

# L'efficacité potentielle de l'électrostimulation sur le fonctionnement du membre supérieur du sujet hémiparétique/plégique provient-elle des courants électriques et/ou de l'observation motrice ?

MARINE LEBRUN  
[marine-lebrun@orange.fr](mailto:marine-lebrun@orange.fr)

*PROMOTEURS : RALPH DELIRE & CARLYNE ARNOULD*  
*Laboratoire Forme et Fonctionnement Humain*  
*Département de kinésithérapie*  
*Haute école Louvain-en-Hainaut*  
*136, rue Trieu Kaisin*  
*B – 6061, Montignies-sur-Sambre*  
[arnouldc@helha.be](mailto:arnouldc@helha.be)

**RÉSUMÉ.** – L'objectif de cette étude est de montrer si l'efficacité potentielle de l'électrostimulation neuromusculaire (NMES) sur le fonctionnement du membre supérieur du sujet hémiparétique/plégique provient des courants électriques et/ou de l'observation motrice. Neuf sujets ont été stratifiés puis randomisés en 2 groupes : un groupe expérimental recevant la NMES associée à l'observation motrice du membre supérieur (n=5, seuls 4 ayant été inclus dans l'analyse) et un groupe contrôle recevant la NMES sans accès visuel au membre en mouvement (n=4). La NMES, appliquée aux extenseurs du poignet et des doigts en complément de la thérapie conventionnelle, a été administrée à raison de 24 séances de 25 minutes réparties sur 4 semaines. Les évaluations Fugl-Meyer (sous-score moteur du membre supérieur), *Stroke Upper Limb Capacity Scale* et ABILHAND ont été réalisées avant (T0), après (T1) et 1 mois après la fin du traitement (T2). Globalement, les deux groupes tendent à améliorer

l'ensemble des scores entre T0-T1 et entre T0-T2, avec des améliorations plus importantes pour le groupe expérimental. Contrairement aux sujets du groupe contrôle, les sujets du groupe expérimental amélioraient significativement leur habileté manuelle entre T0-T1 et entre T0-T2. L'observation motrice semble apporter de réels bénéfices lors de l'application de la NMES sur la récupération motrice et fonctionnelle du membre supérieur parétique et devrait être prise en compte dans de futures études et dans la pratique clinique.

**ABSTRACT.** – The aim of this study is to demonstrate whether the potential efficacy of neuromuscular electrical stimulation (NMES) on the functioning of the upper extremity of a hemiparetic/hemiplegic subject derives from the electrical currents and/or the motor observation. Nine subjects were stratified and randomised into 2 groups: an experimental group receiving the NMES combined with the motor observation of the upper limb (n=5, with only 4 included in the analysis) and a control group receiving NMES without visual access to the upper extremity in motion (n=4). NMES, applied to wrist and finger extensors in addition to conventional therapy, was administered in 24 sessions of 25 minutes each over a period of 4 weeks. Fugl-Meyer (motor sub-score of upper limb), Stroke Upper Limb Capacity Scale, and ABILHAND assessments were performed before (T0), after (T1), and 1 month after completion of treatment (T2). On the whole, both groups tended to improve overall scores between T0-T1 and between T0-T2, with greater improvements in the experimental group. Contrary to the control group, subjects in the experimental group significantly improved their manual ability between T0-T1 and between T0-T2. Motor observation seems to offer a real advantage when applying NMES for motor and functional recovery of the paretic upper limb and should thus be taken into account in future studies and clinical practice.

**MOTS CLÉS.** – Accident vasculaire cérébral — Électrostimulation neuromusculaire — Observation motrice — Membre supérieur

## 1. Introduction

En 2016, le risque d'avoir un accident vasculaire cérébral (AVC) au cours de sa vie était estimé à 25 % dans la population des plus de 25 ans (Gorelick, 2019). Près de 13,7 millions de nouveaux cas d'AVC ont été recensés dans le monde en 2016 (Global Burden of Diseases 2016 Neurology Collaborators, 2019). Sa prévalence croît en raison du vieillissement de la population, des campagnes de prévention et de l'amélioration de la prise en charge aiguë des AVC ischémiques (Ovbiagele *et al.*, 2013).

La majorité des personnes survivant à un AVC présentent une déficience motrice à long terme, l'hémi-parésie voire l'hémiplégie, touchant souvent plus sévèrement le membre supérieur et notamment son extrémité distale du côté controlatéral à la lésion cérébrale (Boyaci *et al.*, 2013 ; Hatem *et al.*, 2016). Ceci engendre des limitations fonctionnelles d'activités à long terme (*e.g.*, difficultés dans les activités de préhension et de manipulation liées à une diminution de la

dextérité manuelle) (Bleyenheuft & Gordon, 2014) ainsi que des restrictions de participation impactant la qualité de vie des sujets (Boyaci *et al.*, 2013 ; De Kroon *et al.*, 2005 ; Langhorne, Coupar & Pollock, 2009 ; Nichols-Larsen *et al.*, 2005). Avec le temps, les personnes ayant survécu à un AVC tendent à sous-utiliser leur membre supérieur parétique/plégique en utilisant leur membre sain de manière prédominante et en adoptant diverses stratégies compensatoires pouvant aller jusqu'à ne plus intégrer le membre atteint dans les activités fonctionnelles ; c'est le phénomène de non-utilisation apprise (Raghavan, 2015 ; Taub *et al.*, 2006). À 3 mois post-AVC, 40 % des sujets conservent une déficience légère à modérée et 40 % présentent une fonction de leur membre supérieur significativement déficiente (Parker, Wade & Langton Hewer, 1986 ; Vafadar, Côté & Archambault, 2015).

