

**DÉVELOPPEMENT DES FONCTIONS EXÉCUTIVES CHEZ DES ADOLESCENT·E·S DU
SECONDAIRE 1 AU TESSIN : IMPACT DES ETATS DE CONCENTRATION ET D'HYPER-
CONCENTRATION SUR LE STRESS INDUIT PAR LE PROCESSUS D'APPRENTISSAGE
ET SUR LE TRAITEMENT DES INFORMATIONS.**

*Omar Pagnamenta

CAS en Neurosciences de l'Éducation, Université de Fribourg, Suisse

***Auteur correspondant** : M Omar Pagnamenta. omar.pagnamenta@g2sable.net

Citation : Pagnamenta, O. (2024). Développement des fonctions exécutives chez des adolescent·e·s du secondaire 1 au Tessin : impact des états de concentration et d'hyper-concentration sur le stress induit par le processus d'apprentissage et sur le traitement des informations. *Cortica*, 4(1), 640-671. [https://doi.org/ 10.26034/cortica.2025.7046](https://doi.org/10.26034/cortica.2025.7046)

Résumé

Cette étude examine l'impact d'un entraînement attentionnel et métacognitif sur le développement des fonctions exécutives chez des adolescents du secondaire 1 au Tessin. En s'appuyant sur des modèles théoriques issus des neurosciences cognitives et des sciences de l'éducation, cette recherche s'intéresse aux effets des états de concentration et d'hyper-concentration sur le stress induit par l'apprentissage et sur le traitement des informations. Un protocole expérimental impliquant 600 élèves répartis en trois groupes (entraînement attentionnel, entraînement attentionnel et métacognitif, contrôle) a été mis en place sur une durée de huit semaines. L'étude adopte une approche mixte, combinant des mesures

neuropsychologiques, neurophysiologiques et psychoaffectives. Les résultats préliminaires suggèrent une amélioration significative des capacités attentionnelles et exécutives chez les élèves ayant bénéficié de l'intervention, en particulier dans le groupe entraînement attentionnel et métacognitif. De plus, une diminution du stress perçu et une augmentation du sentiment d'efficacité personnelle ont été observées. Ces résultats soulignent l'importance d'une approche interdisciplinaire intégrant neurosciences et pédagogie pour optimiser les apprentissages et le bien-être des élèves.

Résumé généré par OpenAI (2023)

Mots-clés : fonctions exécutives, attention,

métacognition, apprentissage, neurosciences cognitives, stress scolaire, adolescents.

Abstract

This study examines the impact of attentional and metacognitive training on the development of executive functions in secondary school adolescents in the canton of Ticino. Based on theoretical models from cognitive neuroscience and educational sciences, this research investigates the effects of concentration and hyper-concentration states on learning-induced stress and information processing. A controlled experimental protocol involving 600 students, divided into three groups (attentional training, attentional and metacognitive training, and control), was implemented over an eight-week period. The study adopts a mixed-methods approach, combining neuropsychological, neurophysiological, and psycho-affective measures. Preliminary results suggest a significant improvement in attentional and executive capacities among students who underwent the intervention, particularly in the attentional and metacognitive training group. Additionally, a decrease in perceived stress and an increase in self-efficacy were observed. These findings highlight the importance of an interdisciplinary approach integrating neuroscience and pedagogy to optimize learning and student well-being.

Abstract generated by OpenAI (2023)

Keywords: executive functions, attention, metacognition, learning, cognitive neuroscience, academic stress, adolescents.

Préambule

Notre recherche s'appuie sur plusieurs hypothèses issues des neurosciences cognitives et des sciences de l'éducation :

- Un entraînement attentionnel régulier, basé sur des exercices ciblant les différentes facettes de l'attention (alerte, orientation, contrôle exécutif), peut améliorer les capacités attentionnelles et exécutives des adolescents, avec un transfert positif sur leurs performances scolaires et leur engagement dans les apprentissages.
- Un empowerment métacognitif, c'est-à-dire un travail explicite sur les connaissances métacognitives et les stratégies de régulation des apprentissages, en complément de l'entraînement attentionnel, peut potentialiser les bénéfices de ce dernier en favorisant le transfert des compétences et le sentiment de contrôle des élèves sur leur propre fonctionnement cognitif.
- L'amélioration des capacités attentionnelles et exécutives devrait

se traduire, au niveau neurophysiologique, par une augmentation de la puissance des ondes cérébrales thêta (impliquées dans le contrôle cognitif) et alpha (impliquées dans la régulation des états internes) dans les régions frontales et pariétales, ainsi que par une meilleure synchronisation de ces rythmes, témoignant d'une communication neuronale plus efficace

- Sur le plan psychoaffectif, nous prédisons une diminution du stress perçu face aux apprentissages et une amélioration du sentiment d'efficacité personnelle et de la motivation intrinsèque des élèves, en lien avec un meilleur contrôle attentionnel et une plus grande conscience métacognitive.
- Ces bénéfices devraient être plus marqués dans le groupe bénéficiant à la fois de l'entraînement attentionnel et de l'empowerment métacognitif, comparativement au groupe ne recevant que l'entraînement attentionnel, lui-même supérieur au groupe contrôle.

Le modèle dispositionnel de Bourdieu (1970, 1980, 1992) nous rappelle que les prédispositions cognitives et les rapports au savoir des élèves sont profondément façonnés par leur habitus, c'est-à-dire par

leur socialisation familiale et leur position dans l'espace social. Les "piliers de l'apprentissage" identifiés par les neurosciences, comme l'attention, l'engagement actif, le retour d'information et la consolidation, ne sont pas purement "cérébraux" mais se construisent en interaction constante avec cet environnement socioculturel. Il y a donc une dialectique complexe entre le biologique et le social dans la genèse des (in)égalités scolaires, qu'il faut se garder de réduire à des déterminismes univoques. Chez les adolescents en particulier, le développement encore immature de certaines régions cérébrales comme le cortex préfrontal peut certes expliquer leurs difficultés attentionnelles ou leur impulsivité. Mais cette maturation en cours est aussi source d'opportunités, de plasticité et de créativité. Leurs émotions exacerbées et leur quête de nouveauté, si elles sont bien canalisées, peuvent devenir des leviers puissants d'engagement dans les apprentissages.

Les modèles de l'attention de Diamond (2013) et de Miyake et al. (2000) nous invitent à une approche fine des mécanismes attentionnels et exécutifs, dans leurs composantes d'inhibition, de flexibilité et de mise à jour. Mais ces processus gagnent à être resitués dans la dynamique développementale et sociale des adolescents. Leurs capacités d'autorégulation cognitive et émotionnelle se construisent progressivement, en

interaction avec leur environnement familial, scolaire et culturel.

De même, les "filtres de l'apprentissage" mis en évidence par Bourassa, qu'ils soient cognitifs, métacognitifs ou affectifs, ne sont pas figés mais évoluent au fil des expériences et des contextes. Des difficultés cognitives peuvent générer un désinvestissement, et inversement un travail sur la motivation peut débloquer les processus intellectuels. Chez les adolescents, le filtre affectif et relationnel est prépondérant. Le regard des pairs, le besoin de reconnaissance identitaire colorent leur rapport au savoir.

Les travaux sur le flow et ses corrélats neurophysiologiques (ondes alpha et thêta, cohérence cardiaque) ouvrent des perspectives intéressantes pour évaluer la qualité de l'engagement attentionnel et ajuster les situations d'apprentissage. Mais ces marqueurs ne sont pas non plus indépendants du contexte et du sens que les élèves attribuent aux savoirs. L'attention et la motivation s'enracinent dans le désir de comprendre et dans un projet de vie.

Les neurosciences cognitives et les sciences de l'éducation nous apportent un éclairage stimulant sur les ressorts de l'apprentissage adolescent, mais qui doit impérativement être articulé avec les sciences sociales dans un dialogue interdisciplinaire exigeant. Le cerveau qui apprend est toujours un cerveau socialisé,

pris dans une histoire et une culture. Comprendre les processus d'apprentissage implique de saisir cette intrication complexe du biologique et du social, des dispositions incorporées et des contextes éducatifs. C'est à ce prix que l'on pourra espérer construire une vision intégrative et émancipatrice des adolescents et de leurs potentialités d'apprentissage.

