

Utilisation d'un dispositif virtuel nouvellement développé pour améliorer les capacités motrices et fonctionnelles des enfants atteints de paralysie cérébrale¹

GEOFFROY SAUSSEZ

Sections de kinésithérapie et d'ergothérapie

Département des sciences de la motricité

Domaine de la santé

Campus de Montignies-sur-Sambre

Haute école Louvain-en-Hainaut

saussezg@helha.be

RÉSUMÉ. – Les recherches menées dans le cadre de cette thèse ont eu pour but de participer au développement d'un outil virtuel destiné à la prise en charge des fonctions motrices en neurorehabilitation afin d'en améliorer l'efficacité en facilitant l'application des principes utilisés lors des thérapies dites « intensives ». Celles-ci sont basées sur les principes thérapeutiques liés aux connaissances scientifiques sur l'apprentissage moteur de tâches motrices complexes. Après une série d'études permettant le développement de l'outil et la définition des protocoles thérapeutiques utilisés avec l'outil, deux études randomisées

-
1. Monsieur Geoffroy Saussez a défendu sa thèse de doctorat le mercredi 28 avril 2021. Ses travaux de thèse ont été réalisés au sein du Laboratoire de Motor Skill Learning & Intensive Neurorehabilitation lab (UCLouvain), grâce aux financements du Fonds spécial de la recherche (FSR) et du Fonds pour la formation à la recherche dans l'industrie et dans l'agriculture (FRIA-FNRS). Une partie de ses travaux seront résumés ici. Une version enregistrée de la défense publique de sa thèse est disponible auprès de lui. Une version papier a été déposée à la bibliothèque de la HELHa, à Montignies-sur-Sambre. Une version électronique le sera prochainement.

contrôlées ont été menées afin de tester la faisabilité et l'efficacité de l'utilisation de ce nouvel outil virtuel dans le cadre de thérapies « intensives », mais aussi lors de prises en charge données à un rythme conventionnel chez des enfants ayant une paralysie cérébrale.

ABSTRACT. – The aim of the research carried out in the context of this thesis was to contribute towards the development of a virtual tool, intended for motor function treatments in neurorehabilitation, in order to increase their effectiveness by facilitating the application of the principles used during those therapies referred to as “intensive”. These are based on therapeutic principles founded on scientific findings concerning the motor learning of complex motor tasks. Following a series of studies that enabled the development of the tool and the determination of its corresponding therapeutic protocols, two randomized, controlled studies were performed in order to test the feasibility and effectiveness of using this new virtual tool not only within the context of “intensive” therapies, but also during treatments given, at a conventional pace, to children with cerebral palsy.

MOTS-CLÉS. – Apprentissage moteur — HABIT-ILE — Paralysie cérébrale — Réalité virtuelle — Rééducation

Plan de l'article

1. Introduction
 - 1.1. Rééducations motrices
 - 1.2. Outils virtuels et rééducation motrice
 - 1.3. Objectifs de la thèse et questions de recherche
2. Le REAtouch®
 - 2.1. Séances avec le REAtouch® et intervention HABIT-ILE
3. Efficacité du REAtouch® lors d'un stage HABIT-ILE pour des enfants atteints de paralysie cérébrale unilatérale : étude randomisée contrôlée
 - 3.1. Évaluations réalisées
 - 3.2. Analyses statistiques
 - 3.3. Résultats et discussion
4. Efficacité de l'utilisation du REAtouch® dans un cadre de réadaptation conventionnelle pour des enfants atteints de paralysie cérébrale : étude randomisée contrôlée
 - 4.1. Évaluations réalisées
 - 4.2. Analyses statistiques
 - 4.3. Résultats et discussion
5. Conclusion
6. Considérations cliniques et ouvertures

1. Introduction

La paralysie cérébrale est connue pour être le trouble sensorimoteur le plus courant dans la population pédiatrique, avec une prévalence allant de 1,5 à plus de 3 pour 1000 naissances (Graham *et al.*, 2016 ; Rosenbaum *et al.*, 2007). Elle a été définie comme étant « un groupe de troubles permanents du développement du mouvement et de la posture, entraînant une limitation des activi-

tés, qui sont attribués à des perturbations non progressives survenues dans le cerveau du fœtus ou du nourrisson en développement » (Rosenbaum *et al.*, 2007). La prématurité et le très faible poids de naissance (< 1500 gr) sont considérés comme étant ses principaux facteurs de risque (Graham *et al.*, 2016).

Les troubles de la fonction motrice varient en fonction du moment, du type, de l'étendue et de la localisation de la lésion cérébrale. Ces troubles moteurs seront « souvent accompagnés de troubles de la sensibilité, de la perception, de la cognition, de la communication et du comportement, d'épilepsie et de problèmes musculo-squelettiques secondaires » (Rosenbaum *et al.*, 2007).

En raison des déficiences des fonctions motrices, mais aussi des déficits non moteurs associés, les enfants et les adultes atteints de paralysie cérébrale rencontrent des limitations dans les activités de la vie quotidienne et des restrictions dans les domaines de la participation sociale tout au long de leur vie (Arnould, Penta, Renders, & Thonnard, 2004; Bleyenheuft, Paradis, Renders, Thonnard, & Arnould, 2017). Celles-ci sont influencées par le niveau des déficiences, mais aussi par des facteurs contextuels tels que décrits dans le cadre de la Classification internationale du fonctionnement, du handicap et de la santé (CIF) (Organization, 2001).

1.1. Rééducations motrices

Du fait de leur prédominance dans le cadre des déficiences liées à la paralysie cérébrale, la rééducation des fonctions motrices joue un rôle majeur dans le continuum de soins de ces patients.

Sur la base des connaissances émergentes en matière d'apprentissage du contrôle moteur, de structure musculaire, de physiologie et de neuroplasticité dépendante de l'activité, les recommandations relatives aux rééducations de la fonction motrice en paralysie cérébrale ont évolué vers des rééducations davantage ciblées vers la performance dans les activités fonctionnelles et l'indépendance dans la vie quotidienne en utilisant une approche centrée sur la famille et le patient en tant que participant actif de sa rééducation de la fonction motrice (Graham *et al.*, 2016; Novak *et al.*, 2013; Novak *et al.*, 2020; Richards & Malouin, 2013). Dans leur revue systématique publiée en 2020, Novak et ses collègues ont soutenu la plus grande efficacité de ces interventions centrées sur le patient et la famille avec des caractéristiques communes basées sur les connaissances en matière d'apprentissage des habiletés motrices (Novak *et al.*, 2020). Parmi ces interventions ayant démontré leur grande efficacité, les interventions intensives telles que la thérapie par le mouvement induit

par la contrainte (« *Constraint-induced movement therapy* », CIMT) (Eliasson, Krumlinde-sundholm, Shaw, & Wang, 2005 ; Gordon, Charles, & Wolf, 2005), l'entraînement intensif bimanuel (« *Hand-arm bimanual intensive therapy* », HABIT) (J. Charles & Gordon, 2006), ou bimanuel et locomoteur (« *Hand-Arm Bimanual Intensive Therapy Including Lower Extremities* », HABIT-ILE) (Bleyenheuft & Gordon, 2014) font partie des interventions sur les fonctions motrices les plus citées et les plus utilisées dans les protocoles de recherche chez les enfants atteints de paralysie cérébrale au cours des 20 dernières années.

L'efficacité de ces interventions a été démontrée dans la fonction motrice des extrémités supérieures (CIMT, HABIT et HABIT-ILE) et inférieures (HABIT-ILE), ainsi que dans l'amélioration des capacités dans les activités de la vie quotidienne et la participation sociale (Araneda *et al.*, 2021 ; Bleyenheuft, Arnould, Brandao, Bleyenheuft, & Gordon, 2015 ; Bleyenheuft, Ebner-Karstinos, *et al.*, 2017 ; J. R. Charles, Wolf, Schneider, & Gordon, 2006 ; de Brito Brandao, Gordon, & Mancini, 2012 ; Eliasson *et al.*, 2005 ; Eliasson *et al.*, 2018 ; Gordon *et al.*, 2011 ; Gordon, Schneider, Chinnan, & Charles, 2007 ; Novak *et al.*, 2020). Des changements neuroplastiques ont également été mis en évidence sur les aires corticales motrices et sensorimotrices et se sont avérés corrélés avec les améliorations observées de la fonction motrice (Bleyenheuft, Dricot, *et al.*, 2015 ; Friel *et al.*, 2016 ; Weinstein *et al.*, 2015). Plus récemment, des changements dans l'anisotropie fractionnelle et la diffusivité moyenne des voies de la substance blanche, comme le tractus cortico-spinal, ont également été mis en évidence après les interventions HABIT et HABIT-ILE, démontrant une augmentation de la qualité des voies de la substance blanche (Bleyenheuft *et al.*, 2020 ; Weinstein *et al.*, 2015).

