

# ANR-CPLAY : Outil de rééducation fonctionnelle du membre supérieur pour l'enfant atteint de paralysie cérébrale et troubles afférents

Youness El Marhraoui, Hamdi Amroun, Mehdi Ammi (Université de Paris 8, Université de Sorbonne Paris-Nord)  
Mehdi Boukallel, Sylvain Bouchigny, Sabrina Panëels, Margarita Anastassova (CEA-LIST)  
Stéphane Bouilland, Marine Deseur (Fondation Hopale)  
Eric Desailly, Frédéric Muhla (Fondation Ellen Poidatz)  
Justine Monsaingeon, Dominique Sauquet, Léa Thamié, Moad Doghmi (Dyneo)

*Abstract – Le projet ANR-CPlay a comme objectif de concevoir et réaliser un jeu de construction composé de briques instrumentées et interactives couplé à une interface numérique afin de stimuler les composantes cognitive et motrice chez l'enfant. Ces briques élémentaires offriront un environnement de jeu varié au travers d'une large variété de géométries, tailles et couleurs. L'instrumentation des briques élémentaires par des capteurs et des actionneurs permet d'une part de capturer finement la dynamique d'interaction et d'autre part de stimuler d'autres canaux de perception (ex. visuel, tactile). Enfin, l'intégration de composantes d'automatisation basées sur l'intelligence artificielle, permettra une détection en temps réel des activités ainsi que leur caractérisation, permettant ainsi l'utilisation d'un moteur de recommandation qui créera une expérience de jeu adaptée à chaque profil.*

**Keywords:** Objets instrumentés, Intelligence artificielle, Télésanté.

## I. INTRODUCTION

La paralysie cérébrale (PC) est la déficience motrice la plus courante chez l'enfant. Elle touche 17 millions de personnes dans le monde, et 125 000 en France. Ses formes d'atteintes motrices sont multiples, elles peuvent être spastiques dyskinétiques, ataxiques ou mixtes et toucher d'un hémicorps au corps complet (hémiplégie, diplégie, quadriplégie). Ces atteintes motrices peuvent entre autres s'accompagner de troubles des apprentissages et des fonctions exécutives. Ces troubles des habiletés manuelles se retrouvent dans les dyspraxies d'origine neurodéveloppementale qui ont également une prévalence forte puisqu'on estime que 6 % des enfants entre 5 et 11 ans en sont affectés. Ces troubles ont un retentissement sur la réalisation gestuelle et/ou l'organisation visuo-spatiale et perturbent l'action motrice du geste intentionnel. Ces atteintes limitent la fonction et la participation de l'enfant dès son plus jeune âge, et sont responsables de difficultés scolaires, de troubles du comportement, d'inadaptation sociale et émotionnelle, très handicapantes. L'évaluation et la rééducation précoce de ces troubles sont déterminantes pour permettre au jeune enfant de maximiser ses chances de récupération et de compensation des

fonctions lésées. En effet, la plasticité cérébrale, qui est plus importante chez l'enfant, permet la compensation des fonctions touchées grâce à la capacité de réorganisation du cerveau. Ainsi, le projet vise à développer une plateforme complète de rééducation intégrant des objets instrumentés capables de renvoyer des informations sur le mouvement ainsi que sa qualité via des modèles d'intelligence artificielle. Cette première étape va alimenter une interface qui accompagne le jeu, dont le rôle est de donner un contexte ludique et amusant au jeu ainsi que susciter davantage ses capacités cognitives afin d'évaluer son comportement aussi bien que ses interactions avec le jeu.

## II. ETAT DE L'ART

Le projet vise à innover sur quatre volets. La première innovation porte sur les perspectives nouvelles ouvertes en sciences de la rééducation fonctionnelle. Les jouets, exploitant des objets tangibles pour la rééducation, sont adaptés à la rééducation précoce du membre supérieur. Cette approche émergente basée sur la gamification et les objets tangibles est en pleine expansion dans la rééducation post accident vasculaire cérébral de l'adulte que l'objet soit passif et détecté par moyens optiques [1,2] ou par des surfaces interactives [3,4], qu'il soit actif et extrêmement simple (interrupteur) [5] ou qu'il soit pleinement interactif [6,7]. Le développement de jeux tangibles adaptés aux enfants dès leur plus jeune âge va permettre d'étudier de multiples champs inhérents à la rééducation fonctionnelle pédiatrique : l'efficacité de la solution est au premier plan mais également les questions fondamentales des différences entre capacité et performance, de l'analyse des stratégies de mouvement et de résolution de problème, de l'apport de la motivation par les jouets, ou encore de l'observance rééducative à domicile.

