 9- to 10-year old children* . Paper presented at The Growing Mind Congress, Geneva, Switzerland.
- Lubart, T. I., & Lautrey, J. (1998). Family environment and creativity. In *The XVth biennial meetings of the international society for the study of behavioral development*.

- Lubart, T., Mouchiroud, C., Tordjam, S., & Zenasni, F. (2003). *Psychologie de la créativité*. Paris: Armand Colin.
- Lubart, T., Mouchiroud, C., Tordjman, S., & Zenasni, F. (2015). *Psychologie de la créativité-2e édition*. Armand Colin.
- Łuczniak, K. (2015). Between minds and bodies: Some insights about creativity from dance improvisation. *Technoetic Arts*, 13(3), 301-308.
- Lumeng, J. C., Rahnema, S., Appugliese, D., Kaciroti, N., & Bradley, R. H. (2006). Television exposure and overweight risk in preschoolers. *Archives of pediatrics & adolescent medicine*, 160(4), 417-422.
- Luquet, G. H. (1927). *Le dessin enfantin*. (Bibliothèque de psychologie de l'enfant et de pédagogie.).
- MacKinnon, Donald W. "The nature and nurture of creative talent." *American psychologist* 17.7 (1962): 484. <https://doi.org/10.1037/h0046541>
- Maduro, R. (1976). *Artistic creativity in a Brahmin painter community*. Center for South and Southeast Asia Studies, University of California.
- Malinin, L. H. (2016). Creative practices embodied, embedded, and enacted in architectural settings: toward an ecological model of creativity. *Frontiers in psychology*, 6, 1978.
- Mallau, S., Vaugoyeau, M., & Assaiante, C. (2010). Postural strategies and sensory integration: no turning point between childhood and adolescence. *PloS one*, 5(9), e13078.
- Mar'i, S. K., & Karayanni, M. (1983). Creativity in Arab culture: two decades of research. *The Journal of Creative Behavior*.
- Marsh, J., Lahmar, J., Plowman, L., Yamada-Rice, D., Bishop, J., & Scott, F. (2021). Under threes' play with tablets. *Journal of Early Childhood Research*, 19(3), 283-297.
- Marsh, J., Plowman, L., Yamada-Rice, D., Bishop, J., Lahmar, J., & Scott, F. (2018). Play and creativity in young children's use of apps. *British Journal of Educational Technology*, 49(5), 870-882.
- Marsh, J., Plowman, L., Yamada-Rice, D., Bishop, J., Lahmar, J., Scott, F., ... & Winter, P. (2015). Exploring Play and Creativity in Pre-schooler's use of apps: Final Project Report.
- Martel, M., Fournieret, P., Finos, L., Schmitz, C., & Catherine Roy, A. (2020). Highs and lows in motor control development. *Journal of Motor Behavior*, 52(4), 404-417.
- Martindale, C. (1990). *The clockwork muse: The predictability of artistic change*. Basic Books.
- Martindale, C. (1999). Biological bases of creativity. *Handbook of creativity*, 2, 137-152.
- Martin-Denham, S. (2020). A review of school exclusion on the mental health, well-being of children and young people in the City of Sunderland.
- Maslow, A. (1968). Some educational implications of the humanistic psychologies. *Harvard Educational Review*, 38(4), 685-696.
- Massion, J. (1992). Movement, posture and equilibrium: interaction and coordination. *Progress in neurobiology*, 38(1), 35-56.

- Matheson, H. E., & Barsalou, L. W. (2018). Embodiment and grounding in cognitive neuroscience. *Stevens' handbook of experimental psychology and cognitive neuroscience*, 3, 1-27.
- Matheson, H. E., & Kenett, Y. N. (2020). The role of the motor system in generating creative thoughts. *NeuroImage*, 213, 116697.
- Matheson, H. E., & Kenett, Y. N. (2021). A novel coding scheme for assessing responses in divergent thinking: An embodied approach. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*.
- Matheson, H. E., Buxbaum, L. J., & Thompson-Schill, S. L. (2017). Differential tuning of ventral and dorsal streams during the generation of common and uncommon tool uses. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 29(11), 1791-1802.
- Matthews, J., & Seow, P. (2007). Electronic paint: Understanding children's representation through their interactions with digital paint. *International Journal of Art & Design Education*, 26(3), 251-263.
- Mayer, R. E. (2005). Cognitive theory of multimedia learning. *The Cambridge handbook of multimedia learning*, 41, 31-48.
- Mayer, R. E., & Moreno, R. (1998). A split-attention effect in multimedia learning: Evidence for dual processing systems in working memory. *Journal of Educational Psychology*, 90, 312–320
- Mayer, R. E., & Moreno, R. (2003). Nine ways to reduce cognitive load in multimedia learning. *Educational psychologist*, 38(1), 43-52.
- McCrae, R. R. (1987). Creativity, divergent thinking, and openness to experience. *Journal of personality and social psychology*, 52(6), 1258.
- McKenna, C. (2012). There's an app for that: How two elementary classrooms used iPads to enhance student learning and achievement. *Education*, 2(5), 136-142.
- McMahon, D., & Walker, Z. (2014). Universal design for learning features and tools on iPads and iPhones. *Journal of Special Education Technology*, 29(2), 39–49
- McManis, L. D., & Gunnewig, S. B. (2012). Finding the education in educational technology with early learners. *Young Children*, 67(3), 14-24.
- Mednick, S. (1962). The associative basis of the creative process. *Psychological review*, 69(3), 220.
- Mehta, B., & Schaal, S. (2002). Forward models in visuomotor control. *Journal of Neurophysiology*, 88(2), 942-953.
- Méndez Martínez, E., & Fernandez-Rio, J. (2021). Effects of a Theatrical Improvisation programme on students' motor creativity. *Research in Drama Education: The Journal of Applied Theatre and Performance*, 26(2), 268-282.
- Merchant, G. (2015). Keep taking the tablets: iPads, story apps and early literacy. *Australian Journal of Language and Literacy*, The, 38(1), 3-11.
- Merikangas, K. R., Nakamura, E. F., & Kessler, R. C. (2009). Prevalence rates of anxiety disorders in recent community surveys. *Dialogues Clinical Neuroscience*, 11(1), 7-20.

- Meulenbroek, R. G., & Van Galen, G. P. (1988). The acquisition of skilled handwriting: Discontinuous trends in kinematic variables. In *Advances in psychology* (Vol. 55, pp. 273-281). North-Holland.
- Miall, R. C., & Wolpert, D. M. (1996). Forward models for physiological motor control. *Neural networks*, 9(8), 1265-1279.
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, 24, 167–202. doi: 10.1146/annurev.neuro.24.1.167
- Millett, C., & Glantz, S. A. (2010). Assigning an ‘18’ rating to movies with tobacco imagery is essential to reduce youth smoking. *Thorax*, 65(5), 377-378.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “frontal lobe” tasks: A latent variable analysis. *Cognitive psychology*, 41(1), 49-100.
- Molina M., Tijus C., & Jouen F. (2008). The emergence of motor imagery in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 99, 196-209. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2007.10.001>
- Moore, J. W., & Fletcher, P. C. (2012). Sense of agency in health and disease: a review of cue integration approaches. *Consciousness and cognition*, 21(1), 59-68.
- Moore, J. W., Wegner, D. M., & Haggard, P. (2009). Modulating the sense of agency with external cues. *Consciousness and cognition*, 18(4), 1056-1064.
- Moreno, R., & Mayer, R. E. (1999). Cognitive principles of multimedia learning: The role of modality and contiguity. *Journal of Educational Psychology*, 91, 358–368.
- Moreno, R., Mayer, R. E., Spires, H. A., & Lester, J. C. (2001). The case for social agency in computer-based multimedia learning: Do students learn more deeply when they interact with animated pedagogical agents? *Cognition and Instruction*, 19, 177–214.
- Morris, N. M., & Udry, J. R. (1980). Validation of a self-administered instrument to assess stage of adolescent development. *Journal of youth and adolescence*, 9(3), 271-280.
- Moser, A., Zimmermann, L., Dickerson, K., Grenell, A., Barr, R., & Gerhardstein, P. (2015). They can interact, but can they learn? Toddlers’ transfer learning from touchscreens and television. *Journal of experimental child psychology*, 137, 137-155.
- Mottweiler, C. M., & Taylor, M. (2014). Elaborated role play and creativity in preschool age children. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the arts*, 8(3), 277.
- Mouchiroud, C., & Lubart, T. I. (2001). Children's original thinking : An empirical examination of alternative measures derived from divergent thinking tasks. *Journal of Genetic Psychology*, 162(4), 382-401. <https://doi.org/10.1080/00221320109597491>
- Moulton, S. T., & Kosslyn, S. M. (2009). Imagining predictions: Mental imagery as mental emulation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364, 1273–1280. doi: 10.1098/rstb.2008.0314
- Mousavi, S., Low, R., & Sweller, J. (1995). Reducing cognitive load by mixing auditory and visual presentation modes. *Journal of Educational Psychology*, 87, 319–334