Notre recherche ambitionne à étudier l'impact d'un entraînement attentionnel et métacognitif sur les capacités d'apprentissage et le vécu scolaire des adolescents. Dans cette optique, nous mettrons en place un protocole de recherche mixte, combinant des approches comportementales, neurophysiologiques et psychoaffectives. Un échantillon de 600 élèves du secondaire 1 du Tessin, répartis en trois groupes (entraînement attentionnel, entraînement attentionnel et métacognitif, contrôle), sera suivi pendant 8 semaines. Des mesures pré/post intervention seront effectuées, comprenant des tests neuropsychologiques, des mesures EEG, des indicateurs scolaires et des questionnaires de vécu. Des entretiens avec les enseignants et les parents compléteront le recueil de données. Nous attendons une amélioration des capacités attentionnelles et exécutives, une meilleure régulation émotionnelle et motivationnelle, ainsi qu'un transfert positif sur les apprentissages et le bien-être scolaire, en particulier dans le groupe ayant bénéficié

de l'empowerment métacognitif.

Cette étude s'inscrit dans une perspective de neuropédagogie appliquée, visant à optimiser les conditions d'apprentissage en prenant en compte le fonctionnement cérébral, cognitif et psychoaffectif des élèves, en lien avec leur environnement social et culturel. Le point de départ, tant théorique que pratique, est le modèle PRÉSENCE élaboré par Fahim (2022a, 2022b, 2023, 2024) et qui propose une vision intégrée du développement cérébral, soulignant l'interaction entre les facteurs génétiques, épigénétiques, et environnementaux dans l'éducation et le développement des jeunes. Il est basé sur une exploration approfondie de divers aspects du cerveau, tels que la prédisposition génétique et épigénétique, l'élagage synaptique, la neuroplasticité, la neurogenèse, ainsi que la dynamique des réseaux de neurones et leur synchronisation. Ces éléments sont considérés comme essentiels pour comprendre comment émergent des états mentaux complexes, incluant la conscience et le libre arbitre.

Si le point de départ est une certaine prédisposition (génétique et épigénétique), le modèle souligne l'importance de l'environnement dans le développement des réseaux neuronaux de l'enfant. Il met en lumière le fait que, bien que les connexions neuronales soient établies selon un plan génétiquement programmé,

leur maintien et leur qualité peuvent être significativement influencés par l'activité neuronale et, par conséquent, par l'expérience. Les éléments saillants peuvent être résumés de la manière suivante :

- **Prédisposition génétique/épigénétique** : la prédisposition génétique et épigénétique fait référence à la manière dont les gènes hérités et les influences environnementales façonnent le développement du cerveau (Ilyka, Johnson et Lloyd-Fox, 2021). Les gènes fournissent un plan de base pour le développement, mais l'épigénétique, qui implique des modifications chimiques de l'ADN et des protéines associées sans changer la séquence d'ADN elle-même, permet à l'environnement d'influencer l'expression des gènes. Cela signifie que les expériences vécues, comme le stress ou l'apprentissage, peuvent modifier la manière dont certains gènes sont activés ou désactivés, influençant ainsi le développement et le fonctionnement du cerveau (McGowan et Roth, 2015).
- **Neurogenèse** : la neurogenèse est le processus de formation de nouveaux neurones dans le cerveau (Ismail et al., 2017), un

phénomène longtemps cru limité à l'enfance. Cependant, des recherches ont montré que la neurogenèse se poursuit à l'âge adulte dans certaines régions du cerveau, comme l'hippocampe, qui est crucial pour l'apprentissage et la mémoire. Les nouveaux neurones générés peuvent s'intégrer dans les réseaux neuronaux existants, contribuant à la plasticité cérébrale et à la capacité d'adaptation du cerveau face à de nouvelles informations ou à des dommages.

- Élagage synaptique 1 & 2 : l'élagage synaptique est un processus par lequel les connexions neuronales (synapses) en excès sont éliminées au profit de réseaux neuronaux plus efficaces et spécialisés. Ce processus est particulièrement actif pendant l'enfance et à l'adolescence (Kolb et Gibb, 2011), permettant au cerveau de devenir plus efficace en renforçant les circuits neuronaux fréquemment utilisés tout en éliminant ceux qui le sont moins (Selemon, 2013). L'élagage synaptique est essentiel pour le développement cognitif et la maturation du cerveau.
- Dynamique des réseaux de neurones et synchronisation : la dynamique des réseaux de

neurones et leur synchronisation concernent la manière dont les neurones communiquent entre eux pour réaliser des fonctions cérébrales complexes. La synchronisation des activités neuronales permet une coordination efficace des fonctions cérébrales, comme la perception sensorielle, le mouvement, et les processus cognitifs (Uhlhaas et al., 2009). Les réseaux de neurones peuvent s'autoorganiser en motifs dynamiques d'activité qui reflètent l'intégration de l'information à travers différentes régions du cerveau.

- Neuroplasticité : la neuroplasticité désigne la capacité du cerveau à se réorganiser en réponse à de nouvelles expériences, à l'apprentissage ou à des dommages. Elle implique la formation de nouvelles connexions synaptiques, le renforcement ou l'affaiblissement des connexions existantes, et, dans certains cas, la neurogenèse. La plasticité cérébrale est fondamentale pour l'apprentissage, la mémoire, et la récupération après une lésion cérébrale. Elle montre que le cerveau conserve une certaine malléabilité tout au long de la vie, permettant une adaptation continue à l'environnement et aux

expériences.

- Conscience et libre arbitre : la conscience et le libre arbitre sont des états mentaux complexes (Masi, 2023) qui émergent de l'interaction dynamique et de la synchronisation des réseaux de neurones. La conscience peut être décrite comme l'état d'être conscient de soi et de son environnement, tandis que le libre arbitre se réfère à la capacité de prendre des décisions volontaires et intentionnelles (Leisman et al., 2012). Bien que les mécanismes neuronaux sous-jacents restent largement inexplorés, ils impliquent la coordination de vastes réseaux neuronaux à travers le cerveau, permettant une réflexion, une planification et une prise de décision autonome.

Filiation théorique

Les piliers de l'apprentissage

Les travaux de Stanislas Dehaene et de son équipe au Collège de France ont permis d'identifier quatre piliers de l'apprentissage, validés par les neurosciences cognitives (Dehaene, 2013) :

1. L'attention : pour apprendre, le cerveau doit d'abord focaliser ses ressources attentionnelles sur l'information

pertinente et filtrer les distracteurs. Les réseaux attentionnels frontaux et pariétaux jouent un rôle clé dans cette sélection et ce contrôle.

2. L'engagement actif : l'apprentissage est d'autant plus efficace que l'apprenant est acteur de son savoir, par la manipulation, l'exploration, la génération d'hypothèses... Cette posture active favorise la motivation et la mémorisation.

3. Le retour d'information : pour progresser, le cerveau a besoin de feedbacks sur ses erreurs et ses réussites. Ces signaux de renforcement, positifs ou négatifs, sont traités par les ganglions de la base et permettent d'ajuster les comportements.

4. La consolidation : Les apprentissages initialement labiles doivent être réactivés et répétés pour se consolider en mémoire à long terme. Ce transfert progressif vers les réseaux corticaux s'opère notamment durant le sommeil.

Ces quatre piliers, universels dans leur principe, prennent une coloration particulière à l'adolescence du fait de la maturation cérébrale en cours. Ainsi, les capacités attentionnelles et de contrôle cognitif, dépendantes des régions préfrontales, sont encore limitées chez les adolescents (Luna et al., 2010). A l'inverse, leur quête d'autonomie et de nouveauté les prédispose à un engagement plus actif

dans les apprentissages, pour peu que ceux-ci fassent sens et soient source de motivation (Crone & Dahl, 2012).

Les filtres de l'apprentissage

Michelle Bourassa, dans ses travaux sur l'échec scolaire, a mis en évidence l'existence de filtres cognitifs, métacognitifs et affectifs qui conditionnent l'apprentissage (Bourassa, 2021) :

- Le filtre cognitif renvoie aux connaissances et habiletés de base de l'élève, à sa maîtrise des prérequis, à ses stratégies de traitement de l'information. Des lacunes à ce niveau, comme une lecture peu fluide ou une mémoire de travail limitée, peuvent entraver les apprentissages ultérieurs.
- Le filtre métacognitif concerne la conscience qu'a l'élève de son fonctionnement cognitif et sa capacité à réguler ses processus mentaux. Cela inclut les stratégies de planification, de contrôle et d'ajustement, ainsi que les attributions causales (à quoi l'élève attribue-t-il ses réussites et ses échecs ?). Un élève métacognitivement peu développé aura du mal à adopter une posture réflexive sur ses apprentissages.
- Le filtre affectif recouvre les attitudes, émotions et motivations

de l'élève, ainsi que l'image de soi en tant qu'apprenant. L'anxiété, une faible estime de soi, la peur de l'échec sont autant d'obstacles sur le chemin des apprentissages. A l'inverse, le sentiment de compétence et la motivation intrinsèque sont des leviers puissants de réussite.

Ces trois filtres interagissent constamment : ainsi, des difficultés cognitives répétées peuvent générer un sentiment d'impuissance et une démotivation (Bourassa, 2021). Inversement, un travail sur les émotions et les représentations de l'élève peut débloquer ses processus cognitifs.