De nombreuses techniques thérapeutiques ont été développées afin de favoriser le retour d'un fonctionnement normal du membre supérieur pour les sujets ayant une hémiparésie ou une hémiplégie (Hebert *et al.*, 2016). Parmi elles se trouvent l'électrostimulation neuromusculaire (NMES, sous-entendue passive) et l'observation motrice. La NMES consiste en l'application d'un courant, via des électrodes de surface, engendrant « des contractions musculaires cycliques sans participation active du patient » (Boyaci *et al.*, 2013). La NMES appliquée aux muscles extenseurs du poignet et des doigts pourrait améliorer la force musculaire, l'amplitude active d'extension du poignet (Hatem *et al.*, 2016 ; Nussbaum *et al.*, 2017) et le contrôle moteur (De Kroon *et al.*, 2002). Hatem *et al.* (2016) recommandent l'utilisation de la NMES passive comme thérapie adjuvante, en phases aiguë et subaiguë de l'AVC, afin de viser une amélioration des déficiences motrices du membre supérieur. En revanche, plusieurs auteurs indiquent que les preuves sont insuffisantes pour conclure quant à l'efficacité de la NMES sur la fonction motrice (Pomeroy *et al.*, 2006) et les capacités fonctionnelles (De Kroon *et al.*, 2002).

L'observation motrice peut globalement être définie comme une technique « passive » consistant en l'observation de mouvements par un individu. L'observation motrice se base sur la théorie du système des neurones miroirs (Ertelt *et al.*, 2007 ; Fadiga *et al.*, 1995), qui est un réseau complexe de neurones visuo-moteurs s'activant lorsqu'un sujet exécute un mouvement, lorsqu'il observe ce même mouvement réalisé par un autre sujet (sans l'exécuter lui-même) (Rizzolatti & Craighero, 2004), mais aussi lorsqu'il imagine ce mouvement (Jeannerod, 2001 ; Ramachandran & Altschuler, 2009). Le système des neurones miroirs semble activer le système moteur de manière presque similaire lors de la réalisation, mais aussi lors de l'observation d'une action, générant,

dans les deux cas, une représentation interne de l'action (Rizzolatti & Craighero, 2004), facilitant l'apprentissage et le réapprentissage moteur (Ertelt *et al.*, 2012 ; Rizzolatti & Craighero, 2004). La thérapie miroir, forme d'observation motrice la plus étudiée dans la littérature, est recommandée par plusieurs auteurs de revues systématiques pour la récupération de la fonction motrice du membre supérieur et pour la réalisation des activités de la vie journalière (Hattem *et al.*, 2016 ; Hebert *et al.*, 2016).

Vu le rôle potentiel de l'observation dans la récupération motrice de patients ayant subi un AVC, il semble pertinent de soulever un problème dans les études sur la NMES lorsque l'on considère les modalités d'application. Les études sur la NMES ne précisent pas si les sujets avaient pour consigne d'observer ou non le mouvement déclenché par la stimulation électrique. En effet, les mécanismes neurophysiologiques associés à l'observation motrice pourraient favoriser davantage la récupération de la fonction motrice du membre supérieur chez les patients post-AVC que la simple application d'un courant externe stimulant un ou plusieurs muscles. Les résultats de précédentes études associant une forme d'électrostimulation à la thérapie miroir semblent déjà aller dans ce sens (Kim, Lee & Song, 2014 ; Kojima *et al.*, 2014 ; Yun *et al.*, 2011). À notre connaissance, aucun auteur n'a étudié les effets de la NMES associée ou non à l'observation motrice directe du membre parétique/plégique du sujet afin de déterminer la ou les composantes pouvant expliquer l'efficacité de la NMES. Cette étude vise donc à déterminer si l'efficacité potentielle de la stimulation électrique neuromusculaire sur le fonctionnement du membre supérieur parétique/plégique suite à un AVC provient des courants électriques et/ou de l'observation motrice.

## 2. Méthodes

### 2.1. Participants

L'ensemble des sujets a été recruté au sein du Centre hospitalier neurologique (CHN) William Lennox à Ottignies aux mois de mai et d'octobre 2018. L'accord du comité d'éthique local du CHN William Lennox a été obtenu et tous les sujets participant à l'étude ont donné leur consentement éclairé par écrit. Les participants devaient présenter les critères suivants pour être inclus dans l'étude : (a) avoir au moins 18 ans ; (b) avoir été victime pour la première fois d'un AVC ; (c) être en phase subaiguë de l'AVC (14<sup>e</sup> jour - 6<sup>e</sup> mois post-AVC) ; (d) avoir des capacités motrices du membre supérieur parétique/plé-