Malgré la connaissance de la plus grande efficacité de ces interventions intensives et leur preuve de supériorité en termes de changements dans les capacités de la fonction motrice, l'indépendance dans les activités de la vie quotidienne et les changements neuroplastiques associés, ce sont toujours des interventions traditionnelles « neurodéveloppementales », centrées sur les déficits du patient, qui sont principalement appliquées dans nos pays et dans le monde entier (Graham *et al.*, 2016 ; Richards & Malouin, 2013). Les raisons de cet écart entre les connaissances scientifiques et leur application en routine clinique sont multiples. L'une d'entre elles pourrait concerner un manque de ponts de communication efficaces entre la recherche et les domaines de pratique clinique actuels. Une autre est probablement liée au long délai nécessaire pour adapter le raisonnement et les habitudes cliniques, avec des besoins d'adapta-

tions parmi les organisations cliniques et professionnelles afin de déterminer les meilleures façons d'appliquer ces nouvelles pratiques, mais également de les enseigner. Un troisième obstacle à l'application clinique de routine de telles interventions à dosage intensif (jusqu'à 6 voire 9 heures de thérapie par jour) est lié à des questions financières basées sur des stratégies de remboursement et des politiques de soins de santé offrant un nombre élevé de sessions thérapeutiques remboursées dans une année, mais non cumulables le même jour². Cependant, le principal obstacle actuel à l'application de ces interventions fondées sur des évidences scientifiques reste probablement le faible nombre de cliniciens formés et habitués à appliquer ces interventions « intensives » centrées sur la famille et fondées sur l'apprentissage des habiletés motrices. Que ce soit lors de stage de « intensifs » ou dans des contextes thérapeutiques plus conventionnels (moins intensifs en termes de dosage).

Pour remédier à ce dernier obstacle et aider les cliniciens dans leur pratique quotidienne, l'utilisation de dispositifs virtuels spécifiquement conçus comme outils thérapeutiques pourrait être d'un grand intérêt pour permettre aux thérapeutes de se concentrer plus facilement sur l'environnement de la tâche, promouvoir l'entraînement dirigé vers un objectif fonctionnel et améliorer l'efficacité des interventions motrices (Hung & Gordon, 2018 ; D. E. Levac & Galvin, 2013 ; Novak *et al.*, 2020 ; Sveistrup, 2004).

1.2. Outils virtuels et rééducation motrice

Les outils/environnements virtuels sont définis comme étant « des hardware et logiciels générant des simulations d'environnements réels ou imaginaires avec lesquels les participants interagissent en utilisant leurs propres mouvements » (D. E. Levac, Huber, & Sternad, 2019 ; Weiss P. L., 2004). Leur utilisation dans la rééducation de la fonction motrice donne l'opportunité de promouvoir une motivation accrue des patients à prendre part au processus de rééducation avec une augmentation de la durée, de l'intensité (ex. : augmentation des répétitions de mouvements) et de la fréquence des séances réalisées (D. Levac, Rivard, & Missiuna, 2012 ; Sveistrup, 2004). Dans des enquêtes récentes, environ un kinésithérapeute ou ergothérapeute sur deux a déjà utilisé un système de réalité virtuelle ou de jeux vidéo interactif dans le cadre de prises en charge, mais seulement 12 à 31 % des cliniciens déclarent une utilisation cou-

2. Ex. arrêté royal du 3 février 2019, Belgique : de 50 à 150 séances de 1 h/an + séances de 30 min illimitées remboursées dans l'année pour les enfants atteints de paralysie cérébrale, mais non cumulables le même jour.

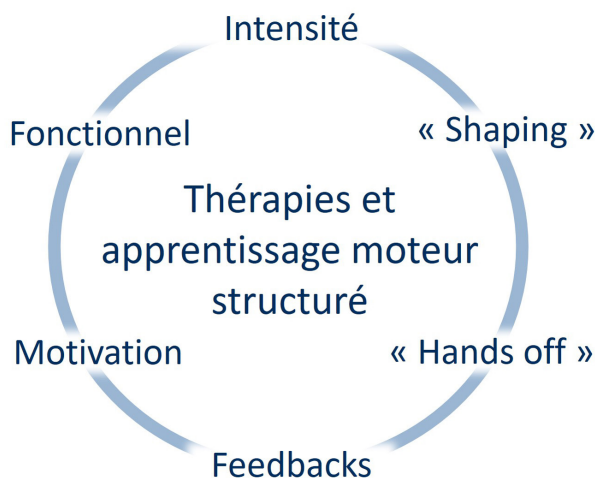
rante dans leur pratique (Glegg & Levac, 2018; D. Levac, Glegg, Colquhoun, Miller, & Noubary, 2017). Parmi les obstacles signalés à l'utilisation de ces dispositifs, les plus fréquemment cités étaient liés à la mise en œuvre clinique (ex. : le coût, l'espace nécessaire), au développement des compétences de l'utilisateur final (ex. : le manque d'aide à la mise en place ou de personnel de soutien pour administrer le traitement, l'utilité perçue du dispositif, la facilité d'utilisation et l'auto-efficacité perçue) et au développement technologique de l'outil (ex. : le fait que l'outil ne corresponde pas aux besoins du patient, le manque de possibilités de formation et de transfert des apprentissages moteurs aux activités de la vie quotidienne) (Glegg & Levac, 2018; D. Levac *et al.*, 2017).

Les dispositifs disponibles dans le commerce (ex. : Xbox Kinect, Nintendo Wii, Playstation Eye Toy) sont actuellement les systèmes virtuels les plus utilisés en neuroréhabilitation (D. Levac *et al.*, 2017). Malgré leurs avantages en termes de facilité d'utilisation, de coût et d'accessibilité, les systèmes commerciaux ne sont pas spécifiquement conçus pour la rééducation et ne visent pas la mise en œuvre des ingrédients thérapeutiques spécifiques à la neuroréhabilitation - au contraire des systèmes plus coûteux conçus en collaboration entre des ingénieurs et des thérapeutes.

Les revues systématiques suggèrent une plus grande efficacité des environnements virtuels spécifiquement conçus par rapport aux systèmes de divertissement commerciaux (Y. Chen, Fanchiang, & Howard, 2018; Domínguez-Téllez, Moral-Muñoz, Salazar, Casado-Fernández, & Lucena-Antón, 2020; Johansen, Strom, Simic, & Rike, 2019; Laver *et al.*, 2017; Massetti *et al.*, 2018; Ravi, Kumar, & Singhi, 2017; Thomson, Pollock, Bugge, & Brady, 2014). Cependant, malgré leur développement initial pour la rééducation des fonctions motrices, la littérature rapporte des résultats très hétérogènes avec quelques améliorations mises en évidence sur le domaine des fonctions corporelles/structures anatomiques, mais pas d'améliorations concluantes à long terme sur les capacités dans les activités de la vie quotidienne ou la participation sociale des patients (Y.-P. Chen & Howard, 2016; Y. Chen *et al.*, 2018; Gilliaux *et al.*, 2014; Knippenberg *et al.*, 2017; Laver *et al.*, 2017; Meyer-Heim & van Hedel, 2013).