Chez les adolescents, le filtre affectif joue un rôle prépondérant, du fait de l'hyperréactivité émotionnelle qui caractérise cette période (Guyer et al., 2016). Le regard des pairs, la quête de valorisation et de reconnaissance identitaire peuvent faciliter ou inhiber les apprentissages. Les pédagogies actives, collaboratives, qui donnent du sens et de l'autonomie aux élèves, sont à privilégier.

Les modèles de l'attention

L'attention est une fonction cognitive cruciale pour les apprentissages, qui permet de sélectionner, parmi de multiples stimuli, les informations pertinentes pour la tâche en cours et d'inhiber les distracteurs. Adele Diamond (2013) distingue trois

composantes attentionnelles, qui se développent progressivement au cours de l'enfance et de l'adolescence :

1. Le contrôle inhibiteur, qui permet de résister aux impulsions et tentations, de bloquer les automatismes et les interférences. Il est essentiel pour maintenir son attention et son comportement vers un but
2. La mémoire de travail, qui permet de retenir et manipuler mentalement des informations. Elle sous-tend le raisonnement, la résolution de problèmes, la compréhension.
3. La flexibilité cognitive, qui permet de changer de tâche, de stratégie, de perspective. Elle est liée à la créativité et à l'adaptation.

Ces trois composantes, bien que distinctes, opèrent en étroite interaction et ont des soubassements cérébraux communs, notamment dans le cortex préfrontal (Diamond, 2013). Un des premiers modèles influents de l'attention a été proposé par Michael Posner dans les années 1980. Le modèle de Posner divise l'attention en trois réseaux fonctionnels et anatomiques distincts :

- Le réseau d'alerte, qui maintient un état de vigilance
- Le réseau d'orientation, qui sélectionne des informations sensorielles spécifiques

- Le réseau exécutif, qui résout les conflits entre les réponses

Ces réseaux interagissent mais sont relativement indépendants. Le modèle de Posner a permis de mieux comprendre les bases neurales de l'attention et ses différentes composantes. Akira Miyake et ses collègues (2000) ont ensuite proposé un modèle intégratif du contrôle attentionnel, qui rend compte à la fois de l'unité et de la diversité des fonctions exécutives. Selon eux, le contrôle attentionnel comporte trois facettes, partiellement indépendantes :

- La mise à jour (updating), qui renvoie au monitoring et au codage des informations entrantes pertinentes pour la tâche, et à l'actualisation continue des représentations en mémoire de travail.
- La flexibilité (shifting), qui permet de basculer entre différentes tâches, opérations ou registres mentaux.
- L'inhibition, qui intervient lorsqu'il faut délibérément bloquer une réponse dominante ou automatique.

Des études en imagerie cérébrale ont montré que ces trois facettes reposent sur des réseaux neuronaux en partie distincts, tout en ayant une base commune dans le cortex préfrontal (Collette et al., 2005). Le

modèle de Miyake complète celui de Posner (1990) en détaillant les processus de contrôle attentionnel. Les deux modèles sont complémentaires et permettent une compréhension plus fine du fonctionnement de l'attention, à la fois dans ses aspects unitaires et diversifiés. Ils montrent que l'attention repose sur un réseau cérébral distribué, avec des composantes spécialisées interagissant de façon dynamique. Chez les adolescents, le contrôle attentionnel est encore en développement, ce qui explique leur plus grande distractibilité et leur difficulté à inhiber certains comportements (Blakemore & Choudhury, 2006). Leur mémoire de travail et leur flexibilité cognitive sont également plus limitées que celles des adultes. Des aménagements pédagogiques sont donc nécessaires pour soutenir leur attention : consignes claires et séquencées, guidage pas à pas, réduction des interférences, feedbacks fréquents...

L'étude récente de Hobbiss & Lavie (2024) apporte un éclairage nouveau sur la trajectoire développementale des capacités attentionnelles à l'adolescence. En utilisant une tâche unique mesurant à la fois l'attention sélective et l'attention soutenue, sous différents niveaux de charge perceptive, les auteurs ont pu comparer finement l'évolution de ces deux composantes attentionnelles. Leurs résultats établissent que l'attention soutenue, mesurée par la variabilité des temps de réponse, continue de se

développer tout au long de l'adolescence, quel que soit le niveau de charge perceptive. En revanche, ils mettent en évidence une maturation plus précoce de l'attention sélective : l'effet modulateur de la charge perceptive sur l'interférence des distracteurs est plus marqué en début d'adolescence que dans les périodes ultérieures. Ces données suggèrent une trajectoire développementale différenciée pour l'attention sélective et l'attention soutenue, la première arrivant à maturité plus tôt que la seconde. Elles nous invitent à une interprétation nuancée des patterns de résultats que nous observerons dans notre propre étude.

Ainsi, une amélioration plus marquée des performances attentionnelles dans la condition de faible charge perceptive pourrait refléter un renforcement de l'attention sélective, déjà bien développée à cet âge. À l'inverse, une progression des scores dans la condition de forte charge, requérant le maintien d'un effort attentionnel, signerait plutôt un gain en attention soutenue, encore en cours de maturation. De plus, Hobbiss & Lavie ont montré que l'interférence des distracteurs et la variabilité des réponses étaient deux prédicteurs indépendants de la distractibilité en classe, y compris en contrôlant le niveau d'intérêt pour le cours et les aptitudes cognitives générales. Cela souligne la validité écologique de ces deux mesures et leur pertinence pour rendre compte de l'attention en situation scolaire

réelle.

L'effet de l'environnement et du contexte culturel

Les travaux de Mohamed Er-Rafiqi et ses collègues (2017) nous invitent à ne pas considérer le développement cognitif et les apprentissages comme purement "cérébraux", mais à prendre en compte l'influence du contexte social et culturel. S'appuyant sur la notion de "cognition située", ils montrent que les compétences attentionnelles, mnésiques, exécutives sont largement façonnées par les expériences et stimulations de l'environnement. Ainsi, la culture d'origine, à travers les pratiques éducatives parentales, les modes de communication, les outils et artefacts utilisés, va modeler certains processus cognitifs (Er-Rafiqi et al., 2017). Par exemple, les cultures occidentales, qui valorisent l'autonomie et l'expression individuelle, favoriseraient le développement du contrôle inhibiteur. À l'inverse, les cultures orientales, qui mettent l'accent sur l'harmonie collective et le contrôle de soi, solliciteraient davantage la mémoire de travail.

De même, le contexte scolaire, avec ses activités, ses supports, ses modes d'interactions, va orienter l'utilisation et le développement de certaines fonctions cognitives (Er-Rafiqi et al., 2017). Un enseignement frontal et transmissif stimulera peu les capacités attentionnelles et exécutives des élèves, contrairement à

une pédagogie active et coopérative.

Il est donc essentiel de prendre en compte ces variables contextuelles dans l'étude des processus d'apprentissage, en particulier à l'adolescence où les influences sociales (famille, pairs, médias...) sont prégnantes. Les neurosciences gagneront à dialoguer avec l'anthropologie, la sociologie, les sciences de l'éducation pour mieux comprendre comment le cerveau apprend en interaction avec son environnement.

La théorie du flow et les corrélats neuronaux de l'attention

La théorie du flow, développée par Mihaly Csikszentmihalyi (1990), offre un éclairage intéressant sur les conditions d'un apprentissage optimal. Le flow désigne un état de concentration et d'absorption totale dans une activité, qui s'accompagne d'un sentiment de contrôle, de satisfaction et de perte de la notion du temps. Cet état survient lorsqu'il y a un équilibre entre le défi perçu et les compétences perçues, c'est-à-dire lorsque la tâche est suffisamment difficile pour être stimulante mais pas au point d'être décourageante.

Des études en électroencéphalographie (EEG) ont montré que l'état de flow s'accompagne d'une augmentation des ondes cérébrales alpha (8-12 Hz) dans les régions frontales et pariétales (Katahira et al., 2018 ; Ulrich et al., 2014). Ces ondes alpha sont connues pour être associées à

un état de relaxation vigilante et de concentration soutenue. Leur synchronisation accrue reflèterait une bonne coordination des réseaux attentionnels.

D'autres travaux ont mis en évidence le rôle des ondes thêta (4-7 Hz) dans les processus attentionnels et mnésiques (Klimesch, 1999 ; Sauseng et al., 2010). Une puissance thêta élevée dans les régions frontales médianes serait liée à une allocation accrue des ressources attentionnelles et à un encodage efficace en mémoire. Là encore, un certain niveau de synchronisation des ondes thêta semble nécessaire pour un fonctionnement cognitif optimal.

