

« Ce n'est pas le robot qui apprend, c'est moi », traiter une dysgraphie sévère en utilisant une interaction enfant-robot ¹

Présentation jeune chercheur - Thèse européenne d'informatique ²soutenue le 20 avril 2021, Dr. Thomas Gargot³

Mots-clefs : écriture, dysgraphie, robotique, tablettes électroniques, apprentissage machine.

Dans le règne animal, le développement moteur est crucial. Pour Laborit, le mouvement est notre seule manière d'interagir avec le monde. Selon Wolpert (2011) « Nous avons un cerveau pour une raison, une seule et unique raison, pour produire des mouvements adaptés et complexes. [...] [Notre] cerveau devient obsolète chez les organismes qui n'ont plus besoin de bouger ». Le développement moteur est un processus complexe. Il suit des étapes développementales bien précises et nécessite des expositions à des activités environnementales.

Certains enfants ont un développement moteur atypique. Dans l'introduction, nous présentons les prérequis cliniques nécessaires pour comprendre comment les cliniciens diagnostiquent et traitent actuellement les enfants ayant un développement moteur atypique, notamment dans le cas des difficultés d'écriture manuscrite. Nous nous focalisons sur deux types de troubles neurodéveloppementaux : le Trouble du Spectre Autistique (TSA) et le Trouble du Développement de la Coordination (TDC).

Ces troubles sont fréquents et handicapants avec des enjeux de santé publique importants. Depuis longtemps, les pédopsychiatres, les ergothérapeutes et les psychomotriciens ont décrit de manière précise ces difficultés chez les enfants avec TSA et TDC, et les approches pour les rééduquer.

Cependant, l'évaluation des difficultés motrices de ces enfants est difficile. Les modèles diagnostics eux-mêmes sont complexes et limités. Cette évaluation est basée sur des instruments cliniques standardisés semi-quantitatifs qui nécessitent la formation d'experts. Ils peuvent être subjectifs et ne peuvent pas être utilisés dans un milieu écologique. Ces contraintes limitent la mise en place d'une rééducation la plus précoce possible, la plus adaptée aux enfants qui en ont le plus besoin, et la bonne mesure des progrès des enfants pour individualiser au maximum la prise en charge.

Quelles technologies de l'information et de la communication peuvent être utiles dans le suivi des difficultés motrices développementales de ces enfants ? Que peut-on en attendre et quelles en sont les limites ? Nous avons conduit une revue systématique analysant 53 articles, qui montrent comment les capteurs électroniques peuvent mesurer et les algorithmes aider à classer la variété des difficultés du mouvement chez les enfants avec TSA (Gargot et al, 2022). Ces approches pourraient à terme être plus rapides, précises, accessibles et reproductibles qu'une évaluation humaine experte. De nombreuses expériences ont été faites en laboratoire mais n'atteignent pas encore les critères de qualité pour une diffusion clinique à large échelle. En effet, ces technologies sont encore récentes, émergentes, souvent peu intuitives ni utilisables en pratique courante pour les cliniciens ou les parents. Parmi les progrès récents, des analyses vidéo permettent le suivi de la

1. Ce texte a fait l'objet d'une communication lors de la journée du 5 octobre 2021 Atelier jeunes chercheurs ARAPI / GIS Autisme et TND : Épisode 1 - du cerveau au comportement

2. Pour lire cette thèse : <https://github.com/Ouphix/presentations/blob/master/2020ThesisThomasGargotRevised.pdf>.
Présentation orale longue : <https://youtu.be/OOIkeNDyFag>

3. chef de clinique en pédopsychiatrie au CHRU de Tours, Unité Mixte de Recherche, U1253 « Imaging and Brain » (iBrain).
Mail : thomas.gargot@univ-tours.fr