Sur la base des preuves existantes en neuroréhabilitation et de la plus grande efficacité des interventions intensives basées sur l'apprentissage des habiletés motrices, les experts du domaine s'accordent à dire que les systèmes virtuels nouvellement conçus devraient intégrer les principes thérapeutiques dérivés des connaissances en matière d'apprentissage moteur de tâches dites « com-

plexes » (Kleim & Jones, 2008 ; Levin, Weiss, & Keshner, 2015 ; Muratori, Lamberg, Quinn, & Duff, 2013 ; Novak *et al.*, 2020) (illus. n°1).



Illus. n°1.

Principes thérapeutiques des thérapies basées sur les connaissances de l'apprentissage de tâches motrices complexes.

Source : composition personnelle.

Ces principes incluent une pratique intensive (dosage thérapeutique élevé, temps d'engagement moteur et quantité de travail physique ou mental), avec une spécificité et une difficulté croissante des tâches proposées (« *shaping* ») à travers des mouvements autogénérés/volontaires en utilisant les affordances de l'environnement (« *hands off* ») pour offrir des opportunités de trouver les stratégies optimales et des feedbacks sur la performance des tâches motrices (Kleim & Jones, 2008 ; Muratori *et al.*, 2013). La motivation du patient fait partie de ces principes thérapeutiques, induite notamment par un entraînement dirigé vers un but, incluant une pratique orientée vers la tâche dans des jeux/activités ludiques axés sur des objectifs fonctionnels personnalisés autodéterminés (motivation intrinsèque) avec un environnement encourageant (ex. : renforcement positif, activités de groupe ; motivation extrinsèque) (Kleim & Jones, 2008 ; Levin *et al.*, 2015 ; Muratori *et al.*, 2013).

En outre, il semble crucial de mettre l'accent sur l'amélioration de la fidélité de l'environnement virtuel par rapport aux activités du monde réel afin de promouvoir un apprentissage moteur précis et un transfert dans les activités de la vie quotidienne (p. ex. : paramètres de mouvement, indices visuels 3D, informations haptiques, propriétés et interactions des objets) (D. E. Levac

et al., 2019; Levin *et al.*, 2015; Robert & Levin, 2018). La fidélité de l'environnement virtuel peut être définie comme la concordance entre les interactions dans un environnement virtuel par rapport au monde réel (Bhargava, Bertrand, Gramopadhye, Madathil, & Babu, 2018; D. E. Levac *et al.*, 2019). Celle-ci peut être influencée par le type de dispositif utilisé (casques de réalité virtuelle, écran 2D), mais les aspects les plus importants pour la fidélité des environnements virtuels sont la correspondance des retours sensoriels (« *sensory matching* ») et des propriétés d'interactions des objets (« *dimensional matching* ») par rapport aux activités du monde réel (D. E. Levac *et al.*, 2019; Ranganathan, Wieser, Mosier, Mussa-Ivaldi, & Scheidt, 2014).

Parmi les environnements virtuels existants utilisés actuellement, certains des ingrédients thérapeutiques cités précédemment peuvent être appliqués à l'aide de ces dispositifs (pratique de tâches répétitives/intensives, motivation du client et parfois absence de contact), mais dans le cadre des activités de manipulation, le principe de fidélité de l'environnement n'est bien souvent pas appliqué (D. Levac *et al.*, 2012; D. E. Levac *et al.*, 2019). La raison principale de ce manque de fidélité est le manque de correspondance sensorielle et dimensionnelle dans les interactions entre objets pour permettre l'entraînement des fonctions de la main et le transfert des apprentissages.

Au cours des dix dernières années, on a assisté à un développement accru des environnements thérapeutiques virtuels utilisant des dispositifs interactifs (ex. : un écran tactile 2D) intégrant l'utilisation de manipulations d'objets tangibles (Feys & Straudi, 2019; Green & Wilson, 2012; Hochstenbach-Waelen, Timmermans, Seelen, Tetteroo, & Markopoulos, 2012; Mumford *et al.*, 2012; Rogers, Duckworth, Middleton, Steenbergen, & Wilson, 2019).

Bien qu'elles ne soient pas aussi immersives que les casques de réalité virtuelle, elles bénéficient d'une fidélité plus facilement respectée des tâches effectuées grâce à des manipulations d'objets réels et de possibilités d'entraînement des fonctions de la main avec des opportunités de transfert dans les activités de la vie quotidienne.

Cependant, ces interfaces tangibles récemment développées sont souvent conçues avec peu de possibilités d'intégrer tous les principes thérapeutiques (principalement la direction vers un but et la mise en forme). De plus, bien que certains outils aient été testés chez des patients victimes d'un accident vasculaire cérébral, de lésions cérébrales acquises et d'infirmité motrice cérébrale (Green & Wilson, 2012; Mumford *et al.*, 2012; Rogers *et al.*, 2019), aucun de ces dispositifs n'a été testé dans le cadre d'essais contrôlés randomisés en

comparaison avec une intervention ayant montré une efficacité de manière scientifique.

1.3. Objectifs de la thèse et questions de recherche

Le premier objectif de cette thèse était de développer un dispositif virtuel (le « REAtouch® ») permettant l'application de tous les principes thérapeutiques d'apprentissage des habiletés motrices (tâches complexes) et son environnement thérapeutique. Le deuxième et principal objectif de la thèse est de tester l'efficacité des interventions motrices utilisant le dispositif nouvellement développé en observant les changements en termes de fonction motrice ainsi que dans les activités de la vie quotidienne des enfants atteints de paralysie cérébrale unilatérale et bilatérale.

Des études préliminaires à la mise en œuvre du dispositif interactif virtuel ont été planifiées afin de déterminer les protocoles et les interventions thérapeutiques qui seront ensuite utilisés dans les études de faisabilité et d'efficacité (celles-ci ne seront pas présentées ici). À la suite de ces trois études préliminaires, deux études randomisées contrôlées explorent la faisabilité et l'efficacité de l'utilisation du dispositif virtuel chez les enfants atteints de paralysie cérébrale unilatérale et bilatérale, à différents dosages et avec différents protocoles thérapeutiques.

2. Le REAtouch®

Le REAtouch® a été développé par Axinesis S.A. en collaboration avec des cliniciens experts en neuroréhabilitation fonctionnelle intensive afin de guider la conception du dispositif, son utilisation thérapeutique et la manière de promouvoir son application lors de protocoles intensifs ou non intensifs.

Il s'agit d'un dispositif virtuel non immersif conçu pour permettre l'application de tous les principes thérapeutiques basés sur l'apprentissage de tâches motrices complexes (Kleim & Jones, 2008; Levin *et al.*, 2015; Muraloni *et al.*, 2013). Le REAtouch® se compose d'un écran réactif de 45 pouces monté sur un système réglable permettant de moduler la hauteur et l'inclinaison de la surface réactive. Les participants sont impliqués dans une variété de jeux et d'activités favorisant la pratique de tâches répétitives bimanuelles dans une session de jeu personnalisée intégrant des jeux adaptables comportant des mécanismes de récompenses et de défis. En fonction des jeux et activités pratiqués, les interactions avec la surface réactive se font à l'aide de bases imprimées en 3D

ou de simples interactions par contact avec les mains ou des objets tangibles. Comme chaque base imprimée en 3D est équipée d'une bande Velcro®, les objets manipulés peuvent être adaptés à tous les niveaux de fonctions motrices et aux capacités fonctionnelles entraînées en fixant tout objet thérapeutiquement utile sur les bases imprimées en 3D (illus. n°2).



Illus. n°2.

Illustration du dispositif REAtouch® utilisé dans une intervention HABIT-ILE.

Les images A, B et C montrent des jeux utilisant les bases imprimées en 3D, tandis que l'image D représente un jeu utilisant la simple détection de contacts. Les photos A et B montrent le dispositif REAtouch® dans une position haute pour les activités debout, l'inclinaison de l'écran étant modifiée dans les photos B et C.

Source : clichés personnels.