Le second axe d'innovation du projet concerne le développement des objets physiques instrumentés et autonomes servant comme composants de base pour le jeu d'assemblage dont les développements seront portés par le CEA LIST. Ces éléments intégrant des capteurs permettront de quantifier les stratégies de manipulation et de saisie des objets ainsi que la dynamique de mouvement (au travers de centrales inertielles).

La littérature portant sur les développements d'objets physiques instrumentés est riche [9][10]. Pourtant, le champ de développement consacré à la problématique de rééducation reste à ce jour peu couvert et particulièrement chez les populations jeunes.

Nous proposons de conduire dans le cadre de ce projet une approche dite centrée utilisateur qui combine efficacement des approches ergonomiques de conception avec des processus itératifs de conception technologique. Cette méthode de conception, éprouvée par le CEA LIST dans plusieurs projets, qui met l'utilisateur au centre du besoin est nécessaire pour la réussite de tout système interactif. Le processus d'évolution du design contribue fortement à l'évolution du système avec son utilisateur plus facilement disposé à l'utiliser. Les développements technologiques qui s'articulent autour de la conception des objets physiques reposent sur l'expertise du CEA LIST dans le domaine du développement des Interfaces Homme-Machines, des facteurs humains et de l'interaction multimodale.

La troisième innovation porte sur le couplage d'objets physiques instrumentés avec des outils numériques. La littérature scientifique sur l'évaluation de la rééducation motrice avec les serious games est importante [11-13]. Ces analyses concluent que les serious games sont d'une efficacité supérieure pour améliorer la motricité des membres supérieurs. Une étude récente recense les modalités d'interaction utilisées sur les jeux sérieux pour la rééducation des membres supérieurs [14]: les auteurs indiquent, que 42% des plateformes utilisent des capteurs de type Kinect. Les auteurs retiennent deux limitations principales : les conditions environnementales qui affectent les performances du dispositif (éclairage, occlusions...) et l'impossibilité de mesurer les positions des doigts et les forces d'interactions. Le reste des études utilisent des capteurs tels que l'UltraLeap™, ou plus généralement des périphériques standards de type joystick qui ne sont pas toujours adaptés à la rééducation fonctionnelle. En raison d'un nombre limité d'études, les auteurs soulignent qu'il serait important de construire une approche thérapeutique basée sur des jeux sérieux et axée sur la rééducation des doigts, soutenue par une rééducation à distance, et qui s'appuie sur de la fusion de données multi-capteurs sur les modalités d'interaction. Le projet CPlay répond à ces recommandations.

Le quatrième aspect innovant du projet concerne les techniques de traitement de données dans l'optique d'établir des modèles de profilage, de reconnaissance et de caractérisation de l'activité. En effet, le manque de données dans ce type de contexte (c.à.d. rééducation d'enfants) et en particulier au début du projet de rééducation d'un patient, la variabilité des profils des patients (handicap, personnalité, etc.), et les contraintes des environnements non contrôlés (imperfection des données, pas de conditions de contrôle, etc.) ne permettent pas l'utilisation des techniques d'analyse de l'activité classiques. Afin de répondre à ces problématiques, nous souhaitons explorer de nouvelles approches, mais également adapter des solutions existantes à

l'analyse de l'activité chez l'enfant. Nous aborderons deux principales directions. Premièrement, nous étudierons les techniques de modélisation hybrides combinant l'apprentissage symbolique, pour établir des méta-modèles à partir des connaissances existantes (expertises, corpus, etc.), et l'apprentissage statistique pour faire évoluer ces modèles avec le flux croissant de données et permettre ainsi la prise en compte progressive des spécificités du patient [15] [16]. Deuxièmement, nous nous intéresserons aux techniques d'apprentissage incrémentales [17] [18] qui ont été élaborées initialement pour traiter les problématiques d'optimisation de ressources. Nous souhaitons adapter ces techniques afin de permettre l'incorporation progressive des données du patient. Pour ces différentes approches, l'entraînement d'un modèle avec un nouveau corpus fera émerger des problématiques de dérive. L'état de l'art suggère plusieurs solutions, telle que l'exploitation des techniques d'apprentissage par transfert combinées à des heuristiques, qui permettent de conserver les paramètres optimaux du modèle initial en limitant la dérive du modèle [19]. Si les dérives sont liées aux imperfections des données, la littérature met en évidence des approches probabilistes, telle que la « Dempster-Shafer Theory » (DST), pour modéliser et réduire ce type de dérive [20]. Le projet CPlay vise ainsi à apporter une contribution dans ces différents domaines de l'intelligence artificielle.