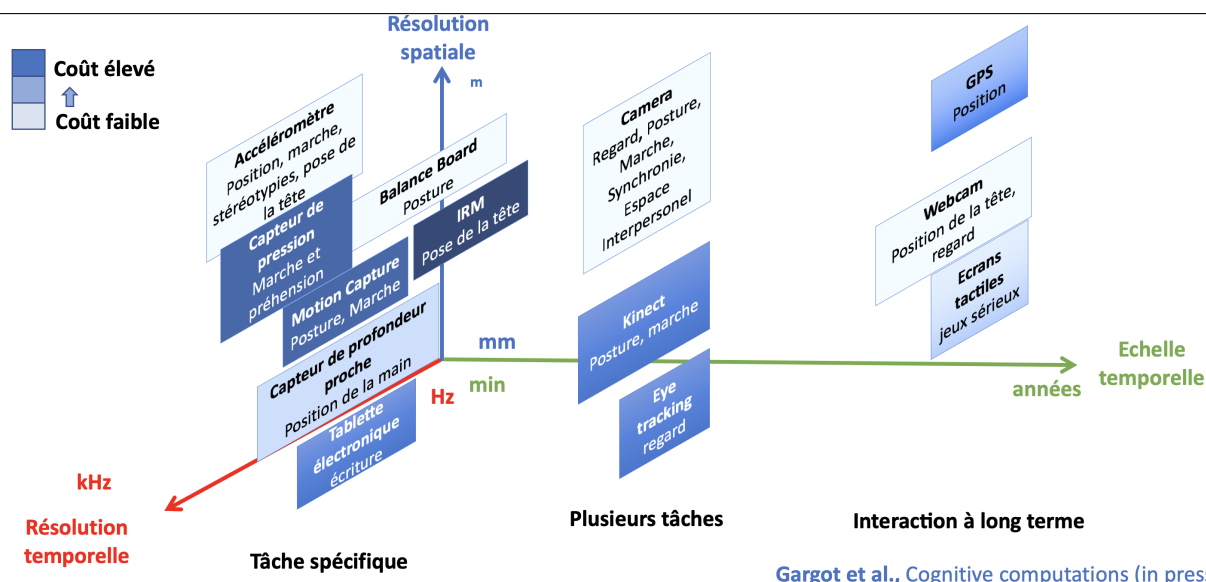


Figure 1. Propriétés des capteurs de mouvement en termes de résolution spatiale et temporelle, et de durée d'utilisation

posture avec de simples caméras. Cependant, des algorithmes complexes et lents d'apprentissage profond basés sur des réseaux de neurones artificiels sont nécessaires. Cet apprentissage profond est en pleine expansion en médecine mais il nécessite de grosses bases de données annotées (un clinicien expert décrit le mouvement qui est mesuré par le capteur) qui sont encore rares. La compréhension et l'interprétabilité pour le spécialiste, et a fortiori, par un enseignant ou un clinicien sont encore un défi, voir Figure 1.

Ces méthodes pourraient permettre aux praticiens de distinguer les difficultés motrices des TSA d'autres difficultés motrices (par exemple celles des TDC). Cette approche pourrait permettre de suivre les progrès des enfants dans des environnements plus écologiques (par exemple à l'école ou à la maison), ainsi qu'une meilleure compréhension du rôle que jouent les spécificités sensorimotrices dans le développement du TSA.

Les difficultés de développement moteur apparaissent de manière particulière à l'école quand l'enfant apprend à écrire. En effet, l'écriture manuscrite est une des capacités motrices les plus complexes à maîtriser durant notre vie. Les enfants ont besoin de nombreuses années pour la maîtriser. Peut-on utiliser des stylets et des tablettes électroniques pour évaluer la qualité et la vitesse de l'écriture manuscrite ? Celles-ci en effet donnent accès à des éléments factuels qui ne sont pas, ou très difficilement, étu-

diés actuellement par les évaluations expertes (par exemple la dynamique temporelle de l'écriture ou la pression exercée par le stylet). Comment mener l'analyse des données, de l'extraction de ces caractéristiques numériques reflétant ces éléments factuels à la classification avec un apprentissage machine, pour garder une procédure précise, mais aussi intelligible et aussi interprétable que possible ? La transparence et la confiance en ces algorithmes seront, in fine, aussi importantes que la précision de classification dans des contextes éducatifs et cliniques.