2.1. Séances avec le REAtouch® et intervention HABIT-ILE

HABIT-ILE (*Hand-Arm Bimanual Intensive Therapy Including Lower Extremities*) est une intervention basée sur l'apprentissage des habiletés motrices qui se concentre sur la stimulation de la coordination bimanuelle avec une stimulation constante et simultanée sur le contrôle du tronc et des membres inférieurs (Bleyenheuft & Gordon, 2014). Comme toute intervention basée sur l'apprentissage de tâches motrices complexes, les principes thérapeutiques d'intensité de la prise en charge (temps d'engagement moteur, quantité de force, effort, etc.), de l'absence de guidance et de contrôle moteur volontaire (« *hands off* »), de « *shaping* », d'activités fonctionnelles axées sur les objectifs du patient ainsi que de motivation avec un feedback approprié sur les tâches motrices sont appliqués pendant les prises en charge HABIT-ILE (Bleyenheuft & Gordon, 2014; Kleim & Jones, 2008; Muratori *et al.*, 2013).

Bien que le dispositif REAtouch® ait été conçu pour permettre l'application de ces principes thérapeutiques, nous soutenons que la présence d'un thérapeute formé ou d'un accompagnateur informé supervisé par un thérapeute formé reste cruciale pour assurer leur application correcte et favoriser l'efficacité

des séances basées sur l'utilisation du REAtouch®. En effet, le dispositif virtuel doit être considéré comme un outil de rééducation plutôt que comme une rééducation en soi (D. E. Levac & Galvin, 2013).

Grâce à sa conception spécifique, il vise à fournir des ressources aux cliniciens pour faciliter l'application d'interventions basées sur l'apprentissage des habiletés motrices par une stimulation constante de tâches bimanuelles, amusantes et motivantes, avec la possibilité d'appliquer avec précision les principes de « *hands off* », d'intensité et d'orientation vers des objectifs fonctionnels fixés par le patient. Cependant, les rôles des thérapeutes, tels que l'identification des objectifs thérapeutiques, le suivi des performances, la structure de l'intervention et de l'environnement thérapeutique, la promotion de schémas moteurs adéquats pour le patient et la possibilité pour l'enfant de transférer les compétences acquises dans ses activités de la vie quotidienne, ne peuvent pas être entièrement assumés par un dispositif basé sur la réalité virtuelle (Bleyenheuft & Gordon, 2014; Glegg & Levac, 2018; D. E. Levac & Galvin, 2013).

Comme pour tout outil thérapeutique, il est probable que l'efficacité des séances utilisant le REAtouch® dépende de la manière dont il sera utilisé. Pour cela, dans le cadre d'une utilisation clinique ultérieure, une formation personnalisée serait probablement souhaitable pour assurer l'efficacité des interventions utilisant sur REAtouch®.

Dans les deux prochains points décrivant les études randomisées contrôlées incluses dans cette thèse, le dispositif REAtouch® sera utilisé en appliquant les principes thérapeutiques de la thérapie HABIT-ILE (Bleyenheuft & Gordon, 2014). Comme lors des séances HABIT-ILE habituelles, les thérapeutes se concentreront sur les activités orientées vers les objectifs fonctionnels définis par l'enfant et sa famille avant l'intervention avec une stimulation constante et simultanée de la coordination bimanuelle, du contrôle du tronc et de la fonction motrice des membres inférieurs.

Pendant les interventions HABIT-ILE, les activités proposées sont réalisées avec une difficulté évoluant progressivement dans trois sous-types d'activités : 1) les activités de table; 2) les activités de la vie quotidienne et 3) les jeux de motricité globale/activités physiques (Bleyenheuft & Gordon, 2014).

1) Pour les membres supérieurs, selon les capacités motrices des enfants et les objectifs fonctionnels, les activités bimanuelles sont progressivement graduées d'un support passif vers des activités bimanuelles plus complexes/qualifiées avec des ajustements des contraintes spatiales ou temporelles et une demande croissante de types de manipulation et de préhension (Bleyenheuft, Arnould,

et al., 2015 ; Bleyenheuft & Gordon, 2014). Pour le contrôle du tronc et des extrémités inférieures, les activités sont réalisées dans différentes positions, toujours en fonction des capacités des enfants et de leurs objectifs fonctionnels. Les activités sur table sont réalisées en étant assis sur un banc, sur un ballon (niveau de gonflage variable), debout sur un sol plat ou sur une planche à bascule.

2) Les activités de la vie quotidienne, y compris l'entraînement des objectifs fonctionnels, peuvent être réalisées dans différentes positions et différents contextes, afin d'apprendre une technique spécifique dans une position facile/ confortable avant de l'entraîner dans une situation réelle, plus difficile. Par exemple, apprendre à nouer une chaussure, à faire une tresse ou à boutonner une chemise d'abord avec la chaussure/la corde/la chemise sur une table tout en étant assis dans une position confortable avant de le faire dans la situation réelle (debout sur un pied, devant le miroir, etc.).

3) Les activités physiques et de motricité globale consistent principalement en des activités de plein air, impliquant la coordination des extrémités supérieures et inférieures (cyclisme, lancer de balles, marche nordique, fabrication de trottinettes, jeu de quilles, saut à la corde, etc.)

Parmi ces trois sous-types d'activités pratiquées pendant les camps HABIT-ILE, l'application de la motricité globale et des activités physiques ne sera pas totalement réalisable pendant les sessions utilisant le REAtouch®. Cela est dû à la nature du dispositif REAtouch® (et d'autres dispositifs virtuels) qui limite son utilisation à l'intérieur et à une certaine limitation dans le choix des activités de motricité globale. En effet, cette limitation est probablement une spécificité des dispositifs virtuels, et pas seulement du REAtouch®. Cependant, le dispositif REAtouch® a été conçu pour permettre la progression complète utilisée pour les activités de table et, en fonction du type d'objectifs fixés, il sera possible de s'entraîner et d'effectuer un large éventail d'activités fonctionnelles pendant les sessions basées sur l'utilisation du REAtouch®.

3. Efficacité du REAtouch® lors d'un stage HABIT-ILE pour des enfants atteints de paralysie cérébrale unilatérale : étude randomisée contrôlée

L'objectif de cette étude est de tester la non-infériorité des changements dans les fonctions motrices, les activités de la vie quotidienne et la participation sociale des enfants atteints de paralysie cérébrale unilatérale lors du remplacement de la moitié du temps thérapeutique d'un stage HABIT-ILE par des

sessions basées sur l'utilisation du REAtouch®. Nous émettons l'hypothèse que l'inclusion de séances utilisant le REAtouch® dans un contexte intensif de thérapie HABIT-ILE sera aussi efficace que l'intervention habituelle HABIT-ILE chez les enfants atteints de paralysie cérébrale.

Ce projet a été mené par le laboratoire Motor Skill Learning and Intensive Neurorehabilitation (MSL-IN), UCLouvain, Bruxelles, Belgique, en collaboration avec l'équipe BEaCHILD (Latim INSERM UMR), Brest, France. Quarante enfants atteints de paralysie cérébrale unilatérale ont participé à un stage de thérapie HABIT-ILE de 90 h réalisé durant 10 jours ouvrables consécutifs (9 h de thérapie par jour). Pour les enfants randomisés dans le groupe d'intervention REAtouch®, la thérapie HABIT-ILE a été réalisée via l'utilisation du dispositif REAtouch® pendant la moitié du temps thérapeutique individuel (en excluant \pm 45 min pour la prise de repas et \pm 30 min d'activité de groupe chaque jour). Nous avons divisé le temps thérapeutique REAtouch® en deux sessions (matin et après-midi) d'une durée de 1 h 30 à 2 h.

3.1. Évaluations réalisées

Les enfants ont réalisé trois sessions de tests : la semaine précédant l'intervention (T1), après l'intervention (T2) et lors du suivi 3 mois plus tard (T3).

La mesure principale utilisée est le *Assisting Hand Assessment* (AHA) (Krumlinde-Sundholm, Holmfur, Kottorp, & Eliasson, 2007; Louwers, Beelen, Holmfur, & Krumlinde-Sundholm, 2016). Le AHA est un test de la fonction de la main chez les enfants ayant des difficultés à utiliser une de leurs mains. Ce test mesure l'efficacité avec laquelle la main et le bras affectés sont utilisés dans la performance bimanuelle. L'évaluation est réalisée en observant la manipulation spontanée de jouets par l'enfant dans une session de jeu à table détendue et ludique.