### III. METHODE

#### A. Conception et développement des objets physiques actifs

Un des aspects clés de notre approche est de faire coexister des objets physiques du monde réel, intégrant des capteurs et actionneurs, avec des outils numériques du monde virtuel. L'utilisation de briques de construction initialement passives mais rendues actives par l'intégration de capteurs/actionneurs (cf. figure 1) permettra de caractériser la dextérité manuelle uni et bilatérale. L'instrumentation de ces briques permettra de suivre finement des grandeurs de mouvement, le nombre et les géométries des pièces utilisées dans l'assemblage, la dynamique du mouvement et le temps d'assemblage et de jeu, les chutes de pièces, les erreurs de saisie, les actions mono ou bimanuelles...



Figure 1. Jeu de construction intégrant des capteurs inertiels

Une approche de co-design sera adoptée dans le cadre de cet axe de recherche. En effet, un groupe de travail constitué de thérapeutes, ingénieurs, parents et enfants sera constitué afin de définir le cahier des charges fonctionnel du jeu de construction, des jeux de rééducation ainsi que les besoins en analyse d'activité (cf. figure 2). Des tests unitaires des technologies seront réalisés, tout au long du projet, à la fois en environnement laboratoire et en centre de rééducation. Dans cette seconde configuration, les tests seront réalisés avec un panel d'utilisateurs accompagnés de professionnels de santé. Plusieurs techniques ergonomiques orientées UX (User Experience) seront utilisées telles que focus group, brainstorming, workshops et entretiens semi-dirigés.

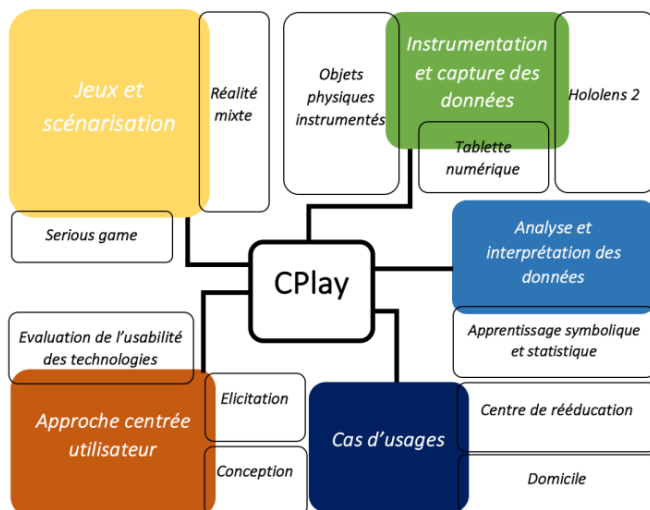


Figure 2. Champs thématiques couverts par CPlay

### B. Conception et développement des jeux de rééducation et de leurs interfaces numériques

Sur la base des briques physiques et du jeu de construction associé, nous travaillerons sur la ludification des exercices de rééducation afin de proposer un environnement numérique attrayant permettant de maximiser l'attention, l'adhésion et la motivation de l'enfant. Différents cadres théoriques et plusieurs stratégies seront explorés (récompense, exploration, challenges, Quantified-self, socialisation, etc.) afin d'identifier les mécanismes de ludification les plus efficaces en fonction de l'objectif et du profil de l'enfant. Ce volet commencera par élaborer un ensemble de scénarios et des niveaux de difficultés progressifs (cf. figure 3) afin d'adresser : 1) des exercices principalement moteurs et sensoriels (préhension, déplacement d'objet, etc.), notamment pour les plus jeunes enfants atteints de paralysie cérébrale ; et 2) des exercices sollicitant plus le travail cognitif (assemblages, séquences d'action, coordination, stratégies, etc.), certains étant plus spécifiques aux troubles de l'apprentissage et/ou aux enfants les plus âgés. Dans cette phase nous définirons les modèles à construire par assemblage des

pièces, les scénarii d'utilisation avec tablette, et les modes d'interaction.



Figure 3. Interface du jeu ludique accompagnant les exercices physiques

Nous aborderons dans une deuxième phase l'étude expérimentale des paramètres du jeu : les niveaux de difficulté, les distracteurs ou les facilitateurs (activation des actionneurs des pièces, éléments virtuels...), les stratégies attendues, les variables à mesurer pour quantifier la performance, les récompenses, les alertes, le partage des scores.