gique pauvres à notables (sous-score moteur du membre supérieur de l'échelle Fugl-Meyer, FMA-UE,  $\leq 50/66$ ) (Hoonhorst *et al.*, 2015); (e) avoir la capacité de maintenir son attention pendant 30 minutes consécutives; (f) avoir la capacité de maintenir la station assise sur une chaise sans accoudoir pendant 30 minutes; (g) avoir la capacité de maintenir une position du membre supérieur permettant l'application de l'électrostimulation et l'observation du membre. Les participants n'étaient pas inclus s'ils présentaient les critères suivants: (a) avoir des antécédents orthopédiques, rhumatologiques ou neurologiques autres que l'AVC responsable de l'hospitalisation actuelle ayant occasionné des séquelles au membre supérieur stimulé; (b) avoir un état médical instable; (c) avoir des troubles cognitifs, de l'attention et/ou de la communication entravant la bonne compréhension et/ou la réalisation du traitement et des évaluations; (d) avoir une anesthésie totale ou des troubles de la sensibilité algique au membre supérieur parétique/plégique; (e) avoir des troubles visuels non corrigés empêchant l'observation du membre en mouvement; (f) avoir un diagnostic d'épilepsie; (g) avoir un pacemaker ou tout autre appareil de stimulation implanté; (h) avoir une pièce métallique incluse au membre supérieur; (i) avoir une plaie cutanée au niveau de l'avant-bras à stimuler; (j) avoir reçu de la toxine botulique au niveau du membre supérieur parétique/plégique dans les 6 derniers mois, ou avoir eu un changement de doses d'un traitement agissant sur le tonus durant l'étude (*e.g.*, le baclofen); (k) participer simultanément à une thérapie intensive de type contrainte induite. Les sujets étaient exclus s'ils présentaient une intolérance au courant ou s'ils recevaient une injection de toxine botulique dans le membre supérieur pendant l'étude.

L'échantillon a été stratifié à partir de la médiane du FMA-UE afin d'obtenir la plus grande homogénéité possible entre le groupe expérimental et le groupe contrôle. Au sein de chaque strate (*i.e.*, sujets avec un score  $<$  médiane et sujets avec un score  $\geq$  médiane), les sujets ont été randomisés en deux groupes: un groupe expérimental recevant la NMES tout en observant le membre parétique/plégique en mouvement, et un groupe contrôle ne recevant que la NMES sans possibilité d'observation du membre supérieur.

## 2.2. Intervention

Chaque sujet a bénéficié d'un total de 10 heures de NMES (Hsu *et al.*, 2010), administrées à raison de 24 séances de 25 minutes réparties sur 4 semaines. Lors des séances de NMES, les patients étaient assis sur une chaise (ou un fauteuil roulant), pieds posés à plat au sol (ou sur les cale-pieds). Le membre supérieur atteint était positionné sur une table ajustable en hauteur (hauteur

déterminée par l'appui complet de l'avant-bras sur la table), l'épaule et le coude légèrement fléchis et l'avant-bras en pronation. Un petit coussin était placé sous le coude et l'avant-bras afin de favoriser le confort, d'éviter toute douleur, et de placer le poignet en légère flexion palmaire pour augmenter l'amplitude de mouvement observé et/ou ressenti (fig. n°1). Les sujets du groupe expérimental avaient pour consigne d'observer le mouvement de leur membre stimulé tout au long de la séance. Seuls les sujets du groupe contrôle avaient leur membre supérieur placé dans une boîte posée sur la table empêchant l'observation motrice du membre stimulé. L'électrode active (positive) était placée à la limite du tiers supérieur et du tiers moyen de la face postéro-externe de l'avant-bras et l'électrode inactive (négative) était placée à la partie distale de la face postérieure de l'avant-bras, juste au-dessus du poignet.



**Figure n°1.**

Position des sujets lors des séances d'électrostimulation neuromusculaire. La figure illustre un sujet du groupe contrôle, la boîte empêchant l'observation du membre supérieur parétique/plégique en mouvement. Les sujets du groupe expérimental étaient installés dans la même position, la seule différence étant l'absence de la boîte.

Source : cliché personnel.

Afin d'apporter au traitement efficacité, innocuité et confort, le courant sélectionné reprenait les 4 paramètres caractérisant une impulsion optimale : 1) courant rectangulaire; 2) courant bidirectionnel symétrique à moyenne électrique nulle; 3) impulsions de brève durée (ou faradiques, l'innervation du

muscle n'étant pas atteinte) et adaptées à la chronaxie<sup>1</sup> des fibres musculaires stimulées, fixée dans cette étude à 200 $\mu$ s; 4) courant de basse fréquence (*i.e.*, < 100Hz) fixée à 50Hz (Crépon, 2012, p. 23) afin de stimuler les fibres musculaires de types I et II. L'intensité du courant, adaptée à chaque sujet, était augmentée progressivement jusqu'à obtenir un mouvement complet d'extension du poignet et des doigts, tout en restant sous le seuil douloureux afin d'assurer le confort au sujet. Une pente d'établissement de 2 secondes était programmée au début et à la fin de chaque train d'impulsions. Les périodes de travail étaient de 10 secondes, en alternance avec des périodes de repos de 15 secondes.

### 2.3. Évaluations

Les sujets ont été évalués à trois reprises : avant le traitement (T0), à la fin du traitement (T1), et un mois après la fin du traitement (T2). La fonction motrice du membre supérieur parétique/plégique a été évaluée grâce au sous-score moteur du membre supérieur de l'échelle Fugl-Meyer (FMA-UE) (Fugl-Meyer *et al.*, 1975), la fonctionnalité du membre supérieur parétique grâce au *Stroke Upper Limb Capacity Scale* (SULCS) (Roorda *et al.*, 2011), et l'habileté manuelle grâce au questionnaire ABILHAND (Penta, Tesio, Arnould, Zancan, & Thonnard, 2001).