- Mumford, M. D. (1999). Blind variation or selective variation? Evaluative elements in creative thought. *Psychological Inquiry*, 10, 344-348.
- Mumford, M. D., & Gustafson, S. B. (1988). Creativity syndrome: Integration, application, and innovation. *Psychological bulletin*, 103(1), 27.
- Mumford, M. D., & Gustafson, S. B. (2007). Creative thought: Cognition and problem solving in a dynamic system. *Creativity research handbook*, 2, 33-77.
- Munn, P., & Lloyd, G. (2005). Exclusion and excluded pupils. *British Educational Research Journal*, 31(2), 205-221.
- Murali, S., & Händel, B. (2022). Motor restrictions impair divergent thinking during walking and during sitting. *Psychological research*, 1-14.
- National Association for the Education of Young Children (NAEYC). (2012). 2010 Standards for initial & advanced early childhood professional preparation programs. Washington, DC: Author.
https://www.naeyc.org/caep/files/caep/NAEYC%20Initial%20and%20Advanced%20Standards%2010_2012.pdf
- Neumann, M. M. (2016). Young children's use of touch screen tablets for writing and reading at home: Relationships with emergent literacy. *Computers & Education*, 97, 61-68.
- Neumann, M. M. (2018). Using tablets and apps to enhance emergent literacy skills in young children. *Early Childhood Research Quarterly*, 42, 239-246.
- Neumann, M. M., & Neumann, D. L. (2014). Touch screen tablets and emergent literacy. *Early Childhood Education Journal*, 42(4), 231-239.
- Neumann, M. M., & Neumann, D. L. (2017). The use of touch-screen tablets at home and pre-school to foster emergent literacy. *Journal of Early Childhood Literacy*, 17(2), 203-220.
- Nikken, P., & Schols, M. "How and why parents guide the media use of young children." *Journal of child and family studies* 24.11 (2015): 3423-3435.
- Nikolaeva, E. I., Novikova, A. V., & Vergunov, E. G. (2018). The correlation between intelligence, creativity and the parameters of sensorimotor integration in children of different ages. *Psychology in Russia: State of the art*, 11(2), 68-80.
- Niu, W., & Sternberg, R. (2001). Cultural influences on artistic creativity and its evaluation. *International journal of psychology*, 36(4), 225-241.
- Niu, W., & Sternberg, R. (2002). Contemporary studies on the concept of creativity: The East and the West. *The Journal of Creative Behavior*, 36(4), 269-288.
- Nock, M. K., Kazdin, A. E., Hiripi, E., & Kessler, R. C. (2007). Lifetime prevalence, correlates, and persistence of oppositional defiant disorder: results from the National Comorbidity Survey Replication. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 48(7), 703-713.
- O'Shea, H., & Moran, A. (2017). Does motor simulation theory explain the cognitive mechanisms underlying motor imagery? A critical review. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11, 72.
- Ochse, R. (1990). *Before the gates of excellence: The determinants of creative genius*. CUP Archive.

- Ofcom. (2014). Children and Parents: Media Use and Attitudes Report.
- Olson, D. R., & Bialystok, E. (1983). A theory of spatial representation. *Spatial cognition: The structure and development of mental representations of spatial relations*, 233-259.
- Olson, D. R., & Bialystok, E. (2014). *Spatial cognition: The structure and development of mental representations of spatial relations*. Psychology Press.
- O'malley, P., Lewis, M. E. B., & Donehower, C. (2013). Using tablet computers as instructional tools to increase task completion by students with autism. *Online submission*.
- Oppezzo, M., & Schwartz, D. L. (2014). Give your ideas some legs: the positive effect of walking on creative thinking. *Journal of experimental psychology: learning, memory, and cognition*, 40(4), 1142.
- Owens, J., Maxim, R., McGuinn, M., Nobile, C., Msall, M., & Alario, A. (1999). Television-viewing habits and sleep disturbance in school children. *Pediatrics*, 104(3), e27-e27.
- Pagona, B., & Costas, M. (2008). The development of motor creativity in elementary school children and its retention. *Creativity Research Journal*, 20(1), 72-80.
- Palmiero, M., Giulianella, L., Guariglia, P., Boccia, M., D'Amico, S., & Piccardi, L. (2019). The dancers' visuospatial body map explains their enhanced divergence in the production of motor forms: evidence in the early development. *Frontiers in psychology*, 10, 768.
- Palmiero, M., & Piccardi, L. (2020). Is visual creativity embodied? Thinking aloud while performing the creative mental synthesis task. *Brain Sciences*, 10(7), 455.
- Palmis, S., Danna, J., Velay, J. L., & Longcamp, M. (2017). Motor control of handwriting in the developing brain: A review. *Cognitive Neuropsychology*, 34(3-4), 187-204.
- Papaxanthis, C., Pozzo, T., Skoura, X., & Schieppati, M. (2002b). Does order and timing in performance of imagined and actual movements affect the motor imagery process? The duration of walking and writing task. *Behavioural brain research*, 134(1-2), 209-215.
- Papaxanthis, C., Schieppati, M., Gentili, R., & Pozzo, T. (2002a). Imagined and actual arm movements have similar durations when performed under different conditions of direction and mass. *Experimental brain research*, 143(4), 447-452.
- Patchan, M. M., & Puranik, C. S. (2016). Using tablet computers to teach preschool children to write letters: Exploring the impact of extrinsic and intrinsic feedback. *Computers & Education*, 102, 128-137. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.07.007>
- Pearson, J., Naselaris, T., Holmes, E. A., & Kosslyn, S. M. (2015). Mental imagery: functional mechanisms and clinical applications. *Trends in cognitive sciences*, 19(10), 590-602.
- Pempek, T. A., Kirkorian, H. L., & Anderson, D. R. (2014). The effects of background television on the quantity and quality of child-directed speech by parents. *Journal of Children and Media*, 8(3), 211-222.
- Perkins, D. N. (1981). *The mind's best work*. Harvard University Press.