Plus récemment, des chercheurs de l'EPFL (Boulay et al., 2011 ; Bréchet et al., 2019) ont montré que l'état attentionnel s'accompagne également d'une plus grande cohérence cardiaque, c'est-à-dire d'une synchronisation entre le rythme cardiaque et le rythme respiratoire. Cette cohérence cardiaque, mesurable par la variabilité du rythme cardiaque (VRC), serait un marqueur de la bonne régulation entre le système nerveux sympathique (activation) et parasympathique (relaxation). Un état de cohérence optimale permettrait une meilleure gestion du stress et de l'attention.

Ainsi, les corrélats neurophysiologiques de l'attention et de l'apprentissage optimal semblent être :

- Une synchronisation accrue des ondes cérébrales alpha dans les régions frontales et pariétales (Katahira et al., 2018 ; Ulrich et al., 2014) ;
- Une puissance élevée des ondes thêta dans les régions frontales médianes (Klimesch, 1999 ; Sauseng et al., 2010).
- Une bonne cohérence cardiaque, reflet de l'équilibre sympathique/parasympathique (Boulay et al., 2011 ; Bréchet et al., 2019).

Ces marqueurs pourraient servir à évaluer "en temps réel" la qualité de l'engagement attentionnel des apprenants et à adapter en conséquence les pratiques pédagogiques. Ils ouvrent aussi des pistes de recherche pour mieux comprendre les bases cérébrales et physiologiques des états d'apprentissage et de créativité optimaux.

Le développement socio-affectif de l'adolescent

Les neurosciences affectives et sociales nous apportent un nouvel éclairage sur le développement émotionnel et relationnel des adolescents, qui joue un rôle clé dans leur rapport aux apprentissages (Blakemore, 2008 ; Crone & Dahl, 2012 ; Fuhrmann et al., 2015).

L'adolescence est une période de maturation cérébrale importante, en

particulier dans les régions préfrontales impliquées dans la régulation émotionnelle et le contrôle des impulsions (Casey et al., 2008). Cette maturation prolongée explique en partie l'instabilité émotionnelle et la quête de sensations des adolescents. En parallèle, on observe une hyperactivation des régions limbiques, comme l'amygdale, impliquées dans la détection des stimuli émotionnels et dans les réactions de stress (Guyer et al., 2008). Cette hyperréactivité émotionnelle peut interférer avec les processus d'apprentissage et de mémorisation, en monopolisant les ressources attentionnelles.

Au niveau social, l'adolescence est marquée par une sensibilité accrue au regard et au jugement des pairs (Somerville, 2013). Le besoin d'affiliation et de reconnaissance par le groupe peut favoriser des comportements de conformisme et de prise de risque. Mais il peut aussi être un levier de motivation et d'engagement dans les apprentissages, lorsque ceux-ci sont valorisés socialement.

Sur le plan interpersonnel, les adolescents acquièrent progressivement de meilleures compétences de mentalisation, c'est-à-dire de compréhension des états mentaux d'autrui (pensées, émotions, intentions...). Cette "théorie de l'esprit" plus fine leur permet des interactions plus empathiques et ajustées (Blakemore, 2008). Elle soutient aussi le développement du raisonnement moral et du jugement social.

Enfin, l'adolescence est une période clé pour la construction identitaire, avec des enjeux d'autonomisation, d'individuation et d'orientation (Marcia, 1966). La quête de sens et de valeurs personnelles peut être un puissant moteur d'apprentissage, lorsque les savoirs enseignés entrent en résonance avec les interrogations existentielles des adolescents.

Ainsi, loin d'être un simple "réceptacle" d'informations, le cerveau adolescent est en plein remaniement, sous l'influence combinée de la maturation biologique et des expériences socio-émotionnelles. Cette plasticité à la fois neurologique et psychologique offre une formidable opportunité pour les apprentissages, à condition que ceux-ci s'inscrivent dans une "pédagogie du sens et du lien" (Cornu, 2011).

Neurosciences, processus d'apprentissage & (neuro)éducation

Les neurosciences ont identifié plusieurs régions cérébrales clés pour les apprentissages qui se développent particulièrement à l'adolescence (Dehaene, 2018; Houdé, 2018; Klingberg, 2013; Pasquinelli, 2015; Sander et al., 2003; Toscani, 2017) :

- Le cortex préfrontal, siège des fonctions exécutives (planification, prise de décision, raisonnement abstrait, flexibilité cognitive, régulation émotionnelle). Sa

maturation se poursuit jusqu'au début de l'âge adulte, expliquant certaines difficultés attentionnelles et d'inhibition des adolescents (Houdé, 2014, 2018 ; Klingberg, 2013; Toscani, 2017). Des activités pédagogiques stimulant la réflexion critique, la résolution de problèmes complexes et la gestion de projet permettent de renforcer ces capacités (Houdé, 2014; Klingberg, 2013; Toscani, 2017)

- L'hippocampe, structure essentielle pour la formation de nouvelles traces mnésiques et leur consolidation en mémoire à long-terme, en particulier la mémoire épisodique et spatiale. Son volume et ses circuits neuronaux se réorganisent, améliorant les capacités d'apprentissage (Houdé, 2018; Toscani, 2017). Les cartes mentales, schémas heuristiques, jeux de piste stimulent l'hippocampe.
- L'amygdale, qui traite les émotions et la mémoire émotionnelle. Son hyperactivation chez l'adolescent face aux expressions émotionnelles, surtout négatives, explique leur plus grande réactivité affective (Houdé, 2018; Sander et al., 2003; Toscani, 2017). Intégrer des contenus émotionnellement engageants (récits personnels,

œuvres artistiques, débats de société) améliore la rétention mnésique en stimulant l'amygdale, sans surexposer à des situations trop intenses qui perturberaient les apprentissages (Immordino-Yang & Damasio, 2007; Sander, 2015).

- La neuroplasticité, capacité du cerveau à se remodeler en fonction des expériences vécues, est maximale durant l'enfance et l'adolescence (Houdé, 2018; Pasquinelli, 2015; Toscani, 2017). Des activités répétées, progressives et adaptées permettent de façonner les réseaux neuronaux. L'apprentissage par essais/erreurs et les approches constructivistes ou expérientielles sont propices à induire des modifications neuroplastiques (Klingberg, 2013; Toscani, 2013, 2017).

Pratiquer régulièrement des activités artistiques (musique, arts visuels, théâtre) et sportives a des effets bénéfiques démontrés sur le développement cérébral et les capacités d'apprentissage, en stimulant de vastes réseaux neuronaux (Sander et al., 2003; Toscani, 2017). Les intégrer aux programmes scolaires optimise le potentiel d'apprentissage.

Les expériences en milieu naturel, même brèves, réduisent le stress et la fatigue mentale, améliorant l'attention soutenue et

sélective en diminuant l'activité du système nerveux sympathique (Toscani, 2013, 2017). Promouvoir les activités éducatives en extérieur offre des avantages cognitifs et émotionnels.

En résumé, tenir compte du fonctionnement cérébral des adolescents, en particulier des régions clés comme le cortex préfrontal, l'hippocampe et l'amygdale, permet de concevoir des environnements scolaires et des pratiques pédagogiques adaptés. L'enjeu est de tirer parti de la grande plasticité cérébrale à cet âge en proposant des activités stimulantes et diversifiées, pour favoriser un développement harmonieux des élèves sur les plans cognitif, émotionnel, sensorimoteur et du bien-être. Les neurosciences peuvent y contribuer, en dialogue avec les sciences de l'éducation (Dehaene, 2018; Houdé, 2018). Un dialogue interdisciplinaire entre neurosciences et sciences de l'éducation est nécessaire pour construire une véritable "neuropédagogie" au service des apprentissages, prenant en compte la globalité de l'apprenant (Bourassa et al., 2021).

Méthode

Opérationnalisation des modèles théoriques dans l'étude actuelle

Les différentes théories et modèles présentés dans ce cadre théorique, issus des neurosciences cognitives, de la

psychologie et des sciences de l'éducation, offrent des clés de lecture complémentaires pour comprendre les processus d'apprentissage à l'adolescence et guider le design de notre étude.

Tout d'abord, les "piliers de l'apprentissage" identifiés par Dehaene et son équipe (2013) - attention, engagement actif, retour d'information et consolidation - constituent des principes directeurs pour concevoir un entraînement attentionnel et métacognitif adapté aux spécificités des apprenants adolescents. Notre intervention visera ainsi à capter l'attention des élèves par des exercices ludiques et stimulants, à favoriser leur engagement par des tâches interactives et incarnées, à leur fournir des feedbacks immédiats et clairs, et à ménager des temps de réactivation et de répétition espacée pour consolider les acquis. Nous serons attentifs à la "zone proximale de développement" des adolescents, en proposant des activités ni trop faciles (risque de désengagement) ni trop difficiles (risque de surcharge cognitive et de démotivation).