### 2.4. Analyses statistiques

La comparaison des caractéristiques des deux groupes en T0 a été réalisée grâce aux tests de Fisher pour les données nominales dichotomiques, au test *t* de Student pour les données à intervalles ou à ratio et au test de Mann-Whitney pour les données ordinales. Les comparaisons des scores aux différents temps d'évaluation ont été réalisées, au sein de chacun des groupes, au moyen d'une ANOVA à mesures répétées sur les rangs de Friedman pour les scores ordinaux du FMA-UE et du SULCS. Une ANOVA à mesures répétées à 2 facteurs (« temps » et « groupe »), associée au test de Holm-Sidak pour les comparaisons multiples, a été calculée pour les mesures d'ABILHAND. Enfin, la différence des scores aux différents temps d'évaluation a été calculée afin de déterminer les progrès de chaque groupe (T1-T0, T2-T1 et T2-T0). Les comparaisons intergroupes des progrès aux différents temps ont été réalisées grâce

---

1. Chronaxie : durée minimale de l'impulsion électrique nécessaire pour atteindre le seuil de la contraction avec une intensité double de la rhéobase, c'est-à-dire une intensité double de l'intensité nécessaire pour obtenir une contraction musculaire visible avec un courant rectangulaire de durée « infinie » (>100 ms) (Crépon, 2012, p. 47).

au test *t* de Student pour les mesures d'ABILHAND et au test de Mann-Whitney pour les scores ordinaux du FMA-UE et du SULCS.

### 3. Résultats

Sur les 147 patients hospitalisés au cours des mois de recrutement, 9 sujets satisfaisaient aux critères de sélection et ont été inclus dans l'étude : 5 composaient le groupe expérimental et 4 le groupe contrôle. Toutefois, un sujet du groupe expérimental a dû être exclu au cours de l'étude en raison d'injections de toxine botulique. Les caractéristiques démographiques et cliniques des deux groupes ne différaient pas significativement pour l'ensemble des variables mesurées (tableau n°1 ;  $p \geq 0,117$ ), hormis pour le sexe ( $p=0,029$ ).

Variables	Groupe expérimental (n=4)	Groupe contrôle (n=4)	p-valeur
Âge (années)	78,53 ± 8,40	63,54 ± 14,09	0,117
Sexe (n)			0,029*
Masculin	4	0	
Féminin	0	4	
AVC (n)			1,000
Ischémique	2	3	
Hémorragique	2	1	
Hémisphère lésé (n)			1,000
Droit	2	1	
Gauche	2	3	
Délai depuis l'AVC (jours)	53,25 ± 30,36	74,00 ± 57,39	0,546
FMA-UE (/66)	21 [12-36,5]	26 [9-39]	0,886
FMA-UE proximal (/36)	15 [10-22]	18,5 [9-27,5]	1,000
FMA-UE distal (/30)	6 [2-14,5]	3 [0-11,5]	0,686
SULCS (/10)	3 [2-4]	2,5 [1-3,5]	0,686
ABILHAND (% logits)	35,84 ± 4,06	37,28 ± 7,70	0,753

Tableau n°1.

**Caractéristiques démographiques et cliniques initiales des groupes expérimental (n=4) et contrôle (n=4)**

FMA-UE : sous-score moteur du membre supérieur de l'échelle Fugl-Meyer ;  
SULCS : *Stroke Upper Limb Capacity Scale*. Les données présentées représentent le nombre d'individus (n) pour les données nominales, les moyennes et écarts-types (moyenne ± SD) pour les données à intervalles ou à ratio et les médianes et 1<sup>er</sup> et 3<sup>e</sup> quartiles (médiane [Q1-Q3]) pour les données ordinales.

\*  $p < 0,05$  indique une différence statistiquement significative.