- Pezzulo, G. (2011). Grounding procedural and declarative knowledge in sensorimotor anticipation. *Mind & Language*, 26(1), 78-114. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0017.2010.01411.x>
- Pezzulo, G., Butz, M. V., Castelfranchi, C., & Falcone, R. (Eds.). (2008). *The challenge of anticipation: A unifying framework for the analysis and design of artificial cognitive systems* (Vol. 5225). Springer.
- Pezzulo, G., & Castelfranchi, C. (2007). The symbol detachment problem. *Cognitive processing*, 8(2), 115-131.
- Pezzulo, G., & Castelfranchi, C. (2009). Thinking as the control of imagination: a conceptual framework for goal-directed systems. *Psychological Research PRPF*, 73(4), 559-577.
- Pezzulo, G., & Cisek, P. (2016). Navigating the affordance landscape: feedback control as a process model of behavior and cognition. *Trends in cognitive sciences*, 20(6), 414-424.
- Picard, D., & Boulhais, M. (2011). Sex differences in expressive drawing. *Personality and Individual Differences*, 51(7), 850-855.
- Picard, D., & Gauthier, C. (2012). The development of expressive drawing abilities during childhood and into adolescence. *Child Development Research*, 2012.
- Picard, D., Martin, P., & Tsao, R. (2014). iPads at school? A quantitative comparison of elementary schoolchildren's pen-on-paper versus finger-on-screen drawing skills. *Journal of Educational Computing Research*, 50(2), 203-212.
- Picherot, G., Cheymol, J., Assathiany, R., Barthet-Derrien, M. S., Bidet-Emeriau, M., Blocquaux, S., ... & Foucaud, P. (2018). L'enfant et les écrans: les recommandations du Groupe de pédiatrie générale (Société française de pédiatrie) à destination des pédiatres et des familles. *Perfectionnement en Pédiatrie*, 1(1), 19-24.
- Pinho, A. L., de Manzano, Ö., Fransson, P., Eriksson, H., & Ullén, F. (2014). Connecting to create: expertise in musical improvisation is associated with increased functional connectivity between premotor and prefrontal areas. *Journal of Neuroscience*, 34(18), 6156-6163.
- Piotrowski, J. T., & Meester, L. (2018). Can apps support creativity in middle childhood? *Computers in Human Behavior*, 85, 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.03.030>
- Plowman, L., McPake, J., & Stephen, C. (2012). What is the role of digital media in early education?. *Contemporary debates in childhood education and development*, 93.
- Plummer, T. (2004). Flaked stones and old bones: biological and cultural evolution at the dawn of technology. *American journal of physical anthropology*, 125(S39), 118-164.
- Popper, K. R. (1972). *Objective knowledge* (Vol. 360). Oxford: Oxford University Press.
- Popper, K. R. (1974). Campbell on the evolutionary theory of knowledge. In P. A. Schilpp (Ed.), *The philosophy of Karl Popper* (pp. 1059– 1065). LaSalle: Open Court.
- Popper, K. R. (1975). Conhecimento objetivo: uma abordagem evolucionária. Livraria Itatiaia.
- Popper, K. R. (1984). Evolutionary Epistemology. In J. W. Pollard (Ed.), *Evolutionary theory: Paths into the future* (pp. 239–255). New York: Wiley.

- Powers, K. L., Brooks, P. J., Aldrich, N. J., Palladino, M. A., & Alfieri, L. (2013). Effects of video-game play on information processing: A meta-analytic investigation. *Psychonomic bulletin & review*, 20(6), 1055-1079.
- Prablanc, C., Pélisson, D., & Goodale, M. A. (1986). Visual control of reaching movements without vision of the limb. *Experimental Brain Research*, 62(2), 293-302.
- Prensky, M. (2001). Fun, play and games: What makes games engaging. *Digital game-based learning*, 5(1), 5-31.
- Price, S., Jewitt, C., & Crescenzi, L. (2015). The role of iPads in pre-school children's mark making development. *Computers & Education*, 87, 131-141.
- Pringle, J. W. S. (1951). On the parallel between learning and evolution. *Behaviour*, 3(1), 174-214.
- Prinz, W. (1994). Motor images are action plans. *Behavioral and Brain Sciences*, 17(2), 218-218.
- Radesky, J. S., Schumacher, J., & Zuckerman, B. (2015). Mobile and interactive media use by young children: the good, the bad, and the unknown. *Pediatrics*, 135(1), 1-3.
- Raina, T. N. (1980). Sex differences in creativity in India: A second look. *Journal of Creative Behavior*, 14, 218.
- Rao, R. P., & Ballard, D. H. (1999). Predictive coding in the visual cortex: A functional interpretation of some extra-classical receptive-field effects. *Nature Neuroscience*, 2, 79-87. doi:10.1038/4580
- Read, D. W. (2006). Cultural evolution is not equivalent to Darwinian evolution. *Behavioral and Brain Sciences*, 29, 361. doi:10.1017/ S0140525X0638908X
- Reber, A. S. (1996). *Implicit learning and tacit knowledge: An essay on the cognitive unconscious*. Oxford: Oxford University Press
- Reschly, A. L., & Christenson, S. L. (2006). Prediction of dropout among students with mild disabilities: A case for the inclusion of student engagement variables. *Remedial and special education*, 27(5), 276-292.
- Rescorla, R. A., & Wagner, A. R. (1972). A theory of Pavlovian conditioning: Variations in the effectiveness of reinforcement and nonreinforcement. In A. H. Black & W. F. Prokasy (Eds.), *Classical Conditioning II: Current research and theory* (pp. 64- 99). New York: Appleton Century Crofts.
- Reychav, I., & Wu, D. (2015). Mobile collaborative learning: The role of individual learning in groups through text and video content delivery in tablets. *Computers in Human Behavior*, 50, 520-534.
- Ribot, T. (1900). *Essai sur l'imagination créatrice*. F. Alcan.
- Richerson, P. J., & Boyd, R. (2005). *Not by genes alone: How culture transformed human evolution*. Chicago: University of Chicago Press
- Ridderinkhof, K. R., Forstmann, B. U., Wylie, S. A., Burle, B., & van den Wildenberg, W. P. (2011). Neurocognitive mechanisms of action control: resisting the call of the Sirens. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 2(2), 174-192.

- Ridderinkhof, K. R., van den Wildenberg, W. P., & Brass, M. (2014). “Don’ t” versus “Won’ t”: Principles, mechanisms, and intention in action inhibition. *Neuropsychologia*, 65, 255-262.
- Rideout, V. (2016). Measuring time spent with media: The Common Sense census of media use by US 8-to 18-year-olds. *Journal of Children and Media*, 10(1), 138-144.
- Rideout, V. (2017). The Common Sense census: Media use by kids age zero to eight. *San Francisco, CA: Common Sense Media*, 263-283.
- Rideout, V. J., Foehr, U. G., & Roberts, D. F. (2010). Generation M 2: Media in the Lives of 8-to 18-Year-Olds. *Henry J. Kaiser Family Foundation*.
- Rideout, V., Saphir, M., Pai, S., & Rudd, A. (2013). Zero to eight: children's media use in America 2013. *Common Sense Media*. 2013.
- Rideout, V., Saphir, M., Pai, S., Rudd, A., & Pritchett, J. (2013). Zero to eight: Children’s media use in America in 2013. *Common Sense Media*, 1, 40.
- Rieben, L. (1978). *Intelligence et pensée créative*. FeniXX.
- Risser, S. D. (2013). Relational aggression and academic performance in elementary school. *Psychology in the Schools*, 50(1), 13-26.
- Rivenbark, J. G., Odgers, C. L., Caspi, A., Harrington, H., Hogan, S., Houts, R. M., ... & Moffitt, T. E. (2018). The high societal costs of childhood conduct problems: evidence from administrative records up to age 38 in a longitudinal birth cohort. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 59(6), 703-710.
- Rizzi, V., Pigeon, C., Rony, F., & Fort-Talabard, A. (2020). Designing a creative storytelling workshop to build self-confidence and trust among adolescents. *Thinking skills and creativity*, 38, 100704.
- Robinson, T. N. (1999). Reducing children's television viewing to prevent obesity: a randomized controlled trial. *Jama*, 282(16), 1561-1567.
- Roe, A. (1952). *The making of a scientist*. New York: Dodd Mead.
- Rogers, C. R. (1954). Toward a theory of creativity. *ETC: A review of general semantics*, 249-260.
- Rogol, A. D., Roemmich, J. N., & Clark, P. A. (2002). Growth at puberty. *Journal of adolescent health*, 31(6), 192-200.
- Roll, J. P., Roll, R., & Velay, J. L. (1991). Proprioception as a link between body space and extra-personal space. *Brain and space*, 112-132.
- Roskos, K., Burstein, K., Shang, Y., & Gray, E. (2014). Young Children’s Engagement With E-Books at School: Does Device Matter? *SAGE Open*. <https://doi.org/10.1177/2158244013517244>
- Roskos, K., Burstein, K., Shang, Y., & Gray, E. (2014). Young children’s engagement with e-books at school: Does device matter?. *SAGE Open*, 4(1), 1-9.
- Rossmann, J. (1931). The motives of inventors. *The Quarterly Journal of Economics*, 45(3), 522-528.
- Rothenberg, A. (1988). Creativity and the homospatial process: Experimental studies. *Psychiatric Clinics of North America*, 11(3), 443-459.