Nous montrons comment nous pouvons utiliser les tablettes électroniques pour mesurer les difficultés d'écriture manuscrite (la dysgraphie) d'enfants, en extrayant des caractéristiques numériques. Nous avons analysé une base de données d'échantillons d'écriture de 298 enfants collectées sur des tablettes Wacom®. L'extraction de ces caractéristiques de l'écriture a permis une classification automatique très précise de la dysgraphie grâce à un algorithme de forêt aléatoire (une méthode de classification de données basés sur des multiples arbres décisionnels). Cet algorithme est bien plus simple à interpréter par le clinicien expert de l'écriture, et à implémenter que des algorithmes d'apprentissage profond qui automatisent l'extraction de caractéristiques numériques mais de manière peu compréhensible pour un humain. Cette méthode utilisée sur des tablettes accessibles dans le commerce permet de classer les difficultés d'écriture de manière plus reproductible

avec moins de données que le test de référence actuel en France, le BHK. (Asselborn, Gargot et al., 2018) Les caractéristiques et cet algorithme de forêt aléatoire peuvent encore être difficile à bien maîtriser. De plus, ces caractéristiques pourraient avoir un rôle différent pour classer la dysgraphie au cours du développement. Quel est le rôle des caractéristiques les plus importantes (selon notre classificateur) dans les domaines statiques, dynamiques, d'inclinaison, de pression? Est-ce qu'un simple modèle linéaire de ces caractéristiques pourrait expliquer l'acquisition de l'écriture au cours de l'éducation? Après l'annotation des tracés d'écriture avec le test de référence (BHK), nous avons pu compléter l'analyse de cette base de données. Nous montrons comment ces caractéristiques évoluent en fonction du développement chez des enfants avec développement typique et chez des enfants avec dysgraphie (Gargot et al., 2020). La dysgraphie est-elle un concept homogène avec des manifestations motrices similaires? Nous avons utilisé ces mêmes caractéristiques pour réaliser une nouvelle classification de la dysgraphie. Nous avons identifié trois différents sous-types révélés par un algorithme de K-moyennes. Des études longitudinales, dans le futur, devraient permettre de faciliter des prises en charge plus personnalisées en fonction des spécificités du sous-type et du développement de l'enfant.

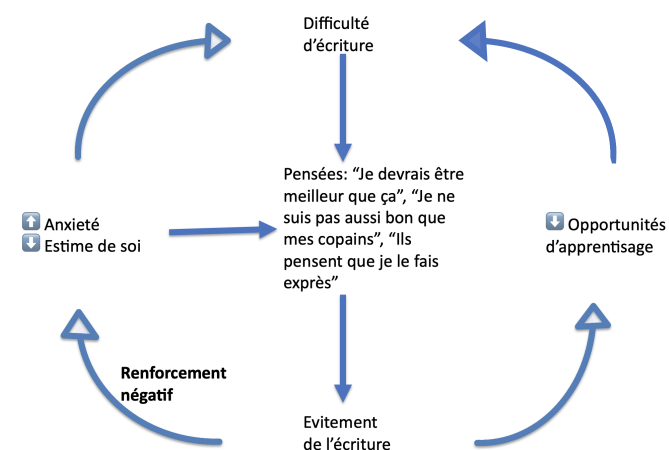


Figure 2. Analyse fonctionnelle décrivant les mécanismes de maintien de difficultés d'écriture