Les "filtres de l'apprentissage" mis en évidence par Bourassa nous invitent à considérer les dimensions non seulement cognitives, mais aussi métacognitives et affectives qui conditionnent la réussite scolaire. Notre protocole inclura donc des mesures du sentiment d'efficacité personnelle, de la motivation et du stress perçu des élèves, en plus des évaluations

neuropsychologiques classiques. Nous veillerons à proposer des activités qui renforcent l'estime de soi et le sentiment de contrôle des adolescents sur leurs apprentissages, tout en travaillant sur leurs stratégies métacognitives de planification, de surveillance et de régulation. L'empowerment métacognitif que nous proposons à un sous-groupe vise précisément à agir sur ces leviers psychoaffectifs et motivationnels.

Les modèles de l'attention de Posner (1990) et de Miyake (2000) nous fournissent un cadre conceptuel précis pour analyser les différentes facettes de l'attention (alerte, orientation, contrôle exécutif) et leurs bases neurales. Ils sous-tendent le choix de nos tests neuropsychologiques et guideront l'interprétation des patterns de résultats, en lien avec la maturation prolongée du cortex préfrontal à l'adolescence. Nous pourrions ainsi mieux comprendre les forces et les vulnérabilités attentionnelles propres à cette période développementale, et ajuster en conséquence le contenu et le rythme de notre entraînement. À la lumière de l'éclairage récent de Hobbiss & Lavie (2024), nous serons attentifs, dans l'analyse de nos propres données, à examiner séparément l'évolution de l'attention sélective et de l'attention soutenue et de leur valeur prédictive vis-à-vis de l'engagement attentionnel des élèves en classe. Cela nous permettra d'affiner notre compréhension des

mécanismes sous-tendant les bénéfices éventuels de notre intervention, en lien avec la maturation différentielle des composantes attentionnelles à l'adolescence.

Les travaux sur le rôle de l'environnement et du contexte culturel dans le développement cognitif nous rappellent que les fonctions attentionnelles et exécutives ne se déploient pas dans un vide social, mais sont profondément façonnées par les expériences et les interactions de l'élève. Notre étude prendra en compte des variables contextuelles comme le niveau socio-économique, les pratiques éducatives familiales et le type d'établissement scolaire, qui peuvent moduler les effets de l'entraînement. Nous serons aussi attentifs à la façon dont le style pédagogique et le climat de classe influencent l'engagement attentionnel et la motivation des élèves. Des entretiens avec les enseignants et les parents viendront éclairer ces aspects.

Enfin, la théorie du flow de Csikszentmihalyi (1990) et les recherches sur les corrélats neurophysiologiques de l'attention nous offrent des pistes prometteuses pour évaluer la qualité de l'engagement attentionnel en situation, et pas seulement "hors sol" via des tests décontextualisés. L'analyse des rythmes cérébraux (ondes thêta et alpha) et de la cohérence cardiaque des élèves pendant les séances d'entraînement nous

renseignera sur leur niveau d'absorption et de concentration, en lien avec le défi perçu et le plaisir ressenti. Ces marqueurs pourront à terme servir à ajuster en temps réel les paramètres de l'entraînement (difficulté, rythme, feedbacks...) pour maintenir les apprenants dans leur "zone optimale de fonctionnement".

Modèles théoriques & interprétation des résultats

Au moment d'analyser et de discuter les résultats de notre étude, ces différents éclairages théoriques nous permettront d'aller au-delà d'une simple comparaison avant/après et inter- groupes des performances attentionnelles et scolaires. Nous pourrions interroger les mécanismes sous-jacents aux éventuels progrès observés, en examinant finement l'évolution des différentes composantes attentionnelles et de leurs soubassements cérébraux. Les modèles de Posner et de Miyake nous serviront ainsi de grille de lecture pour interpréter les patterns de résultats aux tests neuropsychologiques et électroencéphalographiques, en lien avec la maturation préfrontale. Les résultats de Hobbiss & Lavie (2024) sur la trajectoire développementale différenciée de l'attention sélective et soutenue à l'adolescence nous invitent à une interprétation nuancée des patterns de résultats que nous observerons. Une amélioration plus marquée des performances attentionnelles dans la

condition de faible charge perceptive pourrait refléter un renforcement de l'attention sélective, déjà bien développée à cet âge. À l'inverse, une progression des scores dans la condition de forte charge, requérant le maintien d'un effort attentionnel, signerait plutôt un gain en attention soutenue, encore en cours de maturation.

Cependant, comme le souligne Masi (2023) dans sa revue critique, il faut se garder d'une vision trop réductionniste qui assimilerait directement les performances attentionnelles à la seule maturation cérébrale. L'auteur met en garde contre les approches qui font de la conscience et de la cognition de purs épiphénomènes de l'activité neuronale. Il plaide pour une vision plus intégrative considérant les influences réciproques entre le cerveau, le corps et l'environnement dans l'émergence des processus mentaux. Ainsi, le développement de l'attention à l'adolescence ne peut se réduire à la seule maturation du cortex préfrontal, mais doit être compris dans une dynamique complexe impliquant des facteurs biologiques, psychologiques et socioculturels. Les expériences vécues, les interactions sociales, le contexte scolaire façonnent tout autant les capacités attentionnelles que le calendrier de maturation cérébrale.

Notre dispositif, croisant des mesures neuropsychologiques,

neurophysiologiques et psychoaffectives, et intégrant le point de vue des enseignants et des parents, nous permettra d'avoir cette lecture multidimensionnelle du développement attentionnel. Loin d'un déterminisme neurobiologique strict, nous considérerons la plasticité et la perméabilité du cerveau adolescent aux influences de son environnement.

Les apports croisés des neurosciences cognitives, de la psychologie et des sciences sociales nous inviteront ainsi à dépasser une vision purement "mécaniste" des effets de l'entraînement attentionnel, pour resituer le développement de l'adolescent dans toute sa complexité et sa singularité. C'est dans le dialogue interdisciplinaire que nous pourrons construire une compréhension intégrative et nuancée des ressorts de l'attention et de ses troubles à cet âge crucial. La prise en compte des filtres conatifs (motivation, sentiment de compétence, autorégulation...) éclairera les différences inter-individuelles de réceptivité à l'intervention, au-delà des seules aptitudes cognitives. Les données psychoaffectives recueillies permettront d'identifier d'éventuels sous-groupes d'élèves "répondeurs" et "non-répondeurs", et de mieux comprendre les facteurs favorisant ou entravant les bénéfices de l'entraînement. De même, l'analyse des déterminants contextuels (familiaux, socio-économiques, pédagogiques) contribuera à expliquer la variabilité des trajectoires

développementales.

La mise en perspective des résultats avec la théorie du flow et les corrélats neurophysiologiques de l'attention ouvrira des pistes de discussion sur les ingrédients d'un engagement attentionnel optimal. On pourra notamment examiner dans quelle mesure les séances d'entraînement ont réussi à induire un état de flow chez les participants (équilibre défi/compétence, concentration, plaisir...), et avec quelles conséquences sur les progrès réalisés. Les mesures de cohérence cardiaque et de rythmes cérébraux viendront étayer ces interprétations sur le plan psychophysiologique.

Plus largement, les apports croisés des neurosciences cognitives, de la psychologie et des sciences de l'éducation nous inviteront à dépasser une vision purement "mécaniste" des effets de l'entraînement, pour considérer l'adolescent apprenant dans sa globalité, avec ses spécificités neurophysiologiques mais aussi psychoaffectives et socioculturelles. La mobilisation de ces différents niveaux d'analyse permettra une compréhension intégrative des conditions d'efficacité de l'intervention, ouvrant vers des pistes d'optimisation et d'implémentation sur le terrain scolaire.

Cette étude s'inscrit ainsi dans une perspective de recherche translationnelle, articulant des modèles théoriques issus de différents champs disciplinaires pour

concevoir, évaluer et améliorer des dispositifs innovants au service des apprentissages et de l'épanouissement des élèves. Son ambition est de contribuer au dialogue entre neurosciences et éducation, en montrant comment les avancées scientifiques sur le cerveau adolescent peuvent inspirer des pratiques pédagogiques plus ajustées, sans pour autant s'y réduire. Car c'est bien dans l'interaction complexe entre des facteurs neurobiologiques, psychologiques, socioculturels et anthropologiques que se joue le devenir scolaire et personnel de chaque élève, appelant une approche résolument multidimensionnelle et contextualisée.