- Rouquette, M. L. (2007). *La créativité: «Que sais-je?» n° 1528*. Que sais-je.
- Rudowicz, E., & Yue, X. D. (2000). Concepts of creativity: Similarities and differences among mainland, Hong Kong and Taiwanese Chinese. *The Journal of Creative Behavior*, 34(3), 175-192.
- Runco, M. A. (1991). The evaluative, valuative, and divergent thinking of children. *The Journal of Creative Behavior*, 25(4), 311-319.
- Runco, M. A. (1991). The evaluative, valuative, and divergent thinking of children. *The Journal of Creative Behavior*, 25(4), 311-319.
- Runco, M. A. (1998). Suicide and creativity: The case of Sylvia Plath. *Death studies*, 22(7), 637-654.
- Runco, M. A., & Albert, R. S. (1985). The reliability and validity of ideational originality in the divergent thinking of academically gifted and nongifted children. *Educational and Psychological Measurement*, 45(3), 483-501.
- Runco, M. A., & Charles, R. E. (1997). Developmental trends in creative potential and creative performance. *The creativity research handbook*, 1, 115-152.
- Said-Metwaly, S., Fernández-Castilla, B., Kyndt, E., Van den Noortgate, W., & Barbot, B. (2021). Does the fourth-grade slump in creativity actually exist? A meta-analysis of the development of divergent thinking in school-age children and adolescents. *Educational Psychology Review*, 33(1), 275-298.
- Sak, U., & Maker, C. J. (2006). Developmental variation in children's creative mathematical thinking as a function of schooling, age, and knowledge. *Creativity research journal*, 18(3), 279-291.
- Sakr, M. (2018). Multimodal participation frameworks during young children's collaborative drawing on paper and on the iPad. *Thinking Skills and Creativity*, 29, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2018.05.004>
- Sakr, M. (2019). Young children drawing together on the iPad versus paper: How collaborative creativity is shaped by different semiotic resources. *International Journal of Education & the Arts*, 20(20).
- Sandvik, M., Smørdal, O., & Østerud, S. (2012). Exploring iPads in practitioners' repertoires for language learning and literacy practices in kindergarten. *Nordic Journal of Digital Literacy*, 7(03), 204-221.
- Sarafoleanu, C., Mella, C., Georgescu, M., & Perederco, C. (2009). The importance of the olfactory sense in the human behavior and evolution. *Journal of Medicine and life*, 2(2), 196.
- Sargent, J. D., Beach, M. L., Adachi-Mejia, A. M., Gibson, J. J., Titus-Ernstoff, L. T., Carusi, C. P., ... & Dalton, M. A. (2005). Exposure to movie smoking: its relation to smoking initiation among US adolescents. *Pediatrics*, 116(5), 1183-1191.
- Saunders, T. J., Chaput, J. P., & Tremblay, M. S. (2014). Sedentary behaviour as an emerging risk factor for cardiometabolic diseases in children and youth. *Canadian journal of diabetes*, 38(1), 53-61.
- Sawyer, K. (2011). The cognitive neuroscience of creativity: A critical review. *Creativity Research Journal*, 23, 137-154

- Sayed, E. M., & Mohamed, A. H. H. (2013). Gender differences in divergent thinking: use of the test of creative thinking-drawing production on an Egyptian sample. *Creativity Research Journal*, 25(2), 222-227.
- Schacter, D. L., & Buckner, R. L. (1998). On the relationship among priming, conscious recollection, and intentional retrieval: Evidence from neuroimaging research. *Neurobiology of Learning and Memory*, 70, 284–303.
- Schooler, J. W., & Dougal, S. (1999). Why creativity is not like the proverbial typing monkey. *Psychological Inquiry*, 10, 351–356.
- Schultz, W. (2000). Multiple reward signals in the brain. *Neuroscience*, 1, 199–207. doi:10.1038/35044563
- Schunk, D. H. (2012). *Learning theories an educational perspective sixth edition*. Pearson.
- Schwarz, K. A., Weller, L., Pfister, R., & Kunde, W. (2019). Connecting action control and agency: Does action-effect binding affect temporal binding?. *Consciousness and Cognition*, 76, 102833.
- Schwarz, N. (1990). *Feelings as information: Informational and motivational functions of affective states*. The Guilford Press.
- Scott, F. J., & Baron-Cohen, S. (1996). Imagining real and unreal things: Evidence of a dissociation in autism. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 8(4), 371-382.
- Shamir, A., & Korat, O. (2007). Developing an educational e-book for fostering kindergarten children's emergent literacy. *Computers in the Schools*, 24(1-2), 125-143.
- Sharif, I., Wills, T. A., & Sargent, J. D. (2010). Effect of visual media use on school performance: a prospective study. *Journal of Adolescent Health*, 46(1), 52-61.
- Shenton, J. T., Schwoebel, J., & Coslett, H. B. (2004). Mental motor imagery and the body schema: evidence for proprioceptive dominance. *Neuroscience letters*, 370(1), 19-24.
- Sherrill, C. (1986). Fostering creativity in handicapped children. *Adapted Physical Activity Quarterly*, 3(3), 236-249.
- Sherwood, L. A., & Strahan, D. B. (1985). Developmental patterns of logical and creative thinking among gifted learners in the middle school. *Middle School Research Selected Studies*, 10(1), 68-82.
- Shin, Y. K., Proctor, R. W., & Capaldi, E. J. (2010). A review of contemporary ideomotor theory. *Psychological Bulletin*, 136, 943– 974. doi:10.1037/a0020541
- Shumway-Cook, A., & Woollacott, M. H. (1985). The growth of stability: postural control from a developmental perspective. *Journal of motor behavior*, 17(2), 131-147.
- Siegle, D. (2013). iPads: Intuitive technology for 21st-century students. *Gifted Child Today*, 36(2), 146-150.
- Sigmundsson, H., Whiting, H. T. A., & Loftesnes, J. M. (2000). Development of proprioceptive sensitivity. *Experimental Brain Research*, 135(3), 348-352.