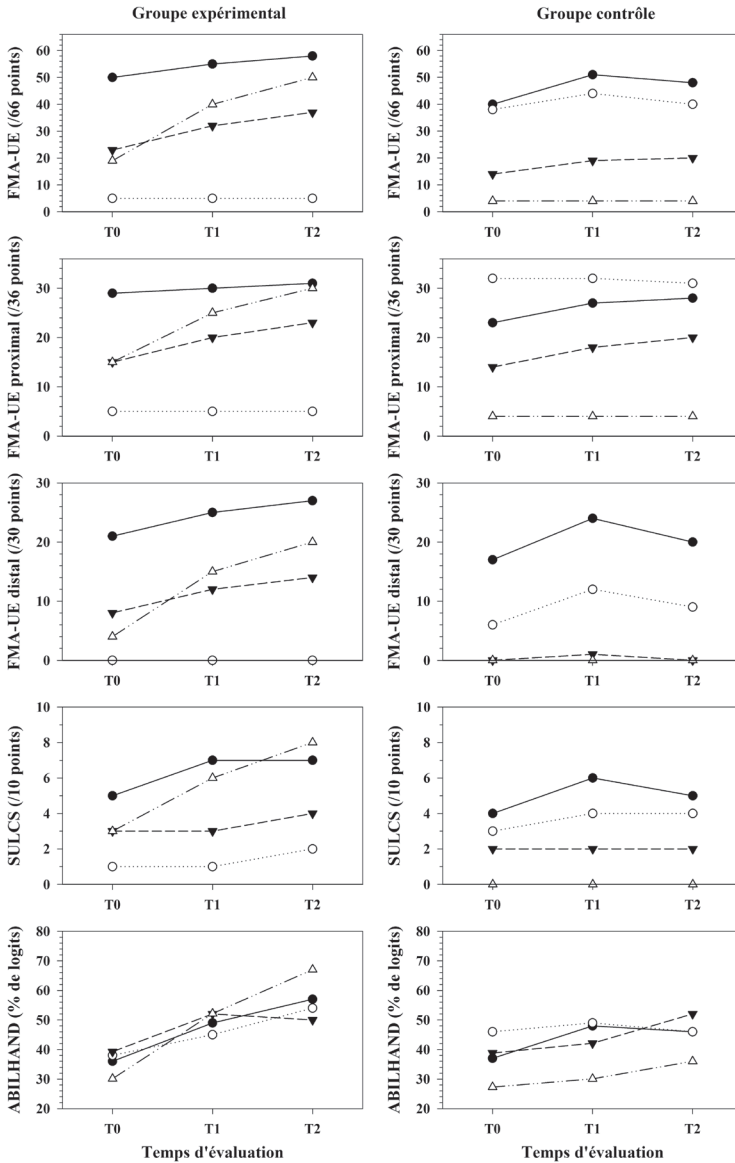


Figure n°2.

Évolution des scores et sous-scores des 3 évaluations (sous-score moteur du membre supérieur total, proximal, et distal de l'échelle Fugl-Meyer [FMA-UE] pour mesurer la fonction motrice du membre supérieur parétique; *Stroke Upper Limb Capacity Scale* [SULCS] pour mesurer la fonctionnalité du membre supérieur parétique; *ABILHAND* pour mesurer l'habileté manuelle) pour chacun des sujets des groupes expérimental (graphiques de gauche) et contrôle (graphiques de droite) à T0 (avant le traitement), T1 (après le traitement) et T2 (1 mois après la fin du traitement).

La figure n°2 illustre l'évolution des scores, sujet par sujet, pour chacune des 3 évaluations réalisées à T0, T1 et T2. Globalement, la fonction motrice totale, proximale et distale du membre supérieur parétique (FMA-UE) tend à augmenter durant la NMES avec observation motrice du membre stimulé et tend encore à augmenter lors du suivi 1 mois après le traitement ( $p=0,125$ ). La fonction motrice du membre supérieur parétique des sujets du groupe contrôle tend également à augmenter, dans une moindre mesure, juste après la NMES sans observation motrice du membre stimulé, mais cette légère amélioration n'est pas maintenue lors du suivi, au niveau distal alors qu'elle est conservée, voire améliorée, au niveau proximal ( $p \geq 0,125$ ). La fonction motrice distale du membre supérieur s'améliore donc significativement davantage, entre T1 et T2, dans le groupe expérimental que dans le groupe contrôle ( $p=0,029$ ). De plus, la moitié des patients du groupe expérimental atteignent la différence minimale cliniquement importante de l'échelle FMA-UE (équivalente à une différence de 10 points) entre T0 et T2, tandis qu'aucun sujet du groupe contrôle ne l'atteint. Deux patients ayant une plégie complète du membre supérieur atteint (1 sujet du groupe expérimental représenté par des cercles blancs dans la figure n°2 et 1 sujet du groupe contrôle représenté par des triangles blancs) n'ont pas connu d'amélioration de la fonction motrice de leur membre supérieur.

La fonctionnalité du membre supérieur parétique (SULCS) s'améliore de façon presque significative après la NMES avec observation motrice du membre stimulé et lors du suivi 1 mois après le traitement ( $p=0,067$ ). Une amélioration minime de la fonctionnalité du membre supérieur parétique est observée dans le groupe contrôle après la NMES sans observation motrice du membre stimulé, amélioration qui n'est pas forcément maintenue lors du suivi ( $p=0,431$ ). Les progrès observés entre T1 et T2, en termes de fonctionnalité du membre supérieur parétique, des sujets du groupe expérimental sont presque significativement supérieurs, à ceux du groupe contrôle ( $p=0,057$ ). La même observation peut être faite, dans une moindre mesure, pour les progrès observés entre T0 et T2 ( $p=0,114$ ).

L'habileté manuelle des sujets du groupe expérimental s'améliore significativement au cours du temps (T0 *vs.* T2,  $p < 0,001$ ). Elle s'améliore de façon significative juste après la NMES avec observation motrice du membre stimulé (T0 *vs.* T1,  $p=0,002$ ) et tend encore à devenir meilleure lors du suivi 1 mois après le traitement (T1 *vs.* T2,  $p=0,057$ ). L'habileté manuelle des sujets du groupe contrôle tend également à s'améliorer, dans une moindre mesure, après la NMES sans observation motrice du membre stimulé (T0 *vs.* T1,  $p=0,182$ ) mais ne s'améliore presque plus lors du suivi (T1 *vs.* T2,  $p=0,460$ ). Ainsi, l'ha-

bileté manuelle des sujets du groupe expérimental est significativement supérieure à celle des sujets du groupe contrôle lors du suivi à 1 mois ( $p=0,022$ ).