Protocole d'implémentation

Pour étudier l'impact d'un entraînement attentionnel et métacognitif sur les capacités d'apprentissage et le vécu scolaire des adolescents, nous mettrons en place le protocole de recherche suivant :

- Nous recruterons un échantillon de 600 élèves du secondaire 1 du Canton du Tessin (Suisse), âgés de 11 à 15 ans. Ils seront répartis aléatoirement en trois groupes:
- Un groupe bénéficiera d'un entraînement attentionnel décontextualisé, sous forme d'exercices informatisés ciblant les différentes facettes de l'attention (alerte, orientation, contrôle exécutif).
- Un deuxième groupe suivra le même entraînement attentionnel, mais avec en plus un empowerment métacognitif : des ateliers visant à développer leurs connaissances métacognitives et leurs stratégies de régulation des apprentissages.
- Un troisième groupe contrôle (deux sous-groupes) ne recevra aucun entraînement spécifique et suivra les enseignements habituels (l'un des deux bénéficiera de laboratoires métacognitifs).
- L'intervention se déroulera sur une période de 8 semaines, à raison de 2 séances d'entraînement de 30 minutes par semaine, intégrées dans l'emploi du temps scolaire.
- Avant et après l'intervention, tous les participants passeront une batterie de tests neuropsychologiques évaluant leurs capacités attentionnelles (attention soutenue, sélective, divisée), mnésiques (mémoire de travail, mémoire à long terme) et exécutives (inhibition, flexibilité, planification).
- Nous récolterons également leurs résultats scolaires dans les principales matières (langue maternelle, mathématiques,

sciences) ainsi que des indicateurs de leur engagement scolaire (participation en classe, devoirs à domicile, absentéisme).

- En parallèle, des mesures neurophysiologiques seront effectuées sur un sous-échantillon de 60 élèves (20 par groupe), volontaires pour participer à des enregistrements EEG. Nous analyserons notamment les rythmes cérébraux (puissance et cohérence des ondes thêta et alpha) et les patterns d'exploration visuelle lors de tâches attentionnelles, afin d'objectiver d'éventuelles modifications du fonctionnement cérébral et cognitif.
- Sur le plan du vécu scolaire, les participants rempliront avant et après l'intervention des questionnaires évaluant leur niveau de stress perçu face aux apprentissages, leur sentiment d'efficacité personnelle, leur motivation intrinsèque/extrinsèque, ainsi que la valence émotionnelle associée aux principales disciplines. Plus spécifiquement, ils auto-évalueront sur une échelle de Likert en 4 points leur niveau de stress ressenti face à la tâche expérimentale (passation des tests neuropsychologiques) ainsi qu'en situation d'apprentissage scolaire

(en classe et lors des devoirs à domicile). Cela nous permettra de suivre l'évolution de leur état affectif et motivationnel au fil de l'intervention.

- Des entretiens semi-directifs seront menés avec un panel d'enseignants et de parents, afin de recueillir leur perception des éventuels changements observés chez les élèves sur le plan attentionnel, comportemental et psychoaffectif.

L'analyse des données combinera des approches quantitatives (comparaison des performances et des scores avant/après et inter-groupes, corrélations entre les différentes mesures) et qualitatives (analyse thématique du contenu des entretiens). Pour gérer la complexité des données multiples (tests neuropsychologiques, EEG, questionnaires, entretiens), nous mettrons en place une base de données sécurisée et centralisée. Chaque participant se verra attribuer un code d'identification unique pour anonymiser les données

Pour favoriser l'engagement et la rétention des participants sur les 8 semaines nous proposerons une liste d'applications mobiles ainsi qu'un protocole agile à l'attention des familles pour le suivi des entraînements à domicile :

- Séances ludiques et interactives, utilisant des supports numériques

attractifs

- Feedbacks personnalisés et encourageants après chaque séance ;
- Récompenses symboliques (badges, points) pour valoriser les progrès
- Communications régulières avec les familles et les enseignants ;
- Possibilité de rattrapage des séances manquées ;
- Entretiens motivationnels en cas de décrochage.

Des partenariats seront établis avec les établissements scolaires participants :

- Co-construction du projet avec les équipes éducatives
- Formation des enseignants à l'accompagnement des élèves
- Mise à disposition de matériel informatique
- Suivi régulier par un référent-recherche au sein de l'école
- Ateliers de restitution des résultats aux élèves, parents et enseignants

Nous attendons comme résultats une amélioration plus marquée des capacités attentionnelles et exécutives dans les deux groupes entraînés, avec un bénéfice

supplémentaire dans le groupe ayant reçu l'empowerment métacognitif. Cela devrait se traduire par de meilleures performances aux tests, une augmentation de l'engagement scolaire et une diminution du stress perçu, en particulier face aux apprentissages. Sur le plan neurophysiologique, nous prédisons une augmentation de la puissance des ondes thêta et alpha dans les régions frontales et pariétales, ainsi qu'une meilleure synchronisation de ces rythmes, témoignant d'un renforcement du contrôle attentionnel et d'une régulation émotionnelle plus efficiente.

Notre dispositif, combinant des approches comportementales, neurophysiologiques et psychoaffectives, et croisant le regard des élèves, des enseignants et des parents, nous permettra d'évaluer les effets d'un entraînement attentionnel et métacognitif à court et moyen terme sur les capacités d'apprentissage et le bien-être scolaire des adolescents.

Cette étude pourrait ouvrir des pistes pour le développement de programmes de remédiation cognitive et motivationnelle, basés sur les neurosciences et adaptés aux besoins spécifiques des élèves du secondaire. Elle s'inscrit dans une perspective de neuropédagogie appliquée, visant à optimiser les conditions d'apprentissage en prenant en compte le fonctionnement cérébral et psychoaffectif des apprenants.

Premiers résultats

Ce chapitre présente une synthèse des actions déjà mises en place entre juillet et octobre 2024 et celles prévues dans les prochains mois concernant la *Phase 1* du projet.

Pas accomplis

1. Élaboration du protocole expérimental détaillé, incluant :

- ✓ La définition précise de l'échantillon : 600 élèves du secondaire 1 (11-15 ans) au Tessin
- ✓ La répartition aléatoire en 4 groupes : Entraînement Attentionnel (EA), EA + Empowerment Métacognitif (EA+EM), et Contrôle (C1=enseignement habituel, C2=enseignement habituel + EM)
- ✓ Le calendrier des différentes phases sur plusieurs mois, de la préparation au suivi post-intervention

2. Sélection et adaptation des outils de mesure :

- ✓ Evaluation des fonctions exécutives : mini-jeux du type Adaptive Cognitive Evaluation Explorer (<https://neuroscope.ucsf.edu/researchers-ace/>) en collaboration avec les université de Genève (Suisse) et de San Francisco (USA)

- ✓ Tests neuropsychologiques : Échelle multidimensionnelle du concept de soi (MSCS) de Bracke.

- ✓ Questionnaires : AMOS 8-15 pour évaluer les habiletés d'étude et la motivation

- ✓ Mesures physiologiques : EEG portable NeuroSky MindWave

3. Adaptation du jeu sérieux "Skies of Manawak" pour l'entraînement attentionnel en collaboration avec les Université de Genève (Suisse) et de Trento (Italie)

4. Sélection d'applications mobiles complémentaires pour le suivi à domicile

5. Élaboration des protocoles spécifiques :

- ✓ Protocole pour les ateliers métacognitifs en collaboration avec l'université de Padova (Italie)

- ✓ Protocole agile pour l'utilisation des applications à la maison

6. Création des outils de collecte de données :

- ✓ Grilles d'observation pour les enseignants

- ✓ Guide d'entretien semi-directif pour les enseignants et les parents

7. Communication :

- ✓ Organisation de réunions

d'information pour les enseignants

Actions planifiées pour les prochains mois

1. Recrutement et formation :

- Finalisation du recrutement des 600 élèves participants
- Formation des enseignants à l'accompagnement des élèves et au protocole de recherche en collaboration avec la HEP du Tessin
- Recrutement et formation des assistants de recherche pour la collecte de données (superviseurs)

2. Mise en place logistique :

- Installation du matériel informatique et des casques EEG dans les établissements participants
- Configuration des applications mobiles sur les appareils des élèves
- Préparation des infographies pour les ateliers métacognitifs

3. Communication et consentement :

- Organisation de réunions d'information pour les élèves et leurs parents
- Obtention des consentements éclairés des participants et de leurs parents dans le cas de l'enregistrement de EEG

4. Tests pilotes :

- Réalisation de tests pilotes du protocole complet avec un petit groupe d'élèves volontaires
- Ajustements éventuels des procédures et des outils suite aux retours des tests pilotes

5. Préparation de l'analyse des données :

- Finalisation du plan d'analyse statistique
- Mise en place de la base de données sécurisée pour centraliser les informations recueillies

6. Planification détaillée :

- Élaboration du planning précis des interventions dans chaque établissement
- Organisation logistique des déplacements de l'équipe de recherche

7. Aspects éthiques :

- Soumission du protocole final au comité d'éthique de la recherche pour approbation
- Mise en place des procédures de confidentialité et de protection des données personnelles

8. Partenariats :

- Finalisation des accords avec les instances universitaires pour la collaboration pour le suivi scientifique du projet

Cette phase préparatoire minutieuse vise à garantir la rigueur scientifique du dispositif de recherche-action et à optimiser les conditions de sa mise en œuvre. Elle permettra d'aborder sereinement la phase d'expérimentation proprement dite, en ayant anticipé et résolu un maximum de difficultés potentielles.