- Silver, R. B., Measelle, J. R., Armstrong, J. M., & Essex, M. J. (2005). Trajectories of classroom externalizing behavior: Contributions of child characteristics, family characteristics, and the teacher–child relationship during the school transition. *Journal of school psychology, 43*(1), 39-60.
- Simonton, D. K. (1984). Artistic creativity and interpersonal relationships across and within generations. *Journal of personality and social psychology, 46*(6), 1273.
- Simonton, D. K. (1997). Creative productivity: A predictive and explanatory model of career trajectories and landmarks. *Psychological Review, 104*, 66–89.
- Simonton, D. K. (1999). Creativity as blind variation and selective retention: is the creative process Darwinian? *Psychological Inquiry, 10*, 309–328.
- Simonton, D. K. (2000). Creativity: Cognitive, personal, developmental, and social aspects. *American psychologist, 55*(1), 151.
- Simonton, D. K. (2003). Scientific creativity as constrained stochastic behavior: The integration of process and person perspectives. *Psychological Bulletin, 129*, 475–494.
- Simonton, D. K. (2007). The creative process in Picasso's Guernica sketches: Monotonic improvements or nonmonotonic variants. *Creativity Research Journal, 19*, 329–344. doi:10.1080/ 10400410701753291
- Simonton, D. K. (2010). Creative thought as blind-variation and selective-retention: Combinatorial models of exceptional creativity. *Physics of life reviews, 7*(2), 156-179.
- Simonton, D. K. (2011). Creativity and discovery as blind variation: Campbell's (1960) BVSR model after the half-century mark. *Review of General Psychology, 15*(2), 158-174.
- Simonton, D. K. (2013). What is a creative idea? Little-c versus Big-C creativity. In *Handbook of research on creativity* (pp. 69-83). Edward Elgar Publishing.
- Sinclair, E. C. (1971). Towards a typology of cultural attitudes concerning creativity. *Western Canadian Journal of Anthropology, 2*(3), 82-89.
- Sio, U. N., & Ormerod, T. C. (2009). Does incubation enhance problem solving: A meta-analytic review. *Psychological Bulletin, 135*, 94– 120. doi:10.1037/a0014212
- Skiba, R. J. (2000). Zero Tolerance, Zero Evidence: An Analysis of School Disciplinary Practice. Policy Research Report.
- Skoura, X., Vinter, A., & Papaxanthis, C. (2009). Mentally simulated motor actions in children. *Developmental Neuropsychology, 34*(3), 356-367.
- Slepian, M. L., & Ambady, N. (2012). Fluid movement and creativity. *Journal of Experimental Psychology: General, 141*(4), 625.
- Slifkin, A. B. (2008). High loads induce differences between actual and imagined movement duration. *Experimental Brain Research, 185*(2), 297-307.
- Smits-Engelsman, B. C., & Wilson, P. H. (2013). Age-related changes in motor imagery from early childhood to adulthood: probing the internal representation of speed-accuracy trade-

offs. *Human Movement Science*, 32(5), 1151-1162.
<https://doi.org/10.1016/j.humov.2012.06.006>

- Smits-Engelsman, B., & Duysens, J. (2008). The line copy task for kinesthesia and internal movement representation: Application in children. *Human movement science*, 27(5), 682-694.
- Snowber, C. (2019). Embodied perspectives on creativity, inquiry, and research. In *Creativity Under Duress in Education?* (pp. 201-214). Springer, Cham.
- Sober, S. J., & Sabes, P. N. (2003). Multisensory integration during motor planning. *Journal of Neuroscience*, 23(18), 6982-6992.
- Soh, K. C. (1999). Creativity across-culture: Educators' perceptions and views.
- Soliman, T., Gibson, A., & Glenberg, A. M. (2013). Sensory motor mechanisms unify psychology: the embodiment of culture. *Frontiers in psychology*, 4, 885.
- Soliman, T., Gibson, A., & Glenberg, A. M. (2013). Sensory motor mechanisms unify psychology: the embodiment of culture. *Frontiers in psychology*, 4, 885.
- Spackman, J. S., & Yanchar, S. C. (2014). Embodied cognition, representationalism, and mechanism: a review and analysis. *Journal for the Theory of Social Behaviour*, 44(1), 46-79.
<https://doi.org/10.1111/jtsb.12028>
- Spearman, C. D. (1931). Creative mind. *The Journal of Nervous and Mental Disease*, 74(6), 783.
- Stacy, A. W., Zogg, J. B., Unger, J. B., & Dent, C. W. (2004). Exposure to televised alcohol ads and subsequent adolescent alcohol use. *American journal of health behavior*, 28(6), 498-509.
- Stanciu, M. M. (2015). Embodied creativity: A critical analysis of an underdeveloped subject. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 187, 312-317.
- Sternberg, R. J. (1988). A three-facet model of creativity. *The nature of creativity*, 125-147.
- Sternberg, R. J. (1988). *The nature of creativity: Contemporary psychological perspectives*. CUP Archive.
- Sternberg, R. J., & Lubart, T. I. (1991). An investment theory of creativity and its development. *Human development*, 34(1), 1-31. <https://doi.org/10.1159/000277029>
- Sternberg, R. J., & Lubart, T. I. (1993). Creative giftedness: A multivariate investment approach. *Gifted child quarterly*, 37(1), 7-15.
- Sternberg, R. J., & Lubart, T. I. (1995). *Defying the crowd: Cultivating creativity in a culture of conformity*. Free press.
- Sternberg, R. J., & Lubart, T. I. (1995). *Defying the crowd: Cultivating creativity in a culture of conformity*. Free press.
- Sternberg, R. J., & Lubart, T. I. (1996). Investing in creativity. *American psychologist*, 51(7), 677.
- Sternberg, R. J., Kaufman, J. C., & Pretz, J. E. (2002). *The creativity conundrum: A propulsion model of kinds of creative contributions*. Psychology Press.

- Stinear, C. (2010). Prediction of recovery of motor function after stroke. *The Lancet Neurology*, 9(12), 1228-1232.
- Stipek, D., & Miles, S. (2008). Effects of aggression on achievement: Does conflict with the teacher make it worse?. *Child development*, 79(6), 1721-1735.
- Stout, D. (2010). The evolution of cognitive control. *Topics in Cognitive Science*, 2(4), 614-630.
- Strasburger, V. C., & Council on Communications and Media. (2010). Media education. *Pediatrics*, 126(5), 1012-1017.
- Sturaro, C., Van Lier, P. A., Cuijpers, P., & Koot, H. M. (2011). The role of peer relationships in the development of early school-age externalizing problems. *Child development*, 82(3), 758-765.
- Susman, R. L. (1991). Who made the Oldowan tools? Fossil evidence for tool behavior in Plio-Pleistocene hominids. *Journal of Anthropological Research*, 47(2), 129-151.
- Sweetser, P., Johnson, D., Ozdowska, A., & Wyeth, P. (2012). Active versus passive screen time for young children. *Australasian Journal of Early Childhood*, 37(4), 94-98.
- Sweller, J., Ayres, P., & Kalyuga, S. (2011). Cognitive load theory. New-York: Springer.
- Swing, E. L., Gentile, D. A., Anderson, C. A., & Walsh, D. A. (2010). Television and video game exposure and the development of attention problems. *Pediatrics*, 126(2), 214-221.
- Synofzik, M., Vosgerau, G., & Newen, A. (2008a). Beyond the comparator model: a multifactorial two-step account of agency. *Consciousness and cognition*, 17(1), 219-239.
- Synofzik, M., Vosgerau, G., & Newen, A. (2008b). I move, therefore I am: A new theoretical framework to investigate agency and ownership. *Consciousness and cognition*, 17(2), 411-424.
- Tan, A. G. (2000). A review on the study of creativity in Singapore. *The Journal of creative behavior*, 34(4), 259-284.
- Tapscott, D. (1998). *Growing up digital* (Vol. 302). San Francisco: McGraw-Hill Companies.
- Taylor, S. F., Stern, E. R., & Gehring, W. J. (2007). Neural systems for error monitoring: Recent findings and theoretical perspectives. *The Neuroscientist*, 13, 162–172. doi:10.1177/1073858406298184
- The jamovi project (2021). *jamovi* (Version 1.6) [Computer Software]. Retrieved from <https://www.jamovi.org>
- Thomas, D. E., Bierman, K. L., Powers, C. J., & Conduct Problems Prevention Research Group. (2011). The influence of classroom aggression and classroom climate on aggressive–disruptive behavior. *Child development*, 82(3), 751-757.
- Thompson, G. W. (1964). Children's acceptance of television advertising and the relation of televiewing to school achievement. *The Journal of Educational Research*, 58(4), 171-174.
- Tian, F., Chen, Q., Zhu, W., Wang, Y., Yang, W., Zhu, X., ... & Qiu, J. (2018). The association between visual creativity and cortical thickness in healthy adults. *Neuroscience letters*, 683, 104-110.