Est-ce que la robotique d'assistance peut être utilisée dans la réhabilitation de l'écriture? Quel est l'impact de l'incarnation physique du robot dans l'interaction comparée à un simple un avatar ou un soutien vocal? Nous décrivons le potentiel d'une approche basée sur un robot pour améliorer la motivation des participants (Gargot et al., 2021). Dans ce

scénario, un robot lui-même dysgraphique a besoin de l'aide du participant pour s'améliorer. L'enfant doit fournir des exemples au robot grâce à la tablette. Nous faisons l'hypothèse que l'enfant, en essayant d'améliorer l'écriture du robot, améliore sa propre écriture (Figure 2 et 3). Cette preuve de concept est utilisable dans une interaction à court terme avec des enfants au développement typique. L'interaction à court terme semble meilleure avec des participants qui interagissent avec un robot plutôt qu'avec l'avatar ou la voix seule. Est-ce que ce système est utilisable dans un contexte clinique? Quel serait le scénario clinique de son usage? Les caractéristiques d'écriture extraites par la tablette électronique ne sont pas utilisées actuellement dans le contexte de la rééducation conventionnelle papier-crayon.

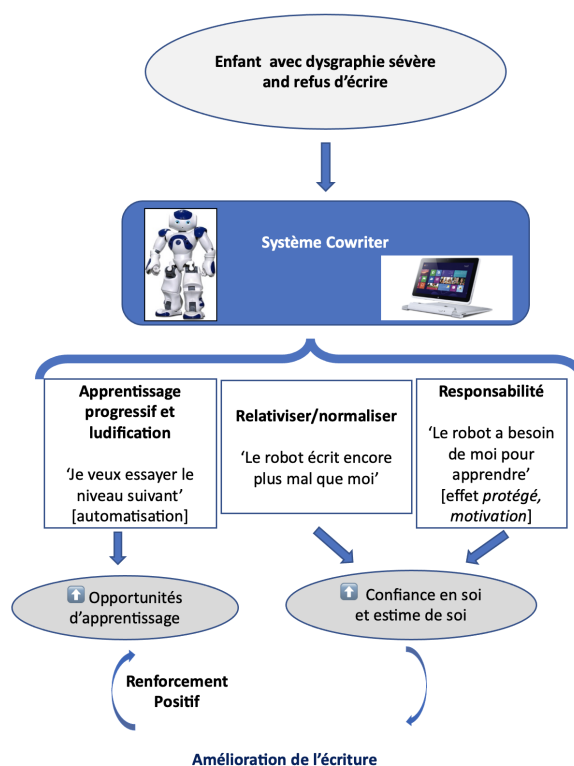


Figure 3. Processus cognitifs et affectifs impliqués dans le dispositif Cowriter.

Nous avons enrichi cette preuve de concept et réalisé une étude longitudinale sur un sujet, centrée sur les besoins d'un utilisateur final potentiel. Celui-ci avait une dysgraphie et un TDC sévère dans le cadre d'un trouble du neurodéveloppement complexe (Gargot et al., 2021). Il avait suivi d'autres thérapies classiques qui avaient échouées. Cet enfant a pu enseigner l'écriture au robot via une tablette et réaliser des jeux sérieux avec des boucles de rétrocontrôle en direct, basés sur certaines caractéristiques d'inclinaison, de pression, de dynamique, de pauses. Cette étude (20 sessions hebdomadaires, 500 minutes au total) a montré le potentiel de cette ap-

proche dans un contexte clinique. Cette méthode a permis de diminuer les comportements d'évitement de l'enfant. Elle a permis d'améliorer sa motivation et ses compétences en motricité fine et d'écriture. Cette étude de cas nous a permis de définir un modèle de réhabilitation, de tester des stratégies de réhabilitation sur tablette électronique, de proposer des caractéristiques d'écriture faciles à interpréter pour surveiller les progrès de l'enfant ainsi qu'une méthode pour mesurer l'évolution de la posture pendant la réhabilitation. Ces caractéristiques numériques pourraient permettre d'implémenter des interventions de rééducation de l'écriture, qui se basent sur une adaptation plus personnalisée aux spécificités de l'enfant.