Discussion et perspectives

Nous faisons l'hypothèse qu'un travail explicite sur les stratégies attentionnelles et métacognitives, en lien avec les contenus disciplinaires, peut favoriser l'engagement actif des élèves et le transfert des compétences. Nous pensons aussi qu'une meilleure connaissance par les élèves de leur fonctionnement cognitif et émotionnel peut renforcer leur sentiment de contrôle et d'efficacité personnelle face aux apprentissages.

Mais au-delà des performances scolaires, c'est bien la question du rapport au savoir et du sens des apprentissages qui est en jeu. En cette période de construction identitaire, il est crucial que les adolescents puissent se projeter dans les savoirs enseignés et y trouver des points d'ancrage pour leur développement personnel et social. Cela nécessite de la part des enseignants une posture réflexive sur leurs

pratiques pédagogiques, afin de les ajuster aux besoins et aux aspirations de leurs élèves.

Les neurosciences ne sont pas une panacée éducative, mais elles peuvent contribuer, en dialogue avec les sciences humaines et sociales, à faire évoluer le regard sur les adolescents et sur les processus d'apprentissage. Elles invitent à dépasser les représentations figées et souvent négatives de cette période de la vie, pour en saisir toute la richesse et le potentiel de développement. Elles incitent aussi à concevoir des pédagogies qui respectent les rythmes biologiques et psychologiques des élèves, tout en les stimulant dans leur zone proximale de développement.

Au-delà de ses aspects strictement scientifiques, ce projet de recherche soulève des questions éthiques et sociétales qu'il convient d'explicitier et de mettre en débat. Tout d'abord, l'utilisation des neurosciences en éducation ne va pas de soi et doit être questionnée. Comme le souligne le philosophe Michel Fabre (2015), il existe un risque de "naturalisation" des processus d'apprentissage, qui réduirait l'acte éducatif à un simple "formatage" du cerveau. Les neurosciences peuvent nous éclairer sur les mécanismes cérébraux sous-jacents aux apprentissages, mais elles ne disent rien des finalités de l'éducation, qui relèvent d'un choix politique et d'un projet de

société.

Il importe donc de ne pas confondre les moyens et les fins, et de toujours resituer les apports des neurosciences dans une réflexion pédagogique et didactique plus large. Le cerveau n'est pas une machine à optimiser, mais le support biologique d'un sujet apprenant, doté d'une histoire, d'une culture, d'un rapport singulier au savoir. Prendre en compte cette subjectivité, dans une relation pédagogique empathique et bienveillante, est la condition d'un apprentissage véritablement émancipateur. Les travaux récents de Caballero-Gaudes et al. (2023) et Sydnor et al. (2023) nous invitent justement à resituer le développement cérébral dans une perspective plus large, prenant en compte les influences de l'environnement socio-économique. Caballero-Gaudes et al. (2023) ont montré que la connectivité fonctionnelle fronto-pariétale, cruciale pour le contrôle cognitif, variait en fonction du statut socio-économique des adolescents. Ceux issus de milieux défavorisés présentaient une connectivité moins efficace, pouvant expliquer en partie leurs moindres performances exécutives.

De même, Sydnor et al. (2023) ont mis en évidence une séquence développementale du cerveau, avec une réduction de la plasticité d'abord dans les régions sensorimotrices, puis dans les régions associatives préfrontales. Or cette maturation prolongée des aires

préfrontales les rend particulièrement sensibles aux influences environnementales, notamment socio-économiques, en début d'adolescence. Les inégalités sociales impacteraient donc la trajectoire neurodéveloppementale elle-même. Un autre risque serait de réduire la réussite scolaire à une simple question de "potentiel cognitif", en occultant le poids des déterminismes sociaux et des inégalités culturelles. Comme l'a montré Bourdieu, l'école tend à reproduire les hiérarchies sociales en valorisant implicitement les codes et les prérequis des classes dominantes. Un entraînement cognitif, aussi efficace soit-il, ne peut à lui seul compenser ces handicaps socioculturels. Il doit s'accompagner d'une réflexion critique sur les pratiques pédagogiques et les contenus enseignés, pour les rendre plus inclusifs et émancipateurs. Ces résultats nous rappellent qu'un entraînement cognitif, aussi efficace soit-il, ne peut à lui seul compenser les handicaps socioculturels. Il doit s'accompagner d'une réflexion critique sur les pratiques pédagogiques et les contenus enseignés, pour les rendre plus inclusifs et émancipateurs. La focalisation sur les compétences attentionnelles comporte le risque d'une vision individualiste et "entrepreneuriale" de la réussite, qui ferait porter à l'élève seul la responsabilité de ses apprentissages. Or, apprendre est fondamentalement un acte social et relationnel, qui engage une communauté éducative et une société tout

entière. C'est en agissant sur les contextes et les interactions, et non seulement sur les individus, que l'on peut espérer réduire les inégalités scolaires. Une approche neurodéveloppementale doit donc impérativement s'articuler avec une lecture sociologique des processus d'apprentissage.

Enfin, l'usage des neurotechnologies en milieu éducatif soulève des questions de vie privée et de consentement éclairé. Le recueil de données cérébrales, même avec l'accord des participants, n'est pas anodin et doit être strictement encadré. Il faut veiller à ce que ces données ne soient pas détournées à des fins de sélection ou de prédiction des performances, ce qui reviendrait à assigner les élèves à un destin neurobiologique. Chaque apprenant doit rester maître de son "identité cérébrale" et de l'usage qui en est fait.

C'est à la croisée des regards, dans un dialogue interdisciplinaire exigeant, que pourra se construire une "neuropédagogie" véritablement au service des élèves et de leur développement global. Une pédagogie qui, loin des mirages technologiques et des dérives réductionnistes, vise à faire de l'école un lieu d'épanouissement et d'émancipation pour tous, en cultivant à la fois la singularité de chaque individu et le sens du collectif.

Références

Blakemore, S.-J. (2008). The social brain in

adolescence. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(4), 267-277. <https://doi.org/10.1038/nrn2353>

Blakemore, S.-J., & Choudhury, S. (2006). Development of the adolescent brain: Implications for executive function and social cognition. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 47(3-4), 296-312. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2006.01611.x>

Boulay, C. B. de, Coletta, J.-M., & Bréchet, L. (2011). Cohérence cardiaque et performance cognitive. *Médecine & Nutrition*, 47(2), 42-48. <https://doi.org/10.1051/mnut/2011472042>

Boulay, C. B., Jutten, C., & Dehais, F. (2011). Cognitive workload assessment using eye-tracking and EEG. *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, 33(33).

Bourdieu, P. (1980). *Le sens pratique*. Éditions de Minuit.

Bourdieu, P., & Passeron, J. C. (1970). *La reproduction: Éléments pour une théorie du système d'enseignement*. Éditions de Minuit.

Bourdieu, P., & Wacquant, L. J. (1992). *Réponses: Pour une anthropologie réflexive*. Seuil.

Bourassa, M., Menot-Martin, M., & Phillion, R. (2021). *Neurosciences et éducation:*

Pour apprendre et accompagner. De Boeck Supérieur. <https://doi.org/10.3917/dbu.bou.ra.2021.01>

Bréchet, L., Brunet, D., Birot, G., Gruetter, R., Michel, C. M., & Jorge, J. (2019). Capturing the spatiotemporal dynamics of self-generated, task-initiated thoughts with EEG and fMRI. *NeuroImage*, 194, 82-92.

Bréchet, L., Mange, R., Herbelin, B., Theillaud, Q., Gauthier, B., Serino, A., & Blanke, O. (2019). First-person view of one's body in immersive virtual reality: Influence on episodic memory. *PLOS ONE*, 14(3), e0197763. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197763>

Caballero-Gaudes, C., Moia, S., Bandettini, P. A., & Gonzalez-Castillo, J. (2023). Functional connectivity of the dorsolateral prefrontal cortex and intraparietal sulcus during working memory in adolescents. *NeuroImage*, 268, 120015. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2023.120015>

Casey, B. J., Jones, R. M., & Hare, T. A. (2008). The adolescent brain. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1124(1), 111-126. <https://doi.org/10.1196/annals.1440.010>

Collette, F., Van der Linden, M., Laureys, S., Delfiore, G., Degueldre, C., Luxen, A., & Salmon, E. (2005). Exploring the unity and

diversity of the neural substrates of executive functioning. *Human Brain Mapping*, 25(4), 409-423. <https://doi.org/10.1002/hbm.20118>

Cornu, L. (2011). Pédagogie du sens et de la relation. *Cahiers pédagogiques*, 491, 10-11.