- Tisseron, S. (2008). Le corps et les écrans. Toute image est portée par le désir d'une hallucination qui devienne réelle. *Champ psychosomatique*, 52(4), 47-57.
- Tisseron, S. (2012). Prévention des traumatismes liés aux médias chez l'enfant. *Neuropsychiatrie de l'Enfance et de l'Adolescence*, 60(5), 377-382.
- Tisseron, S. (2018). *3-6-9-12 Apprivoiser les écrans et grandir*. Erès.
- Tisseron, S. (2021). Les balises 3-6-9-12, un guide des écrans en famille, pour apprendre à s'en servir et à s'en passer. *Informations sociales*, (1), 22-30.
- Tootell, H., Plumb, M., Hadfield, C., & Dawson, L. (2013, January). Gestural interface technology in early childhood education: A framework for fully engaged communication. In *2013 46th Hawaii International Conference on System Sciences* (pp. 13-20). IEEE.
- Torrance, E. P. (1962). Cultural discontinuities and the development of originality of thinking. *Exceptional Children*, 29(1), 2-13.
- Torrance, E. P. (1963). Education and the creative potential.
- Torrance, E. P. (1966). *Torrance tests of creative thinking: Norms-technical manual*. Personnel Press.
- Torrance, E. P. (1967). The Minnesota studies of creative behavior: National and international extensions. *The Journal of Creative Behavior*, 1(2), 137-154.
- Torrance, E. P. (1968). A longitudinal examination of the fourth grade slump in creativity. *Gifted Child Quarterly*, 12(4), 195-199.
- Torrance, E. P. (1976). Creativity testing in education. *Creative Child & Adult Quarterly*.
- Torrance, E. P. (1981). *Thinking creatively in action and movement*. Benesville, IL: Scholastic Testing Service
- Toulmin, S. (1972). *Human understanding: The collective use and evolution of concepts*. Princeton, NJ: Princeton University Press
- Tyler, P. M., White, S. F., Thompson, R. W., & Blair, R. J. R. (2019). Applying a cognitive neuroscience perspective to disruptive behavior disorders: implications for schools. *Developmental Neuropsychology*, 44(1), 17-42.
- Urban, K. K. (1991). On the development of creativity in children. *Creativity Research Journal*, 4(2), 177-191.
- Urban, K. K., & Jellen, H. G. (1996). *Test for creative thinking-drawing production (TCT-DP)*. Swets Test Services.
- Valtulina, J., & de Rooij, A. (2019). The predictive creative mind: A first look at spontaneous predictions and evaluations during idea generation. *Frontiers in psychology*, 10, 2465. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02465>
- Van de Oudeweetering, K., & Voogt, J. (2018). Teachers' conceptualization and enactment of twenty-first century competences: exploring dimensions for new curricula. *The Curriculum Journal*, 29(1), 116-133.

- Van den Bulck, J. (2004). Television viewing, computer game playing, and Internet use and self-reported time to bed and time out of bed in secondary-school children. *Sleep*, 27(1), 101-104.
- Van der Kooy-Hofland, V. A. C., Kegel, C. A. T., & Bus, A. G. (2011). Evidence-based computer interventions targeting phonological awareness to prevent reading problems in at-risk young students. *Handbook of early literacy research*, 3, 214-227.
- Van Der Schyff, D., Schiavio, A., Walton, A., Velardo, V., & Chemero, A. (2018). Musical creativity and the embodied mind: Exploring the possibilities of 4E cognition and dynamical systems theory. *Music & Science*, 1, 2059204318792319.
- Van Laar, E., Van Deursen, A. J., Van Dijk, J. A., & De Haan, J. (2017). The relation between 21st-century skills and digital skills: A systematic literature review. *Computers in human behavior*, 72, 577-588.
- Van Roon, D., Caeyenberghs, K., Swinnen, S. P., & Smits-Engelsman, B. C. (2008). Development of feedforward control in a dynamic manual tracking task. *Child Development*, 79(4), 852-865.
- Vernon, L., Modecki, K. L., & Barber, B. L. (2018). Mobile phones in the bedroom: Trajectories of sleep habits and subsequent adolescent psychosocial development. *Child development*, 89(1), 66-77.
- Vernon, P. E. (1970). Creativity. *Modern Psychology Readings. First edn. Baltimore: Penguin.*
- Viel, S., Vaugoyeau, M., & Assaiante, C. (2009). Adolescence: a transient period of proprioceptive neglect in sensory integration of postural control. *Motor control*, 13(1), 25-42.
- Villamor, C., Willis, D., & Wroblewski, L. (2010). Touch gesture reference guide. *Touch Gesture Reference Guide.*
- Villamor, C., Willis, D., & Wroblewski, L. (2010). Touch gesture reference guide. *Touch Gesture Reference Guide.*
- Vinter, A., & Chartrel, E. (2010). Effects of different types of learning on handwriting movements in young children. *Learning and Instruction*, 20(6), 476-486.
- von Hofsten, C. (1980). Predictive reaching for moving objects by human infants. *Journal of experimental child psychology*, 30(3), 369-382.
- von Hofsten, C., & Rönqvist, L. (1988). Preparation for grasping an object: a developmental study. *Journal of experimental psychology: Human perception and performance*, 14(4), 610.
- von Hofsten, C., & Rösblad, B. (1988). The integration of sensory information in the development of precise manual pointing. *Neuropsychologia*, 26(6), 805-821. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(88\)90051-6](https://doi.org/10.1016/0028-3932(88)90051-6)
- von Hofsten, C. & Woollacott, M. H. (1989). Anticipatory postural adjustments during infants reaching. *Neuroscience Abstracts*, 15, 1199
- Vosburg, S. K. (1998). Mood and the quantity and quality of ideas. *Creativity Research Journal*, 11(4), 315-324.
- Wallach, M. A., & Kogan, N. (1965). Modes of thinking in young children.