Pour ce volet, le projet bénéficiera de l'expérience scientifique de la fondation Hopale dans le « Serious game » pour la rééducation fonctionnelle post-AVC, et de l'expérience appliquée de Dynseo dans la conception de jeux pour la rééducation cognitive. Dynseo est à l'origine de plus de 25 jeux sur tablette s'adressant à des enfants souffrant de troubles cognitifs. Son savoir-faire est d'intégrer des processus de gamification qui permettent à l'enfant de prendre du plaisir à faire sa rééducation tout en offrant des jeux avec une vraie efficacité sur les fonctions cognitives.

## IV. IMPACT ET RETOMBES DU PROJET

### A. Améliorer les connaissances et les méthodes en rééducation fonctionnelle pour les enfants PC

Le projet ouvrira de nouvelles perspectives en science de la rééducation fonctionnelle. En effet, les jouets et jeux interactifs vont permettre d'explorer les différences entre capacité et performance dans des populations pédiatriques encore très difficilement évaluables sur ce sujet. Ils vont aussi nous permettre d'explorer la réalité de l'observance rééducative à domicile et d'évaluer l'apport de la réalité mixte en rééducation. Par ailleurs, au terme du projet, la fondation Ellen Poidatz et la fondation Hopale disposeront d'un premier jeu d'évaluation et de rééducation écologique, et auront mesuré son acceptabilité auprès de leurs patients. Les résultats de cette étude permettront aux deux fondations de disposer d'un personnel formé aux technologies de la réalité augmentée et d'une première expérience dans le développement d'un outil de rééducation utilisant cette technologie. Nous aurons également collecté des informations à même de nous aider à améliorer l'outil de

rééducation et à continuer son développement, et nous saurons cibler les patients pouvant en bénéficier au mieux.

### B. Restaurer les capacités motrices des enfants PC par le biais d'un couplage efficient entre briques physiques instrumentées et outils numériques

L'usage des technologies numériques pour la rééducation fonctionnelle chez l'enfant atteint de PC reste un champ d'investigation ouvert. CPlay repose sur une approche de conception qui met l'utilisateur au centre des développements et qui combine les concepts technologiques d'objets physiques instrumentés et de la réalité mixte. Ces concepts, associés aux scénarios de jeux, vont permettre à l'enfant d'appréhender une rééducation fonctionnelle sous une forme ludique, progressive, adaptée à ces capacités fonctionnelles, collaborative et stimulante. Notons qu'une fois validés, ces concepts pourront trouver des applications pour d'autres pathologies où la rééducation fonctionnelle est cruciale (AVC, sclérose en plaque, etc.).

### C. Traitement de données pour une personnalisation des programmes de rééducation et une meilleure compréhension des stratégies de manipulation chez l'enfant

Les outils de traitement de données permettront de former le profil d'activité et moteur de l'enfant afin de mieux prendre en compte ses limitations fonctionnelles, et ensuite personnaliser le programme de rééducation afin de maximiser son efficacité. Cette modélisation permettra par ailleurs d'affiner nos connaissances sur les stratégies de préhension et de coordination bimanuelle, et les paramètres sous-jacents (dynamique du mouvement, etc...), notamment en situation écologique.

## V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce projet engage des technologies et des protocoles assez génériques pour s'adapter à un large spectre d'utilisateurs mais également personnalisables pour s'adapter aux besoins de chacun. Ainsi, via cette approche, le but du projet est de proposer des solutions ludiques et innovantes qui susciteront l'adhésion des enfants et l'observance thérapeutique. De plus, les patients seront plus autonomes et bénéficieront d'un feedback sur leurs performances et leurs axes de progrès.

Ce projet ne se limitera pas à un cadre expérimental ou un scénario à domicile mais il peut également être envisagé dans d'autres organismes tels que les crèches et les écoles. Par cette voie, les enfants atteints de ce type d'handicap auront plus d'activités qui leur correspondent dans des établissements scolaires. Le but étant de les intégrer facilement dans ces organismes et profiter aussi de ce cadre éducatif pour leur permettre d'avancer dans leur protocole rééducatif.

## REMERCIEMENTS

Nous voudrions remercier l'ensemble des ergothérapeutes qui ont participé à la récolte des données ainsi que leur labélisation dans les deux centres de rééducation (Fondation Hopale et

Fondation Ellen Poidatz), notamment Zoe Pinseel et Maïté Duval.