Les mesures secondaires ont évalué la fonction de la main (dextérité), mais également la stéréognosie, l'endurance à la marche et une série de questionnaires complétés par les parents permettant de mesurer la performance de l'enfant dans des activités de vie quotidienne. Enfin, la mesure canadienne du rendement occupationnel (MCRO) nous a permis de fixer, avec le patient et sa famille, 5 objectifs fonctionnels propres au patient et d'en évaluer la performance du patient ainsi que la satisfaction concernant cette performance à chacune des évaluations (Cusick, Lannin, & Lowe, 2007).

Nous avons recueilli des données d'accéléromètres portés au poignet pour contrôler l'intensité de l'intervention en termes de répétitions de mouvements des membres supérieurs. Afin de quantifier davantage le temps d'engagement moteur pendant l'intervention thérapeutique et de déterminer le type d'activités réalisées, les thérapeutes ont systématiquement documenté le contenu du traitement en définissant la durée et le type d'activités pour les extrémités supérieures (dextérité globale/fines, jeux de cartes, art et artisanat, activités fonctionnelles/de la vie quotidienne) et inférieures (assis sur un ballon/un banc, debout, planche d'équilibre, marche, course/saut, vélo, trottinette...).

3.2. Analyses statistiques

Comme le but de l'étude était de tester la non-infériorité d'un stage HABIT-ILE utilisant le dispositif REAtouch® par rapport à un stage HABIT-ILE classique, les changements observés entre les sessions de test ont été comparés en utilisant des analyses statistiques de non-infériorité (Blackwelder, 1982 ; Schiller, Burchardi, Niestroj, & Kieser, 2012).

Les analyses statistiques de non-infériorité sont utilisées pour tester la non-infériorité de l'efficacité d'une nouvelle « approche alternative » par rapport à un *gold standard*, contrairement aux analyses statistiques de supériorité habituellement réalisées pour mettre en évidence la différence entre les groupes. L'approche « alternative » est ici la mise en place de sessions basées sur l'utilisation du REAtouch® lors d'un stage HABIT-ILE par rapport au *gold-standard* défini ici comme le stage HABIT-ILE classique.

3.3. Résultats et discussion

Les deux groupes ont montré des améliorations significatives dans la plupart des outils utilisés, comme cela a été rapporté dans les études précédentes sur HABIT-ILE pour les enfants atteints de paralysie cérébrale unilatérale (Bleyenheuft, Arnould, *et al.*, 2015 ; Paradis *et al.*, 2018 ; Saussez, Brandao, Gordon, & Bleyenheuft, 2017). En outre, les résultats ont montré une non-infériorité généralement significative des changements observés dans le groupe REAtouch® par rapport au groupe HABIT-ILE « classique ».

Les résultats observés dans cette étude suggèrent que l'utilisation de sessions basées sur le REAtouch® pendant une intervention HABIT-ILE est faisable et efficace pour améliorer les fonctions motrices et le transfert des apprentissages dans les situations de la vie quotidienne chez les enfants atteints

de paralysie cérébrale unilatérale. Nous soutenons que ces changements non inférieurs dans le groupe REAtouch® ont été obtenus, car, comme dans une intervention HABIT-ILE « habituelle » (Bleyenheuft & Gordon, 2014), tous les principes thérapeutiques clés des interventions basées sur l'apprentissage de tâches motrices complexes ont été appliqués pendant les sessions utilisant le REAtouch® (Kleim & Jones, 2008 ; Levin *et al.*, 2015 ; Muratori *et al.*, 2013 ; Novak *et al.*, 2020).

Bien que des résultats significatifs aient été observés pour la plupart des mesures de résultats, quelques mesures n'ont pas présenté une non-infériorité significative des changements observés dans le groupe REAtouch® par rapport au groupe HABIT-ILE et ce, principalement pour les résultats liés à la fonction motrice des membres inférieurs.

Les résultats du test d'endurance à la marche non pas montré d'amélioration significative dans le groupe REAtouch®, ni de non-infériorité des changements par rapport au groupe HABIT-ILE classique. Ces résultats ne permettent pas de conclure à la non-infériorité des sessions REAtouch® pour l'amélioration des fonctions motrices des membres inférieurs chez des enfants ayant une paralysie cérébrale unilatérale. D'une certaine manière, ces résultats sont cohérents avec les conclusions de Chen *et al.* qui montrent une moins bonne efficacité des dispositifs virtuels sur la fonction motrice des membres inférieurs des enfants atteints de paralysie cérébrale unilatérale par rapport à ceux atteints de paralysie cérébrale bilatérale (Y. Chen *et al.*, 2018). Ces moins bonnes améliorations observées dans les interventions basées sur l'utilisation d'outils virtuels pour les enfants atteints de paralysie cérébrale unilatérale pourraient s'expliquer par la complexité de structurer précisément et de cibler spécifiquement l'intervention pour les membres inférieurs puisque les activités difficiles à réaliser et stimulantes pour ces enfants ayant des difficultés motrices unilatérales pourraient être difficiles à intégrer dans de tels environnements virtuels (marcher sur des sols irréguliers, monter/descendre les escaliers, faire du vélo/de la trottinette, courir...).

4. Efficacité de l'utilisation du REAtouch dans un cadre de réadaptation conventionnelle pour des enfants atteints de paralysie cérébrale : étude randomisée contrôlée

Cet essai contrôlé randomisé a été conduit par le laboratoire Motor Skill Learning & Intensive Neurorehabilitation lab, UCLouvain, Belgique. L'inter-

vention a été menée dans deux écoles adaptées de type 4 en Belgique au cours de l'année scolaire 2018-2019 : le Centre Arnaud Fraiteur (CAF) et l'Institut royal d'accueil pour le handicap moteur (IRAHM).

Les enfants des deux écoles ont été répartis en deux groupes équilibrés en fonction de leurs caractéristiques (sous-type de paralysie cérébrale, âge, et niveaux moteurs). Ces groupes ont ensuite été assignés de manière aléatoire à la rééducation conventionnelle ou au groupe REAtouch®.

Les interventions ont été dispensées pendant 8 semaines (4 sessions de 50 minutes par semaine), suivies d'une période de suivi de 3 mois avec la rééducation conventionnelle habituelle. Pendant les 8 semaines du programme, les enfants du groupe témoin de rééducation conventionnelle ont suivi leur programme de rééducation habituel (ergothérapie et kinésithérapie). Les enfants du groupe REAtouch® ont utilisé l'outil pour la moitié des séances thérapeutiques individuelles pendant les 8 semaines d'intervention (2 séances/semaine, 13 h 20 min au total). Pour les deux autres séances (une ergothérapie, une kinésithérapie), il a été demandé aux thérapeutes de poursuivre leur rééducation conventionnelle habituelle.

4.1. Évaluations réalisées

Les enfants ont subi 3 sessions de tests : la semaine précédant l'intervention (T1), après les 8 semaines d'intervention (T2), et 3 mois après la fin de l'intervention (T3).

Notre mesure principale était le questionnaire ABILHAND-Kids complété par les parents et mesurant la capacité des enfants à gérer les activités de la vie quotidienne nécessitant principalement une coordination bimanuelle (Arnould *et al.*, 2004).

Les mesures secondaires mesuraient la fonction de la main (dextérité et utilisation spontanée du membre supérieur assistant). Les capacités locomotrices ont également été évaluées afin de mesurer les capacités de motricité globale et l'endurance à la marche. Finalement, en plus d'ABILHAND-Kids, d'autres questionnaires rapportés par les parents ont été utilisés pour évaluer les capacités des enfants lors des activités de la vie quotidienne nécessitant la coordination des extrémités supérieures et inférieures. Les objectifs fonctionnels ont été fixés après la première séance d'évaluation par l'enfant et ses parents avec le premier investigateur en utilisant la Mesure canadienne du rendement occupationnel (MCRO) (Cusick *et al.*, 2007). Les mesures de performance et de

satisfaction ont été notées à chaque séance de test. À titre de comparaison, les objectifs thérapeutiques fixés (par les thérapeutes) pour les sessions conventionnelles ont été reportés par les thérapeutes habituels de l'enfant (kinésithérapeute et ergothérapeute).