- Wang, M., & Shen, R. (2012). Message design for mobile learning: Learning theories, human cognition and design principles. *British Journal of Educational Technology*, 43(4), 561-575.
- Wang, B. T., Teng, C. W., & Chen, H. T. (2015). Using iPad to facilitate English vocabulary learning. *International Journal of Information and Education Technology*, 5(2), 100-104.
- Wang, F., Xie, H., Wang, Y., Hao, Y., & An, J. (2016). Using touchscreen tablets to help young children learn to tell time. *Frontiers in psychology*, 7, 1800.
- Warger, C. L., & Kleman, D. (1986). Developing positive self-concepts in institutionalized children with severe behavior disorders. *Child welfare*, 165-176.
- Wartella, E., Rideout, V., Lauricella, A. R., & Connell, S. (2013). Parenting in the age of digital technology. *Report for the center on media and Human development school of communication Northwestern University*.
- Watson, C. E., & Buxbaum, L. J. (2015). A distributed network critical for selecting among tool-directed actions. *Cortex*, 65, 65-82.
- Wegner, D. (2002). *The illusion of conscious will*. MIT Press.
- Wegner, D. M. (2003). The mind's best trick: How we experience conscious will. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 65-69. doi:10. 1016/S1364-6613(03)00002-0
- Wegner, D. M., & Sparrow, B. (2004). Authorship processing.
- Wegner, D. M., Sparrow, B., & Winerman, L. (2004). Vicarious agency: experiencing control over the movements of others. *Journal of personality and social psychology*, 86(6), 838.
- Weis, R., & Cerankosky, B. C. (2010). Effects of video-game ownership on young boys' academic and behavioral functioning: A randomized, controlled study. *Psychological science*, 21(4), 463-470. <https://doi.org/10.1177/0956797610362670>
- Wellman, R. J., Sugarman, D. B., DiFranza, J. R., & Winickoff, J. P. (2006). The extent to which tobacco marketing and tobacco use in films contribute to children's use of tobacco: a meta-analysis. *Archives of pediatrics & adolescent medicine*, 160(12), 1285-1296.
- Wiley, J. (1998). Expertise as mental set: The effects of domain knowledge in creative problem solving. *Memory & cognition*, 26(4), 716-730.
- Willems, R. M., & Francken, J. C. (2012). Embodied cognition: taking the next step. *Frontiers in Psychology*, 3, 582. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00582>
- Williams, F. E. (1972). *A Total Creativity Program for Individualizing and Humanizing the Learning Process: Identifying and Measuring Creative Potential* (Vol. 1). Educational Technology.
- Williams, F. E. (1993). *Creativity assessment packet: CAP*. Pro-Ed.
- Williams, J. H., Whiten, A., Waiter, G. D., Pechey, S., & Perrett, D. I. (2007). Cortical and subcortical mechanisms at the core of imitation. *Social neuroscience*, 2(1), 66-78.
- Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic bulletin & review*, 9(4), 625-636. <https://doi.org/10.3758/BF03196322>

- Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic bulletin & review*, 9(4), 625-636. <https://doi.org/10.3758/BF03196322>
- Wilson, P. H., Maruff, P., Butson, M., Williams, J., Lum, J., & Thomas, P. R. (2004). Internal representation of movement in children with developmental coordination disorder: a mental rotation task. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 46(11), 754-759.
- Witherington, D. C., von Hofsten, C., Rosander, K., Robinette, A., Woollacott, M. H., & Bertenthal, B. I. (2002). The development of anticipatory postural adjustments in infancy. *Infancy*, 3(4), 495-517.
- Wolpert, D. M. (1997). Internal models in human motor control: A computational and psychophysical perspective. *The Journal of Physiology*, 501, S12-S12.
- Wolpert, D. M. (1997). Internal models in human motor control: A computational and psychophysical perspective. *The Journal of Physiology*, 501, S12-S12.
- Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *Nature Neuroscience*, 3, 1212-1228.
- Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. (2004). Computational motor control. *Science*, 269, 1880-1882.
- Wolpert, D. M., & Kawato, M. (1998). Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural networks*, 11(7-8), 1317-1329.
- Wolpert, D. M., Doya, K., & Kawato, M. (2003). A unifying computational framework for motor control and social interaction. *Philosophical Transactions of the Royal Society Series B*, 358, 593-602. doi:10.1098/rstb.2002.1238
- Wolpert, D. M., Ghahramani, Z., & Jordan, M. I. (1995). An internal model for sensorimotor integration. *Science*, 269(5232), 1880-1882.
- Wolpert, D. M., Miall, R. C., & Kawato, M. (1998). Internal models in the cerebellum. *Trends in cognitive sciences*, 2(9), 338-347.
- Wolpert, D. M., Miall, R. C., & Kawato, M. (1998). Internal models in the cerebellum. *Trends in cognitive sciences*, 2(9), 338-347.
- Woodman, R. W., & Schoenfeldt, L. F. (1990). An interactionist model of creative behavior. *The Journal of Creative Behavior*.
- Woods, H. C., & Scott, H. (2016). # Sleepyteens: Social media use in adolescence is associated with poor sleep quality, anxiety, depression and low self-esteem. *Journal of adolescence*, 51, 41-49.
- Woody, E., & Claridge, G. (1977). Psychoticism and thinking. *British Journal of Social and Clinical Psychology*, 16(3), 241-248.
- Wu, X., Yang, W., Tong, D., Sun, J., Chen, Q., Wei, D., ... & Qiu, J. (2015). A meta-analysis of neuroimaging studies on divergent thinking using activation likelihood estimation. *Human brain mapping*, 36(7), 2703-2718.

- Xie, H., Peng, J., Qin, M., Huang, X., Tian, F., & Zhou, Z. (2018). Can touchscreen devices be used to facilitate young children's learning? A meta-analysis of touchscreen learning effect. *Frontiers in Psychology*, 9, 2580.
- Yelland, N. & Gilbert, C. (2018). Transformative technologies and play in the early years: Using tablets for new learning. *Global Studies of Childhood*, 8(2), 152-161. <https://doi.org/10.1177/2043610617734985>
- Yost, N. (2003, July). Computers, kids, and crayons: a comparative study of emergent writing behaviours. In *Proceedings of the international federation for information processing working group 3.5 open conference on Young children and learning technologies-Volume 34* (pp. 107-112). Australian Computer Society, Inc.
- Yuill, N., & Martin, A. F. (2016). Curling up with a good e-book: Mother-child shared story reading on screen or paper affects embodied interaction and warmth. *Frontiers in psychology*, 7, 1951.
- Zesiger, P. E., Deonna, T., & Mayor, C. (2000). L'acquisition de l'écriture. *Enfance*, 53(3), 295-304.
- Zhang, M., Trussell, R. P., Gallegos, B., & Asam, R. R. (2015). Using math apps for improving student learning: An exploratory study in an inclusive fourth grade classroom. *TechTrends*, 59(2), 32-39.
- Zimmerman, F. J. (2008). Children's Media Use and Sleep Problems: Issues and Unanswered Questions. Research Brief. *Henry J. Kaiser Family Foundation*.
- Zimmerman, F. J., & Christakis, D. A. (2005). Children's television viewing and cognitive outcomes: a longitudinal analysis of national data. *Archives of pediatrics & adolescent medicine*, 159(7), 619-625.
- Zimmerman, F. J., & Christakis, D. A. (2007). Associations between content types of early media exposure and subsequent attentional problems. *Pediatrics*, 120(5), 986-992.
- Zimmerman, F. J., Christakis, D. A., & Meltzoff, A. N. (2007). Associations between media viewing and language development in children under age 2 years. *The Journal of pediatrics*, 151(4), 364-368.
- Zioga, I., Harrison, P. M., Pearce, M. T., Bhattacharya, J., & Luft, C. D. B. (2020). From learning to creativity: Identifying the behavioural and neural correlates of learning to predict human judgements of musical creativity. *NeuroImage*, 206, 116311.