## REFERENCES

- [1] Rikakis T, Kelliher A, Choi J, Huang J-B, Kitani K, Zilevu S, et al. Semi-automated home-based therapy for the upper extremity of stroke survivors. In: Proceedings of the 11th Pervasive Technologies Related to Assistive Environments Conference [Internet]. Corfu Greece: ACM; 2018 [cité 18 mai 2020]. p. 249-56.
- [2] Bootle Blast - Survey Video (Voiceover) [Internet]. [cité 18 mai 2020]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=g3zjrGLyemE&feature=youtu.be>
- [3] Rogers JM, Duckworth J, Middleton S, Steenberg B, Wilson PH. Elements virtual rehabilitation improves motor, cognitive, and functional outcomes in adult stroke: evidence from a randomized controlled pilot study. *J NeuroEngineering Rehabil.* 15 mai 2019;16(1):56.
- [4] MYRO [Internet]. Tyromotion. [cité 18 mai 2020]. Disponible sur: <https://tyromotion.com/en/products/myro/>
- [5] FitMi: The High-Tech Home Exercise Program [Internet]. Flint Rehab. [cité 18 mai 2020]. Disponible sur: <https://www.flintrehab.com/product/fitmi/>
- [6] Bobin M, Bimbard F, Boukallel M, Anastassova M, Ammi M. SpECTRUM: Smart ECosystem for sTRoke patient's Upper limbs Monitoring. *Smart Health.* 1 août 2019;13:100066.
- [7] Guneysoy Ozgur A, Wessel MJ, Olsen JK, Johal W, Ozgur A, Hummel FC, et al. Gamified Motor Training With Tangible Robots in Older Adults: A Feasibility Study and Comparison With the Young. *Front Aging Neurosci* [Internet]. 2020 [cité 18 mai 2020];12.
- [8] Sakzewski L, Provan K, Ziviani J, Boyd RN. Comparison of dosage of intensive upper limb therapy for children with unilateral cerebral palsy: How big should the therapy pill be? *Res Dev Disabil.* févr 2015;37:9-16.
- [9] Renaud Gervais, Interaction and introspection with tangible augmented objects, Thèse de Doctorat, 2015, [https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01281372/file/GERVAIS\\_RENAUD\\_2015.pdf](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01281372/file/GERVAIS_RENAUD_2015.pdf)
- [10] Cortes Guillaume, Marchand Eric, Brincin Guillaume, Lécuyer Anatole, MoSART: Mobile Spatial Augmented Reality for 3D Interaction With Tangible Objects, *Journal of Frontiers in Robotics and AI*, VOLUME=5, 2018, Pages 93.
- [11] Tieri, G., et al., Virtual reality in cognitive and motor rehabilitation: facts, fiction and fallacies. *Expert Rev Med Devices*, 2018. 15(2): p. 107-117.
- [12] Taut, D., S. Pinteau, and Roovers, Jan-Paul W.R., Play seriously: Effectiveness of serious games and their features in motor rehabilitation. A meta-analysis. *NeuroRehabilitation*, 2017. 41(1): p. 105-118.
- [13] Howard, M.C., A meta-analysis and systematic literature review of virtual reality rehabilitation programs. *Computers in Human Behavior*, 2017. 70: p. 317-327
- [14] C.A. Agui and E.J. Rechy-Ramirez, Interaction Modalities Used on Serious Games for Upper Limb Rehabilitation: A Systematic Review. *Games for Health Journal: Research, Development, and Clinical Applications*, 2019. 8(5): p. 1-13
- [15] Hamdi Amroun, Mehdi Ammi, Who Used My Smart Object? A Flexible Approach for the Recognition of Users. *IEEE Access* 6: 7112-7122 (2018)

- [16] Hela Sfar, Amel Bouzeghoub, Nathan Ramoly, Jérôme Boudy: AGACY Monitoring: A Hybrid Model for Activity Recognition and Uncertainty Handling. ESWC (1) 2017: 254-269
- [17] Pedro Domingos and Geoff Hulten. 2000. Mining high-speed data streams. In Proceedings of the sixth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining (KDD '00). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 71–80
- [18] Li, Zeng & Huang, Wenchao & Xiong, Yan & Ren, Siqi & Zhu, Tuanfei. (2020). Incremental learning imbalanced data streams with concept drift: The dynamic updated ensemble algorithm. Knowledge-Based Systems.
- [19] M. A. Ardeh, Y. Mei and M. Zhang, "Transfer Learning in Genetic Programming Hyper-heuristic for Solving Uncertain Capacitated Arc Routing Problem," 2019 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Wellington, New Zealand, 2019, pp. 49-56.
- [20] H. Liu, Z. Ma, X. Deng and W. Jiang, "A new method to air target threat evaluation based on Dempster-Shafer evidence theory," 2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), Shenyang, 2018, pp. 2504-2508.