4.2. Analyses statistiques

Les changements entre les groupes et les sessions de test ont été comparés à l'aide d'une ANOVA à deux facteurs (2 groupes \times 3 sessions de test) à mesures répétées. Des analyses post-hoc ont été effectuées avec la méthode de Student-Newman-Keuls.

4.3. Résultats et discussion

Cette étude a montré la faisabilité et l'efficacité partielle de l'utilisation des sessions basées sur REAtouch® pour la moitié du temps thérapeutique en tête-à-tête dans un contexte conventionnel de faible dosage. L'utilisation d'une intervention basée sur l'apprentissage des habiletés motrices orientée vers un objectif pendant les sessions basées sur REAtouch® a montré une plus grande efficacité sur les objectifs fonctionnels fixés par les enfants et les parents, mais pas d'améliorations significatives claires dans les fonctions motrices et les questionnaires sur les activités de la vie quotidienne rapportés par les parents. Ces résultats suggèrent l'intérêt de former les cliniciens à l'application des principes thérapeutique liés aux connaissances autour de l'apprentissage des tâches complexes et des thérapies basées sur des objectifs fonctionnels fixés par le patient, en utilisant ou non le dispositif REAtouch®. De plus, nos résultats soulignent également la présence d'un seuil minimal de dosage thérapeutique nécessaire pour observer des améliorations significatives des résultats des fonctions motrices chez des enfants atteints de paralysie cérébrale unilatérale et bilatérale.

5. Conclusion

Dans le cadre de ce travail, nous avons montré qu'en plus de la nécessité d'une dose thérapeutique minimale (environ 30 à 45 h), l'application de principes thérapeutiques basés sur l'apprentissage des habiletés motrices joue un rôle clé pour l'efficacité des rééducations motrices dites « intensives » à haute dose chez les enfants atteints de paralysie cérébrale (seul un grand nombre d'heures ne suffit pas, le contenu thérapeutique joue un rôle important dans l'efficacité des thérapies motrices).

Nous avons observé que tous les ingrédients thérapeutiques basés sur l'apprentissage des habiletés motrices pouvaient être utilisés dans le cadre d'une rééducation de la fonction motrice chez les enfants atteints de paralysie cérébrale à l'aide d'un dispositif virtuel spécialement conçu dans ce but, le REAtouch®. L'utilisation de sessions basées sur le REAtouch® dans le cadre de stages HABIT-ILE a montré des améliorations significatives chez les enfants atteints de paralysie cérébrale unilatérale, avec une non-infériorité des changements par rapport à l'intervention habituelle HABIT-ILE pour les mesures de la fonction motrice des extrémités supérieures et le transfert dans les activités de la vie quotidienne. Pour les extrémités inférieures, la non-infériorité n'était pas toujours présente, probablement en raison des niveaux élevés d'activités motrices à entraîner chez les enfants atteints de paralysie cérébrale unilatérale (par exemple, activités de plein air, cyclisme, etc.).

Au contraire, aucune amélioration significative et claire de la fonction motrice n'a été trouvée pour une intervention basée sur l'utilisation du REAtouch® couplée à une prise en charge conventionnelle donnée dans un contexte de faible dosage thérapeutique (4 × 50 minutes par semaines, sur 8 semaines). Cependant, les améliorations significativement plus importantes pour les objectifs fonctionnels trouvées dans le groupe REAtouch® par rapport au groupe de rééducation conventionnelle soutiennent l'intérêt des interventions basées sur les principes thérapeutiques liés à l'apprentissage de tâches motrices complexes et orientées vers des objectifs fonctionnels fixés par le patient et sa famille même avec un dosage thérapeutique conventionnel (faible).

6. Considérations cliniques et ouvertures

D'un point de vue clinique, les preuves de l'efficacité des séances basées sur l'utilisation du REAtouch® — principalement sur les fonctions motrices et les activités de la vie quotidienne chez les enfants atteints de paralysie cérébrale — offrent de nouvelles possibilités d'appliquer des interventions basées sur des évidences scientifiques dans un contexte clinique.

Pour les stages de thérapies intensives, le dispositif REAtouch® peut aider à augmenter ou à maintenir la motivation du patient et offrir aux thérapeutes la possibilité de promouvoir des activités dans un environnement virtuel ayant prouvé son efficacité.

Nos résultats encouragent également la mise en œuvre du dispositif REAtouch® dans des environnements plus conventionnels tels que les écoles spéciali-

sées ou les centres de réadaptation. Dans ce contexte, nous suggérons fortement le développement d'une courte formation pour les thérapeutes à l'utilisation de l'appareil et à l'application de principes thérapeutiques basés sur l'apprentissage des habiletés motrices. Cette combinaison d'une formation préliminaire et de l'utilisation du dispositif REAtouch® permettrait aux thérapeutes d'appliquer plus facilement les principes thérapeutiques fondés sur des évidences scientifiques dans leur pratique actuelle et, au minimum, de promouvoir des améliorations plus importantes de l'indépendance de la vie quotidienne pour les enfants atteints de paralysie cérébrale sur la base d'objectifs fonctionnels définis par le patient et sa famille en communication avec le thérapeute.

Un troisième domaine d'utilisation du REAtouch® pourrait être l'implémentation au domicile du patient et la mise en place d'un suivi de télé-réhabilitation. Tout comme son utilisation dans un cadre conventionnel, le dispositif REAtouch® peut aider les parents ou la personne accompagnante à appliquer tous les ingrédients thérapeutiques basés sur l'apprentissage des tâches motrices complexes dans un contexte motivant. Des développements supplémentaires pourraient être nécessaires pour rendre le dispositif moins encombrant, établir une procédure de formation pour l'accompagnateur et définir un protocole de supervision réalisée par un thérapeute formé (type et fréquence des interactions, formation nécessaire à la supervision, définition des objets manipulés, conception des environnements, etc.). Un tel développement donnerait des outils aux familles qui ne peuvent pas participer à des interventions à haute dose (lieu de vie isolé, questions organisationnelles/financières, situations de pandémie) pour bénéficier d'une rééducation à domicile basée sur l'apprentissage de la motricité et des principes thérapeutiques dirigés vers un but.

De plus, il serait intéressant dans ce contexte d'implémenter certains outils d'évaluation dans le dispositif REAtouch® afin de documenter avec précision les changements après l'intervention. Cela serait particulièrement intéressant pour les interventions à domicile, mais aussi dans les centres de rééducation afin de donner la possibilité aux parents et aux thérapeutes d'évaluer l'efficacité de l'intervention.

Bibliographie

- Araneda, R., Klöcker, A., Ebner-Karestinos, D., Sogbossi, E.S., Renders, A., Saussez, G., . . . Bleyenheuft, Y. (2021). Feasibility and effectiveness of HABIT-ILE in children aged 1 to 4 years with cerebral palsy: A pilot study. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 64(3), 101381. doi:10.1016/j.rehab.2020.03.006