#### 4. Discussion

L'étude avait pour but de montrer si les effets potentiels de la NMES sur le fonctionnement du membre supérieur appliquée au niveau des extenseurs du poignet et des doigts chez des sujets hémi-parétiques/plégiques provenaient des courants électriques et/ou de l'observation motrice. Les résultats de notre étude, globalement en faveur de l'association de la NMES et de l'observation motrice, sont en accord avec la littérature investiguant l'impact de la combinaison de la NMES passive et de l'observation motrice (via la thérapie miroir) sur la fonction motrice (Lee, Lee, & Jeong, 2016; Xu *et al.*, 2017; Yun *et al.*, 2011). Cependant, aucune étude n'évalue l'impact de ce traitement sur le domaine des activités tel que nous l'avons fait avec l'évaluation du SULCS et d'ABILHAND. Certaines études comparant l'association d'une forme d'électrostimulation et l'observation motrice avec un groupe contrôle ont trouvé des améliorations significatives dans la dextérité manuelle grossière, l'indépendance dans les activités de la vie journalière, le temps pour exécuter des tâches données, et les capacités fonctionnelles du membre supérieur et de la motricité fine, sans différence significative intergroupe (Kim, Lee, & Song, 2014; Kojima *et al.*, 2014; Nagapattinam *et al.*, 2015; Schick *et al.*, 2017). Ceci s'oppose en partie à nos résultats qui montrent des différences significatives de l'habileté manuelle mesurée par ABILHAND en faveur du groupe expérimental. Toutefois, cela peut s'expliquer par le fait que l'habileté manuelle et les variables mesurées par les échelles utilisées dans les autres études n'évaluent pas les mêmes domaines des activités, et qu'ABILHAND est peut-être un outil d'évaluation plus sensible que les autres tests.

Bien qu'il soit impossible de distinguer les effets provenant du traitement à proprement parler de ceux liés à la récupération spontanée, les améliorations de la fonction motrice distale semblent plus importantes que celles de la fonction motrice proximale. Or, lors de la récupération spontanée et en l'absence de rééducation spécifique, il semblerait que les progrès concernent principalement l'extrémité proximale du membre supérieur au détriment de l'extrémité distale (Nudo, 1997), cette tendance s'inversant en cas de mise en place d'un programme d'entraînement intensif de la main (Nudo, Milliken, Jenkins, & Merzenich, 1996). Ceci semble conforter le fait que l'électrostimulation seule avec ou sans observation motrice puisse impacter la rééducation du membre

supérieur parétique. Dans notre étude, les régressions des scores de la fonction motrice totale et distale du membre supérieur observée uniquement dans le groupe contrôle entre T1 et T2 semblent difficilement explicables par une perte des acquis liés à la récupération spontanée. Elles pourraient donc conforter l'hypothèse émise sur l'influence du traitement expérimenté sur la fonction motrice en impliquant le non-maintien de l'effet après le traitement en l'absence d'observation motrice.

Aucun des 2 sujets hémiparétiques de notre étude n'a connu d'amélioration de la fonction motrice distale. La concordance de nos résultats avec la littérature peut difficilement être établie du fait que la plupart des études sur la NMES sont réalisées chez des sujets ayant une déficience motrice du membre supérieur légère à modérée (Chae & Yu, 2000). Cependant, Rosewilliam *et al.* (2012) ont montré une amélioration significative de la fonction motrice du membre supérieur de sujets ayant initialement une parésie sévère voire une plégie suite à la NMES. Toutefois, les sujets recrutés dans cette étude ayant eu leur AVC au cours des 6 dernières semaines (phases aiguë et subaiguë), leur récupération spontanée était potentiellement supérieure à celle des sujets inclus dans notre étude (Langhorne, Bernhardt, & Kwakkel, 2011). Enfin, bien que la fonction motrice du membre supérieur des 2 sujets hémiparétiques de notre étude n'ait pas évolué, une amélioration de leur habileté manuelle ainsi qu'une amélioration de la fonctionnalité du membre supérieur chez le sujet du groupe expérimental ont pu être constatées.

Les résultats de notre étude sur la fonction motrice, la fonctionnalité du membre supérieur et l'habileté manuelle semblent être plutôt en faveur du groupe ayant reçu le traitement associant la NMES et l'observation motrice. Cela laisse supposer que l'effet de la NMES est, soit partiellement lié aux courants électriques et amplifié par l'observation motrice, soit presque totalement attribuable à l'observation. Bien que les mécanismes d'action de la NMES chez des sujets ayant subi un AVC ne soient pas totalement élucidés, plusieurs effets centraux et périphériques potentiels (Knutson *et al.*, 2015), plus ou moins bien compris, ressortent dans la littérature. Ainsi, des auteurs recensent des effets tels qu'une augmentation de la force et de la masse musculaire (Arija-Blázquez *et al.*, 2014; Gondin *et al.*, 2011) favorisant la récupération de la fonction motrice (Patten, Condliffe, Dairaghi, & Lum, 2013), sans exacerbation de la spasticité (Hebert *et al.*, 2016), mais également une conversion des fibres musculaires de type II en fibres de type I, apportant des fibres plus endurantes donc plus résistantes à la fatigue (Gondin *et al.*, 2011), une diminution de l'œdème périphérique au niveau de la main (Ring & Rosenthal, 2005), une augmenta-