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Schématisation du processus de variation-sélection de l'idée créative selon la description de Dietrich et Haider (2015).	54
Figure 2. Schéma des modèles internes de l'action utilisés dans le contrôle de l'action en cours, inspiré de Lebon et al. (2013).....	61
Figure 3. Schéma de des modèles internes de l'action utilisés dans le contrôle de l'action simulée, inspiré de Lebon et al. (2013).....	66
Figure 4. Schématisation de l'analogie entre la boucle variation-sélection (en vert) et les modèles internes de l'action (en bleu) utilisés dans le processus créatif, selon les propositions de Dietrich et Haider (2015).	69
Figure 5. Exemples de dessins créatifs et non créatifs réalisés sur papier par des enfants de CP (A et B) et sur tablette par des enfants de CE2 (C et D).....	120
Figure 6. Score de créativité (moyenne et erreur standard de la moyenne) selon le type de support..	122
Figure 7. Score de créativité (moyenne et erreur standard de la moyenne) observé pour chaque classe scolaire	123
Figure 8. Exemple d'un dessin prototypique d'une maison selon les 5 items (base, toit, fenêtres, porte, et vitres) considérés dans notre échelle.	148
Figure 9. Exemple de suppressions dans un dessin réalisé au doigt sur tablette	151
Figure 10. Exemple d'additions et de modifications de forme des éléments dans un dessin réalisé au doigt sur tablette	152
Figure 11. Exemple de modifications de la taille et de la forme des éléments dans un dessin réalisé au stylo sur papier	153
Figure 12. Exemple d'insertion de nouveaux éléments dans un dessin réalisé au stylet sur tablette ..	154
Figure 13. Exemple de modification de position globale dans un dessin réalisé au stylet sur tablette	155
Figure 14. Exemple de modification inter-conceptuelle dans un dessin réalisé au stylo sur papier ...	155
Figure 15. Exemple de modifications opérées sur la forme générale dans un dessin réalisé au stylo sur papier	156
Figure 16. Exemple de cotation d'un dessin non-original réalisé au stylo sur papier (à gauche) comparé au dessin original réalisé au doigt sur tablette (sur la droite) pour un même adolescent	157
Figure 17. Scores d'originalité (moyenne et erreur standard de la moyenne) en fonction du dispositif utilisé (stylo sur papier, stylet sur tablette, doigt sur tablette).	161
Figure 18. Exemple d'addition et de suppression d'éléments sur un dessin réalisé au stylet sur tablette en 6e	194
Figure 19. Exemple de modification de la forme des éléments dans un dessin réalisé au stylet sur tablette en 6e.....	195
Figure 20. Exemple de modification de la taille des éléments et de modification de l'orientation dans un dessin réalisé au doigt sur tablette en CE2	196
Figure 21. Exemple d'insertion de nouveaux éléments dans un dessin réalisé au stylet sur tablette en 6e	196
Figure 22. Exemple de modification opérée sur la forme générale et d'insertion de catégorie interconceptuelle dans un dessin réalisé au doigt sur tablette en 6e.....	197

Figure 23. Scores d'originalité (moyenne et erreur standard de la moyenne) en fonction de l'outil utilisé et de la classe.	198
Figure 24. Scores d'originalité en fonction de l'outil utilisé (doigt sur tablette, stylet sur tablette, crayon sur papier).....	239

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Description des consignes de la tâche fonctionnelle et leur correspondance avec le guide de référence.....	102
Tableau 2. Echelle de cotation du bonhomme original	106
Tableau 3. Tableau des scores de créativité de chaque classe (CP-CE2) et pour chaque support (Papier-Tablette)	121
Tableau 4. Pourcentages et scores Chi2 du type de support utilisé et de l'usage des technologies selon la classe des enfants. Les Chi2 significatif sont en gras	124
Tableau 5. Echelle de cotation utilisée pour évaluer l'originalité des dessins	150
Tableau 6. Occurrence (pourcentage) de chaque item de l'échelle d'originalité en fonction de la condition de dessin de la maison	159
Tableau 7. Description de la tâche fonctionnelle d'après le guide de reference de Villamor, Willis, & Wroblewski, 2010.	188
Tableau 8. Echelle de cotation utilisée pour mesurer l'originalité des dessins du bonhomme	191
Tableau 9. Analyse descriptive des scores d'originalité en fonction de la classe et de l'outil utilisé.	199
Tableau 10. Occurrence (en pourcentage) de chaque item de l'échelle d'originalité en fonction de la condition de dessin (les differences significatives au test de Cochran son ten gras).	200
Table 11. Description of the functional task instructions and their correspondence with the reference guide.....	233
Tableau 12. Description des consignes de la tâche fonctionnelle et leur correspondance avec le guide de référence.	233
Tableau 13. Echelle de cotation du bonhomme original inspiré de Bitu et al. (2022).	236
Tableau 14. Comparaison des scores d'originalité (moyenne et écart-type) en fonction de l'outil utilise entre les adolescents avec troubles du comportement et les adolescents typiques.....	240
Tableau 15. Préférence d'utilisation des medias	242
Tableau 16. Préférence d'utilisation des outil	242
Tableau 17. Groupement thématique des arguments avancés par les participants pour justifier leurs choix	243
Tableau 18. Analyse thématique des éléments justifiant la préférence pour le support tactile	243
Tableau 19. Analyse thématique des éléments justifiant la préférence pour le stylet	244

L'APPORT DES TECHNOLOGIES INTERACTIVES DANS L'ETUDE DES COMPOSANTES SENSORIELLES DE LA CREATIVITE

Les technologies numériques sont omniprésentes dans le quotidien des enfants et adolescents. Les technologies interactives comme les tablettes tactiles semblent particulièrement attractives et faciles d'utilisation, apportant des bénéfices sur les apprentissages scolaires. La question se pose alors de savoir si ces avantages peuvent s'observer également pour d'autres formes d'activité ne faisant pas l'objet d'un apprentissage. Dans ce cadre, nous nous intéresserons aux activités créatives. Bien que la créativité soit conçue comme un phénomène de nature multifactorielle, les composantes sensorimotrices n'ont été que très peu intégrées dans le processus créatif. Pourtant, Dietrich et Haider (2015) ont récemment suggéré que le processus permettant de générer une idée créative emprunterait le même mécanisme que celui utilisé pour contrôler une action réalisée ou imaginée au travers de la prédiction sensorimotrice. Les afférences sensorielles étant centrales dans le contrôle de l'action sensorimotrice, elles pourraient être considérées comme des facteurs constitutifs de la créativité. Selon cette proposition, il pourrait être suggéré que modifier les afférences sensorielles disponibles dans une tâche pourrait moduler la créativité. Dans cette thèse, nous interrogeons cette relation entre créativité et sensorimotricité. Au travers de 4 études expérimentales, nous avons fait varier les afférences sensorielles disponibles dans une tâche créative en faisant dessiner des enfants et adolescents de 6 à 15 ans sur tablette tactile au doigt, au stylet, et sur papier au stylo. Les résultats montrent effectivement qu'augmenter les afférences sensorielles en utilisant le doigt sur tablette tactile améliore l'originalité à tout âge. En revanche, réduire les afférences sensorielles lors de l'utilisation du stylet n'amène pas aux mêmes effets sur les performances d'originalité selon l'âge des participants. Chez les enfants de 6-7 ans, utiliser le stylet sur tablette tactile ne modifie pas les performances d'originalité. Après 8 ans, les enfants réalisent des dessins plus originaux au stylet sur tablette tactile qu'au stylo sur papier. L'effet bénéfique du stylet sur les performances créatives à partir de cet âge pourrait s'expliquer par l'acquisition de la capacité à compenser la perte d'afférences sensorielles qui permet de maximiser les informations sensorielles, apportant ainsi des bénéfices sur l'originalité. Ces bénéfices de la tablette tactile s'observent également chez des adolescents qui, du fait de troubles du comportement, présentent des difficultés dans la mobilisation de leurs capacités cognitives. De plus, ces adolescents rapportent une préférence majoritaire pour l'utilisation du support tactile en comparaison du support papier, qui serait lié à une plus grande mobilisation sensorielle dans la production des gestes graphiques sur l'interface. Nous discutons de l'implication de ces résultats pour la nature du processus créatif et son développement, ainsi que l'utilisation d'afférences sensorielles pour aider les enfants et adolescents typiques, comme atypiques, à mobiliser plus efficacement leurs capacités cognitives.

Mots-clés : Créativité, afférences sensorielles, tablette tactile, sensorimotricité, prédiction sensorielle, charge cognitive, troubles du comportement, enfant, adolescent.