- Arnould, C., Penta, M., Renders, A., & Thonnard, J.-L. (2004). ABILHAND-Kids: a measure of manual ability in children with cerebral palsy. *Neurology*, 63(6), 1045-1052.
- Bhargava, A., Bertrand, J.W., Gramopadhye, A.K., Madathil, K.C., & Babu, S.V. (2018). Evaluating Multiple Levels of an Interaction Fidelity Continuum on Performance and Learning in Near-Field Training Simulations. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 24(4), 1418-1427. doi:10.1109/tvcg.2018.2794639
- Blackwelder, W. C. (1982). « Proving the null hypothesis » in clinical trials. *Controlled Clinical Trials*, 3(4), 345-353. doi:10.1016/0197-2456(82)90024-1
- Bleyenheuft, Y., Arnould, C., Brandao, M.B., Bleyenheuft, C., & Gordon, A.M. (2015). Hand and Arm Bimanual Intensive Therapy Including Lower Extremity (HABIT-ILE) in Children With Unilateral Spastic Cerebral Palsy : A Randomized Trial. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 29(7), 645-657. doi:10.1177/1545968314562109
- Bleyenheuft, Y., Dricot, L., Ebner-Karestinos, D., Paradis, J., Saussez, G., Renders, A., . . . Friel, K.M. (2020). Motor Skill Training May Restore Impaired Corticospinal Tract Fibers in Children With Cerebral Palsy. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 34(6), 533-546. doi:10.1177/1545968320918841
- Bleyenheuft, Y., Dricot, L., Gilis, N., Kuo, H.C., Grandin, C., Bleyenheuft, C., . . . Friel, K.M. (2015). Capturing neuroplastic changes after bimanual intensive rehabilitation in children with unilateral spastic cerebral palsy : A combined DTI, TMS and fMRI pilot study. *Research in Developmental Disabilities*, 43-44, 136-149. doi:10.1016/j.ridd.2015.06.014
- Bleyenheuft, Y., Ebner-Karestinos, D., Surana, B., Paradis, J., Sidiropoulos, A., Renders, A., . . . Gordon, A.M. (2017). Intensive upper- and lower-extremity training for children with bilateral cerebral palsy : a quasi-randomized trial. *Developmental Medicine and Child Neurology*. doi:10.1111/dmcn.13379
- Bleyenheuft, Y., & Gordon, A.M. (2014). Hand-arm bimanual intensive therapy including lower extremities (HABIT-ILE) for children with cerebral palsy. *Physical & Occupational Therapy in Pediatrics*, 34(4), 390-403. doi:10.3109/01942638.2014.932884
- Bleyenheuft, Y., Paradis, J., Renders, A., Thonnard, J.-L., & Arnould, C. (2017). ACTIVLIM-CP a new Rasch-built measure of global activity performance for children with cerebral palsy. *Research in Developmental Disabilities*, 60, 285-294. doi:10.1016/j.ridd.2016.10.005
- Charles, J., & Gordon, A.M. (2006). Development of hand-arm bimanual intensive training (HABIT) for improving bimanual coordination in children with hemiplegic cerebral palsy. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 48(11), 931-936. doi:10.1017/s0012162206002039
- Charles, J.R., Wolf, S.L., Schneider, J.A., & Gordon, A.M. (2006). Efficacy of a child-friendly form of constraint-induced movement therapy in hemiplegic

- cerebral palsy : a randomized control trial. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 48(8), 635-642. doi:10.1017/s0012162206001356
- Chen, Y.-P., & Howard, A.M. (2016). Effects of robotic therapy on upper-extremity function in children with cerebral palsy : a systematic review. *Developmental Neurorehabilitation*, 19(1), 64-71.
- Chen, Y., Fanchiang, H.D., & Howard, A. (2018). Effectiveness of Virtual Reality in Children With Cerebral Palsy : A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Physical Therapy*, 98(1), 63-77. doi:10.1093/ptj/pzx107
- Cusick, A., Lannin, N.A., & Lowe, K. (2007). Adapting the Canadian Occupational Performance Measure for use in a paediatric clinical trial. *Disability and Rehabilitation*, 29(10), 761-766. doi:10.1080/09638280600929201
- de Brito Brandao, M., Gordon, A.M., & Mancini, M.C. (2012). Functional impact of constraint therapy and bimanual training in children with cerebral palsy : a randomized controlled trial. *The American Journal of Occupational Therapy*, 66(6), 672-681. doi:10.5014/ajot.2012.004622
- Domínguez-Téllez, P., Moral-Muñoz, J.A., Salazar, A., Casado-Fernández, E., & Lucena-Antón, D. (2020). Game-Based Virtual Reality Interventions to Improve Upper Limb Motor Function and Quality of Life After Stroke : Systematic Review and Meta-analysis. *Games Health Journal*, 9(1), 1-10. doi:10.1089/g4h.2019.0043
- Eliasson, A.C., Krumlinde-sundholm, L., Shaw, K., & Wang, C. (2005). Effects of constraint-induced movement therapy in young children with hemiplegic cerebral palsy: an adapted model. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 47(4), 266-275.
- Eliasson, A.C., Nordstrand, L., Ek, L., Lennartsson, F., Sjostrand, L., Tedroff, K., & Krumlinde-Sundholm, L. (2018). The effectiveness of Baby-CIMT in infants younger than 12 months with clinical signs of unilateral-cerebral palsy; an explorative study with randomized design. *Research in Developmental Disabilities*, 72, 191-201. doi:10.1016/j.ridd.2017.11.006
- Feys, P., & Straudi, S. (2019). Beyond therapists : Technology-aided physical MS rehabilitation delivery. *Multiple Sclerosis*, 25(10), 1387-1393. doi:10.1177/1352458519848968
- Friel, K.M., Kuo, H.C., Fuller, J., Ferre, C.L., Brandao, M., Carmel, J.B., . . . Gordon, A.M. (2016). Skilled Bimanual Training Drives Motor Cortex Plasticity in Children With Unilateral Cerebral Palsy. *Neurorehabilitation and Neural Repair*. doi:10.1177/1545968315625838
- Gilliaux, M., Renders, A., Dispa, D., Holvoet, D., Sapin, J., Dehez, B., . . . Stoquart, G. (2014). Upper Limb Robot-Assisted Therapy in Cerebral Palsy A Single-Blind Randomized Controlled Trial. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 1545968314541172.
- Glegg, S.M.N., & Levac, D.E. (2018). Barriers, Facilitators and Interventions to Support Virtual Reality Implementation in Rehabilitation : A Scoping Review.

- PM & R : The Journal of Injury, Function, and Rehabilitation*, 10(11), 1237-1251.e1231. doi:10.1016/j.pmrj.2018.07.004
- Gordon, A.M., Charles, J., & Wolf, S.L. (2005). Methods of constraint-induced movement therapy for children with hemiplegic cerebral palsy : development of a child-friendly intervention for improving upper-extremity function. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 86(4), 837-844. doi:10.1016/j.apmr.2004.10.008
- Gordon, A.M., Hung, Y.C., Brandao, M., Ferre, C.L., Kuo, H.C., Friel, K., . . . Charles, J.R. (2011). Bimanual training and constraint-induced movement therapy in children with hemiplegic cerebral palsy : a randomized trial. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 25(8), 692-702. doi:10.1177/1545968311402508
- Gordon, A.M., Schneider, J.A., Chinnan, A., & Charles, J.R. (2007). Efficacy of a hand-arm bimanual intensive therapy (HABIT) in children with hemiplegic cerebral palsy : a randomized control trial. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 49(11), 830-838. doi:10.1111/j.1469-8749.2007.00830.x
- Graham, H.K., Rosenbaum, P., Paneth, N., Dan, B., Lin, J.P., Damiano, D.L., . . . Lieber, R.L. (2016). Cerebral palsy. *Nature reviews. Disease Primers*, 2, 15082. doi:10.1038/nrdp.2015.82
- Green, D., & Wilson, P.H. (2012). Use of virtual reality in rehabilitation of movement in children with hemiplegia - A multiple case study evaluation. *Disability and Rehabilitation*, 34(7), 593-604. doi:10.3109/09638288.2011.613520
- Hochstenbach-Waelen, A., Timmermans, A., Seelen, H., Tetteroo, D., & Markopoulos, P. (2012). Tag-exercise creator : towards end-user development for tangible interaction in rehabilitation training. *Paper presented at the Proceedings of the 4th ACM SIGCHI symposium on Engineering interactive computing systems*.
- Hung, Y.C., & Gordon, A.M. (2018). Virtual reality training for children with unilateral cerebral palsy. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 60(4), 334-335. doi:10.1111/dmcn.13699
- Johansen, T., Strom, V., Simic, J., & Rike, P.O. (2019). Effectiveness of training with motion-controlled commercial video games on hand and arm function in young people with cerebral palsy : A systematic review and meta-analysis. *Journal of Rehabilitation Medicine*, 52(1), jrm00012. doi:10.2340/16501977-2633
- Kleim, J.A., & Jones, T.A. (2008). Principles of experience-dependent neural plasticity : implications for rehabilitation after brain damage. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 51(1), S225-239. doi:10.1044/1092-4388(2008/018)
- Knippenberg, E., Verbrugge, J., Lamers, I., Palmaers, S., Timmermans, A., & Spoor, A. (2017). Markerless motion capture systems as training device in neurological rehabilitation : a systematic review of their use, application, target population and efficacy. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 14(1), 61. doi:10.1186/s12984-017-0270-x