tion de la perfusion dans l'hémisphère cérébral lésionnel (Hara *et al.*, 2013). La NMES favoriserait aussi le mécanisme d'inhibition réciproque et augmenterait l'excitabilité cortico-motrice (Kaelin-Lang *et al.*, 2002; Liu & Au-Yeung, 2017), avec des activations cérébrales observées principalement dans l'hémisphère controlatéral au membre stimulé, au niveau des aires somatosensorielle primaire, prémotrice et motrice primaire (Jiang *et al.*, 2016), ce qui pourrait favoriser au moins partiellement la récupération de la fonction motrice (Quandt & Hummel, 2014). Ceci semble rejoindre l'idée que le cortex somato-sensoriel et le cortex moteur étant étroitement liés, les apports sensoriels des stimulations électriques pourraient induire des changements dans l'excitabilité du cortex moteur (Bolognini, Russo, & Edwards, 2016; Cauraugh *et al.*, 2000). Enfin, les afférences cutanées et proprioceptives provoquées par la NMES favoriseraient la réorganisation corticale (Asanuma & Keller, 1991; Hamdy *et al.*, 1998; Kimberley *et al.*, 2004; Schuhfried *et al.*, 2012).

De récentes études pourraient expliquer que l'observation motrice soit l'élément clé des résultats observés. Premièrement, plusieurs études indiquent que les progrès les plus importants sont toujours constatés lorsque la main parétique est observée en mouvement, que ce soit par l'observation motrice directe du membre, ou par le reflet du membre sain dans un miroir donnant l'illusion d'un mouvement du membre déficient pourtant immobile (Nojima *et al.*, 2012; Selles *et al.*, 2014). Cette efficacité de l'observation motrice a été démontrée au niveau de la fonction motrice du membre supérieur (Altschuler *et al.*, 1999; Dohle *et al.*, 2009; Fu *et al.*, 2017; Michielsen *et al.*, 2011; Yavuzer *et al.*, 2008). Toutefois, toutes les études ne s'accordent pas sur l'efficacité de l'observation motrice dans le domaine des activités. Certaines études la trouvent efficaces (Ertelt *et al.*, 2007; Fu *et al.*, 2017; Yavuzer *et al.*, 2008) alors que d'autres non (Dohle *et al.*, 2009; Michielsen *et al.*, 2011; Thieme *et al.*, 2013). L'observation motrice pourrait favoriser chez les sujets l'intention d'imiter ou de réaliser l'action, d'autant plus si elle est réalisée en interne (*i.e.*, dans un plan permettant de voir le mouvement comme si on le réalisait soi-même), stimulant ainsi les représentations mentales des actions au niveau des neurones miroirs et donc le réapprentissage moteur. Or, il semblerait que l'intention d'imiter puisse augmenter les effets de la thérapie physique et favoriser la récupération de la fonction motrice après un AVC (Ertelt *et al.*, 2007). De plus, il semblerait que les informations visuelles prédominent sur les informations kinesthésiques concernant la perception de la position spatiale d'un membre (Hagura *et al.*, 2007). Ceci justifie l'intérêt d'associer l'observation motrice lors de la rééducation, et notamment lors de la NMES qui envoie des informations sensorielles cutanées (liées au courant électrique) et propriocep-

tives potentiellement différentes de celles perçues lors de l'exécution motrice. Enfin, il peut être envisagé que l'observation directe du mouvement de la main parétique d'un patient déclenchée par la NMES puisse améliorer la conscience de son membre (Kim *et al.*, 2014) par l'augmentation de l'attention portée sur ce membre (Dohle *et al.*, 2009; Thieme *et al.*, 2013). Cela pourrait augmenter potentiellement les opportunités pour le sujet d'utiliser son membre supérieur au quotidien, luttant ainsi contre la non-utilisation apprise. Cette dernière hypothèse pourrait justifier le fait que les sujets du groupe expérimental aient eu une récupération plus importante et surtout plus durable que les sujets du groupe contrôle.

Quelques recommandations peuvent être faites pour tenter d'améliorer l'effet du traitement combinant la NMES à l'observation motrice : 1) faire réaliser des mouvements transitifs lors du traitement permettrait d'activer deux zones du cortex pariétal en plus de l'aire prémotrice par rapport à l'utilisation de mouvements intransitifs (Buccino *et al.*, 2001); 2) adapter les mouvements et tâches réalisés et observés pendant la NMES (en termes de difficulté et de choix de tâches) aux capacités de chaque sujet, la plasticité cérébrale dépendant de la difficulté de la tâche (Nudo *et al.*, 1996) et de la motivation du sujet à réaliser cette tâche; 3) utiliser des actions connues (appartenant donc au répertoire moteur du sujet) pourrait permettre d'augmenter les activations cérébrales lors de l'observation (Buccino *et al.*, 2004; Calvo-Merino *et al.*, 2005); 4) encourager la répétition des mouvements réalisés tout en demandant au sujet de participer ou d'essayer de participer activement au mouvement déclenché par la NMES (*e.g.*, NMES déclenchée par une activité EMG ou NMES passive avec une intention de participation active du sujet en cas de plégie) favoriserait la plasticité neuronale et une récupération motrice plus importante et plus rapide (De Kroon *et al.*, 2005; Ertelt *et al.*, 2007). Enfin, la NMES est une technique de traitement adjuvante qui doit être intégrée dans une prise en charge plus globale, adaptée et centrée sur le patient; l'altération de la fonction motrice pouvant être plurifactorielle (Knutson *et al.*, 2015).