Des études de cas préliminaires dans un contexte clinique ont permis d'affiner le rôle du robot et ses comportements sociaux. Est-il possible d'implémenter ces comportements avec une stratégie magicien d'Oz sur le robot, c'est-à-dire quand le robot est contrôlé manuellement par l'humain? Comment améliorer l'utilisabilité dans un contexte clinique? Nous présentons cette conceptualisation théorique, les stratégies d'implémentation et leurs défis dans le chapitre 6 de ma thèse. Ces comportements inspirés de la psychologie cognitive, sociale et clinique devraient ainsi pouvoir être évalués dans le futur lors d'une interaction enfant-robot contrôlée, à long terme.

En discussion de ma thèse, nous expliquons pourquoi bien maîtriser l'écriture manuscrite reste important malgré le développement des claviers. Elle est primordiale pour l'apprentissage des lettres et favorise la mémorisation. Nous allons présenter les enjeux de la généralisation et les aspects éthiques des études rapportées dans cette thèse. Cette thèse entre dans le cadre collectif du champ de la E-santé mentale. Ces approches computationnelles ouvrent de nouvelles perspectives dans la compréhension des TSA qui pourraient être expliqués par une cascade développementale avec un mécanisme commun, qui serait les difficultés sensorimotrices précoces, si fondamentales dans le développement de l'enfant et de son cerveau. Nous concluons par des projets qui visent à résoudre les défis techniques et méthodologiques que nous avons relevés pendant ce travail de

thèse.

Le projet Franco-Suisse IReCheck vise à utiliser un autre robot, QT Robot pour soutenir et tester l'intérêt de plusieurs interactions à long terme de rééducation de l'écriture grâce à l'effet protégé. Ce nouveau robot permettra de tester les nouveaux comportements sociaux développés durant ce travail.



Figure 4. Application Dynamico (exercice de tracé)

La start-up Dynamilis.ch¹ (Figure 4) issu de ce travail, coordonné par des collaborateurs scientifiques de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, vise à transférer les performances des algorithmes de mesure des difficultés d'écriture et des exercices de rééducations sur une tablette autonome, un iPad® qui ne nécessite plus l'utilisation d'un ordinateur comme la Wacom®. La mise en ligne a été faite en mars 2022. L'application a été testée chez plus de 750 utilisateurs. Un modèle d'apprentissage machine a été entraîné avec plus de 10 000 enfants dans 4 langues. 75 000 activités de rééducation ont été réalisées. La Corrélation de ce modèle avec le test de référence BHK est de 92 %. Ce qui est très bon. Des caractéristiques motrices fines pourraient aussi aider à identifier des signatures spécifiques de certains troubles (Trouble du spectre de l'autisme, Trouble de Déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité, maladie de Parkinson). Des études de recherche cliniques contrôlées seront nécessaires pour confirmer ces performances diagnostiques et thérapeutiques prometteuses.

1. <https://dynamilis.com/fr/>

Références

Asselborn, T., Gargot, T., Kidziński, Ł., Johal, W., Cohen, D., Jolly, C., & Dillenbourg, P. (2018). Automated human-level diagnosis of dysgraphia using a consumer tablet. *NPJ digital medicine*, 1(1), 1-9.

Gargot, T., Asselborn, T., Pellerin, H., Zammouri, I., M. Anzalone, S., Casteran, L., ... & Jolly, C. (2020). Acquisition of handwriting in children with and without dysgraphia : A computational approach. *PloS one*, 15(9), e0237575.

Gargot, T., Asselborn, T., Zammouri, I., Brunelle, J., Johal, W., Dillenbourg, P., ... & Anzalone, S. M. (2021). "It Is Not the Robot Who Learns, It Is Me."

Treating Severe Dysgraphia Using Child–Robot Interaction. *Frontiers in Psychiatry*, 5.

Gargot, T., Archambault, D., Chetouani, M., Cohen, D., Johal, W., & Anzalone, S. M. (2022). Automatic assessment of motor impairments in Autism Spectrum Disorders : a systematic review. *Cognitive Computation*, 1-36.

Wolpert, D. (2011). Daniel Wolpert : The Real Reason for Brains. Conference TED, https://www.ted.com/talks/daniel_wolpert_the_real_reason_for_brains