- Krumlinde-Sundholm, L., Holmefur, M., Kottorp, A., & Eliasson, A.C. (2007). The Assisting Hand Assessment : current evidence of validity, reliability, and responsiveness to change. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 49(4), 259-264. doi:10.1111/j.1469-8749.2007.00259.x
- Laver, K.E., Lange, B., George, S., Deutsch, J.E., Saposnik, G., & Crotty, M. (2017). Virtual reality for stroke rehabilitation. *The Cochrane Database of Systematic Review*, 11, Cd008349. doi:10.1002/14651858.CD008349.pub4
- Levac, D., Glegg, S., Colquhoun, H., Miller, P., & Noubary, F. (2017). Virtual Reality and Active Videogame-Based Practice, Learning Needs, and Preferences : A Cross-Canada Survey of Physical Therapists and Occupational Therapists. *Games Health Journal*, 6(4), 217-228. doi:10.1089/g4h.2016.0089
- Levac, D., Rivard, L., & Missiuna, C. (2012). Defining the active ingredients of interactive computer play interventions for children with neuromotor impairments: a scoping review. *Research in Developmental Disabilities*, 33(1), 214-223. doi:10.1016/j.ridd.2011.09.007
- Levac, D.E., & Galvin, J. (2013). When is virtual reality «therapy»? *Archives in Physical Medicine and Rehabilitation*, 94(4), 795-798. doi:10.1016/j.apmr.2012.10.021
- Levac, D.E., Huber, M.E., & Sternad, D. (2019). Learning and transfer of complex motor skills in virtual reality : a perspective review. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 16(1), 121. doi:10.1186/s12984-019-0587-8
- Levin, M.F., Weiss, P.L., & Keshner, E.A. (2015). Emergence of virtual reality as a tool for upper limb rehabilitation : incorporation of motor control and motor learning principles. *Physical Therapy*, 95(3), 415-425. doi:10.2522/ptj.20130579
- Louwens, A., Beelen, A., Holmefur, M., & Krumlinde-Sundholm, L. (2016). Development of the Assisting Hand Assessment for adolescents (Ad-AHA) and validation of the AHA from 18 months to 18 years. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 58(12), 1303-1309. doi:10.1111/dmcn.13168
- Massetti, T., da Silva, T.D., Crocetta, T.B., Guarnieri, R., de Freitas, B.L., Bianchi Lopes, P., . . . de Mello Monteiro, C.B. (2018). The Clinical Utility of Virtual Reality in Neurorehabilitation : A Systematic Review. *Journal of Central Nervous System Disease*, 10(1179573518813541).
- Meyer-Heim, A., & van Hedel, H.J. (2013). Robot-assisted and computer-enhanced therapies for children with cerebral palsy : current state and clinical implementation. *Seminars in Pediatric Neurology*, 20(2), 139-145. doi:10.1016/j.spn.2013.06.006
- Mumford, N., Duckworth, J., Thomas, P.R., Shum, D., Williams, G., & Wilson, P.H. (2012). Upper-limb virtual rehabilitation for traumatic brain injury : a preliminary within-group evaluation of the elements system. *Brain Injury*, 26(2), 166-176. doi:10.3109/02699052.2011.648706
- Muratori, L.M., Lamberg, E.M., Quinn, L., & Duff, S.V. (2013). Applying principles of motor learning and control to upper extremity rehabilitation. *Journal of Hand Therapy*, 26(2), 94-102; quiz 103. doi:10.1016/j.jht.2012.12.007

- Novak, I., McIntyre, S., Morgan, C., Campbell, L., Dark, L., Morton, N., . . . Goldsmith, S. (2013). A systematic review of interventions for children with cerebral palsy : state of the evidence. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 55(10), 885-910. doi:10.1111/dmcn.12246
- Novak, I., Morgan, C., Fahey, M., Finch-Edmondson, M., Galea, C., Hines, A., . . . Badawi, N. (2020). State of the Evidence Traffic Lights 2019 : Systematic Review of Interventions for Preventing and Treating Children with Cerebral Palsy. *Current Neurology and Neuroscience Reports*, 20(2), 3. doi:10.1007/s11910-020-1022-z
- Organization, W.H. (2001). *International classification of functioning, disability and health*: ICF: Geneva: World Health Organization.
- Paradis, J., Arnould, C., Thonnard, J.-L., Houx, L., Pons-Becmeur, C., Renders, A., . . . Bleyenheuft, Y. (2018). Responsiveness of the ACTIVLIM-CP questionnaire : measuring global activity performance in children with cerebral palsy. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 60(11), 1178-1185. doi:10.1111/dmcn.13927
- Ranganathan, R., Wieser, J., Mosier, K.M., Mussa-Ivaldi, F.A., & Scheidt, R.A. (2014). Learning redundant motor tasks with and without overlapping dimensions : facilitation and interference effects. *Journal of Neuroscience*, 34(24), 8289-8299. doi:10.1523/jneurosci.4455-13.2014
- Ravi, D.K., Kumar, N., & Singhi, P. (2017). Effectiveness of virtual reality rehabilitation for children and adolescents with cerebral palsy : an updated evidence-based systematic review. *Physiotherapy*, 103(3), 245-258. doi:10.1016/j.physio.2016.08.004
- Richards, C.L., & Malouin, F. (2013). Cerebral palsy : definition, assessment and rehabilitation. *Handbook of Clinical Neurology*, 111, 183-195. doi:10.1016/b978-0-444-52891-9.00018-x
- Robert, M.T., & Levin, M.F. (2018). Validation of reaching in a virtual environment in typically developing children and children with mild unilateral cerebral palsy. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 60(4), 382-390. doi:10.1111/dmcn.13688
- Rogers, J.M., Duckworth, J., Middleton, S., Steenbergen, B., & Wilson, P.H. (2019). Elements virtual rehabilitation improves motor, cognitive, and functional outcomes in adult stroke : evidence from a randomized controlled pilot study. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 16(1), 56. doi:10.1186/s12984-019-0531-y
- Rosenbaum, P., Paneth, N., Leviton, A., Goldstein, M., Bax, M., Damiano, D., . . . Jacobsson, B. (2007). A report : the definition and classification of cerebral palsy April 2006. *Developmental Medicine and Child Neurology Supplement*, 109, 8-14.
- Saussez, G., Brandao, M.B., Gordon, A.M., & Bleyenheuft, Y. (2017). Including a Lower-Extremity Component during Hand-Arm Bimanual Intensive Training does not Attenuate Improvements of the Upper Extremities : A Retrospec-

- tive Study of Randomized Trials. *Frontiers in Neurology*, 8, 495. doi:10.3389/fneur.2017.00495
- Schiller, P., Burchardi, N., Niestroj, M., & Kieser, M. (2012). Quality of reporting of clinical non-inferiority and equivalence randomised trials--update and extension. *Trials*, 13, 214. doi:10.1186/1745-6215-13-214
- Sveistrup, H. (2004). Motor rehabilitation using virtual reality. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 1(1), 10. doi:10.1186/1743-0003-1-10
- Thomson, K., Pollock, A., Bugge, C., & Brady, M. (2014). Commercial gaming devices for stroke upper limb rehabilitation : a systematic review. *International Journal of Stroke*, 9(4), 479-488. doi:10.1111/ijss.12263
- Weinstein, M., Myers, V., Green, D., Schertz, M., Shiran, S.I., Geva, R., . . . Ben Bashat, D. (2015). Brain Plasticity following Intensive Bimanual Therapy in Children with Hemiparesis : Preliminary Evidence. *Neural plasticity*, 2015, 798481. doi:10.1155/2015/798481
- Weiss P.L.K.N. (2004). The potential of virtual reality for rehabilitation. In D. o. M. a. S. Veterans Administration, Rehabilitation R & D Service (Ed.), *Journal of Rehabilitation Research & Development* (Vol. 41, pp. 161-163). New York.