Crone, E. A., & Dahl, R. E. (2012). Understanding adolescence as a period of social-affective engagement and goal flexibility. *Nature Reviews Neuroscience*, 13(9), 636-650. <https://doi.org/10.1038/nrn3313>

Csikszentmihalyi, M. (1990). *Flow: The psychology of optimal experience*. Harper & Row.

Dehaene, S. (2018). *Apprendre ! Les talents du cerveau, le défi des machines*. Odile Jacob.

Dehaene, S. (2013). *Les quatre piliers de l'apprentissage, ou ce que nous disent les neurosciences*. Paris Tech Review. <http://www.paristechreview.com/2013/11/07/apprentissage-neurosciences/>

Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology*, 64(1), 135-168. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>

Er-Rafiqi, M., Roukoz, C., Le Gall, D., & Roy, A. (2017). Les fonctions

exécutives chez l'enfant : Développement, influences culturelles et perspectives cliniques. *Revue de neuropsychologie*, 9(1), 27-34. <https://doi.org/10.1684/nrp.2017.0405>

Fabre, M. (2015). *Éduquer pour un monde problématique. La carte et la boussole*. Presses Universitaires de France. <https://doi.org/10.3917/puf.fabre.2015.01>

Fahim, C. (2022). PRESENCE d'une prédisposition : Premier épisode d'une série de huit épisodes sur le cerveau. *Cortica*, 1(2), 464-492. <https://doi.org/10.26034/cortica.2022.3344>

Fahim, C. (2022). PRESENCE enracinée dans le cerveau par une prédisposition génétique et tissée par l'épigénétique. *Cortica*, 1(1), 1-3. <https://doi.org/10.26034/cortica.2022.1779>

Fahim, C. (2023). PRESENCE DE RÉSEAUX DE NEURONES : OÙ EST LE PLAN POUR NE PAS SE PERDRE DANS L'IMMENSITÉ DE CETTE FORÊT ? Deuxième épisode d'une série de huit épisodes sur le cerveau. *Cortica*, 2(1), 1-9. <https://doi.org/10.26034/cortica.2023.3793>

Fahim, C. (2024). L'Élagage synaptique. *Cortica*, 3(2), 1-20. <https://doi.org/10.26034/cortica.2024.6091>

Fuhrmann, D., Knoll, L. J., & Blakemore, S.-J. (2015). Adolescence as a sensitive period of brain development. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(10), 558-566. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.07.008>

Guyer, A. E., Monk, C. S., McClure-Tone, E. B., Nelson, E. E., Roberson-Nay, R., Adler, A. D., Fromm, S. J., Leibenluft, E., Pine, D. S., & Ernst, M. (2008). A developmental examination of amygdala response to facial expressions. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(9), 1565-1582. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20114>

Guyer, A. E., Silk, J. S., & Nelson, E. E. (2016). The neurobiology of the emotional adolescent: From the inside out. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 70, 74-85. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.07.037>

Hobbiss, M. H., & Lavie, N. (2024). Sustained selective attention in adolescence: Cognitive development and predictors of distractibility at

school. *Journal of Experimental Child Psychology*, 238, 105784. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2023.105784>

Houdé, O. (2018). *L'école du cerveau : De Montessori, Freinet et Piaget aux sciences cognitives*. Mardaga.

Houdé, O. (2014). *Le raisonnement*. Presses Universitaires de France.

Ilyka, D., Johnson, M. H., & Lloyd-Fox, S. (2021). Infant social interactions and brain development: A systematic review. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 130, 448-469. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.09.001>

Immordino-Yang, M. H., & Damasio, A. (2007). We feel, therefore we learn: The relevance of affective and social neuroscience to education. *Mind, Brain, and Education*, 1(1), 3-10. <https://doi.org/10.1111/j.1751-228X.2007.00004.x>

Ismail, F. Y., Fatemi, A., & Johnston, M. V. (2017). Cerebral plasticity: Windows of opportunity in the developing brain. *European Journal of Paediatric Neurology*, 21(1), 23-48. <https://doi.org/10.1016/j.ejpn.2016.07.007>

Pagnamenta, O. 2024

Katahira, K., Yamazaki, Y., Yamaoka, C., Ozaki, H., Nakagawa, S., & Nagata, N. (2018). EEG correlates of the flow state: A combination of increased frontal theta and moderate frontocentral alpha rhythm in the mental arithmetic task. *Frontiers in Psychology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.03000>

Klingberg, T. (2013). *The learning brain: Memory and brain development in children*. Oxford University Press.

Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: A review and analysis. *Brain Research Reviews*, 29(2), 169-195. [https://doi.org/10.1016/S0165-0173\(98\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S0165-0173(98)00056-3)

Kolb, B., & Gibb, R. (2011). Brain plasticity and behaviour in the developing brain. *Journal of the Canadian Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 20(4), 265-276.

Leisman, G., Machado, C., Melillo, R., & Mualem, R. (2012). Intentionality and "free-will" from a neurodevelopmental perspective. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 6, 36. <https://doi.org/10.3389/fnint.2012.0036>

668

Luna, B., Padmanabhan, A., & O'Hearn, K. (2010). What has fMRI told us about the development of cognitive control through adolescence? *Brain and Cognition*, 72(1), 101-113. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2009.08.005>

Marcia, J. E. (1966). Development and validation of ego-identity status. *Journal of Personality and Social Psychology*, 3(5), 551-558. <https://doi.org/10.1037/h0023281>

Masi, M. (2023). An evidence-based critical review of the mind-brain identity theory. *Frontiers in Psychology*, 14, 1150605. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1150605>

McGowan, P. O., & Roth, T. L. (2015). Epigenetic pathways through which experiences become linked with biology. *Development and Psychopathology*, 27(2), 637-648. <https://doi.org/10.1017/S0954579415000206>

Meyer, K., & Damasio, A. (2009). Convergence and divergence in a neural architecture for recognition and memory. *Trends in Neurosciences*, 32(7), 376-382. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2009.04.002>

Pagnamenta, O. 2024

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. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>

OpenAI. (2023). *ChatGPT* (Mar 14 version) [Large language model]. <https://chat.openai.com/chat>

Pasquinelli, E. (2015). *Mon cerveau, ce héros : Mythes et réalité*. Le Pommier.

Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience*, 13(1), 25-42. <https://doi.org/10.1146/annurev.ne.13.030190.000325>

Sander, D., Grafman, J., & Zalla, T. (2003). The human amygdala: An evolved system for relevance detection. *Reviews in the Neurosciences*, 14(4), 303-316. <https://doi.org/10.1515/REVNEUR.O.2003.14.4.303>

Sander, D. (2015). *Le monde des émotions*. Belin.

669

Sauseng, P., Griesmayr, B., Freunberger, R., & Klimesch, W. (2010). Control mechanisms in working memory: A possible function of EEG theta oscillations. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 34(7), 1015–1022. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.12.006>

Selemon, L. D. (2013). A role for synaptic plasticity in the adolescent development of executive function. *Translational Psychiatry*, 3(3), e238. <https://doi.org/10.1038/tp.2013.7>

Somerville, L. H. (2013). The teenage brain: Sensitivity to social evaluation. *Current Directions in Psychological Science*, 22(2), 121–127. <https://doi.org/10.1177/0963721413476512>

Sydnor, V. J., Larsen, B., Seidlitz, J., Adebimpe, A., Alexander-Bloch, A. F., Bassett, D. S., ... & Satterthwaite, T. D. (2023). Intrinsic activity development unfolds along a sensorimotor-association cortical axis in youth. *Nature Neuroscience*, 26(4), 638–649. <https://doi.org/10.1038/s41593-023-01282-y>

Toscani, P. (2013). *Les neurosciences au cœur de la classe*. Chronique sociale.

Toscani, P. (2017). *Apprendre avec les neurosciences : Rien ne se joue avant 6 ans*. Chronique sociale.

Uhlhaas, P. J., Roux, F., Singer, W., Haenschel, C., Sireteanu, R., & Rodriguez, E. (2009). The development of neural synchrony reflects late maturation and restructuring of functional networks in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(24), 9866–9871. <https://doi.org/10.1073/pnas.0900390106>

Ulrich, M., Keller, J., Hoenig, K., Waller, C., & Grön, G. (2014). Neural correlates of experimentally induced flow experiences. *NeuroImage*, 86, 194–202. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.08.019>