L'étude présente plusieurs limites qui semblent importantes à prendre en compte afin de nuancer les résultats obtenus. Premièrement, l'étude manque de puissance due à la faible taille de l'échantillon. Deuxièmement, l'échantillon manquait d'homogénéité intergroupe concernant le sexe des individus. Troisièmement, il aurait été intéressant d'ajouter un troisième groupe à l'étude, servant de « vrai groupe contrôle », ne recevant qu'un traitement conventionnel sans NMES ou un traitement placebo (*e.g.*, « NMES » avec une intensité de courant nulle et sans observation du membre supérieur parétique). Quatriè-

mement, l'évaluateur n'était pas en aveugle et connaissait donc la répartition des sujets dans les groupes, augmentant le risque de biais. Cinquièmement, le questionnaire ABILHAND n'a été validé qu'en phase chronique de l'AVC. Sixièmement, il aurait été préférable d'utiliser un stylet pour rechercher plus précisément les points moteurs. Septièmement, il était difficile de contrôler le maintien de l'attention constante des sujets du groupe expérimental sur le mouvement de la main. Enfin, trois sujets (2 dans le groupe contrôle et 1 dans le groupe expérimental) sont rentrés à domicile pendant le mois suivant la fin du traitement. Bien que chacun continuait de bénéficier de kinésithérapie, des différences quant à la quantité et la qualité des stimulations quotidiennes reçues ont pu exister.

## 5. Conclusion

L'étude montre qu'en phase subaiguë de l'AVC, l'association de la NMES et de l'observation motrice en tant que thérapie adjuvante, apportant à la fois des afférences proprioceptives et visuelles, semble plus efficace que la NMES seule sur la fonction motrice, la fonctionnalité du membre supérieur ainsi que sur l'habileté manuelle, avec des résultats qui, pour la plupart continuent à s'améliorer au moins 1 mois après la fin du traitement. Ceci semble confirmer l'hypothèse initiale, à savoir que l'efficacité de la NMES est probablement plus liée à l'observation motrice plutôt qu'aux courants électriques à proprement parler. Toutefois, il semble de rigueur de rester vigilant quant à cette conclusion, les mécanismes d'action potentiels de la NMES au niveau périphérique et central étant encore mal compris. Dans de futures études, il pourrait être intéressant de comparer l'association de la NMES passive et de l'observation motrice avec d'autres techniques basées sur l'observation motrice (*e.g.*, la thérapie miroir, le visionnage de vidéos, ou encore la réalité virtuelle), ou encore d'ajouter des analyses d'imagerie par résonance magnétique afin de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents. En conclusion, l'observation motrice semble apporter de réels bénéfices lors de l'application de la NMES sur la récupération motrice et fonctionnelle du membre supérieur parétique et devrait être prise en compte dans de futures études et dans la pratique clinique.

## Bibliographie

- Altschuler, E. L., Wisdom, S. B., Stone, L., Foster, C., Galasko, D., Llewellyn, D. M., & Ramachandran, V. S. (1999). Rehabilitation of hemiparesis after stroke with a mirror. *Lancet*, 353(9169), 2035-2036.
- Arija-Blázquez, A., Ceruelo-Abajo, S., Díaz-Merino, M. S., Godino-Durán, J. A., Martínez-Dhier, L., Martín, J. L. R., & Florensa-Vila, J. (2014). Effects of electromyostimulation on muscle and bone in men with acute traumatic spinal cord injury : A randomized clinical trial. *The Journal of Spinal Cord Medicine*, 37(3), 299-309. <https://doi.org/10.1179/2045772313Y.0000000142>
- Asanuma H., & Keller A. (1991). Neurobiological basis of motor learning and memory. *Neuroscience*, 2(1), 1-30.
- Bleyenheuft, Y., & Gordon, A. M. (2014). Precision grip in congenital and acquired hemiparesis : similarities in impairments and implications for neurorehabilitation. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8(459), 1-11. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00459>
- Bolognini, N., Russo, C., & Edwards, D. J. (2016). The sensory side of post-stroke motor rehabilitation. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 34(4), 571-586. <https://doi.org/10.3233/RNN-150606>
- Boyaci, A., Topuz, O., Alkan, H., Ozgen, M., Sarsan, A., Yildiz, N., & Ardic, F. (2013). Comparison of the effectiveness of active and passive neuromuscular electrical stimulation of hemiplegic upper extremities : a randomized, controlled trial. *International Journal of Rehabilitation Research*, 36(4), 315-322. <https://doi.org/10.1097/MRR.0b013e328360e541>
- Buccino, G., Binkofski, F., Fink, G. R., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., [...] Freund, H. J. (2001). Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner : an fMRI study. *The European Journal of Neuroscience*, 13(2), 400-404. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2001.01385.x>
- Buccino, G., Lui, F., Canessa, N., Patteri, I., Lagravinese, G., Benuzzi, F., [...] Rizzolatti, G. (2004). Neural circuits involved in the recognition of actions performed by nonconspecifics : an FMRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(1), 114-126. <https://doi.org/10.1162/089892904322755601>
- Calvo-Merino, B., Glaser, D. E., Grèzes, J., Passingham, R. E., & Haggard, P. (2005). Action observation and acquired motor skills : an FMRI study with expert dancers. *Cerebral Cortex*, 15(8), 1243-1249. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhi007>
- Cauraugh, J., Light, K., Kim, S., Thigpen, M., & Behrman, A. (2000). Chronic motor dysfunction after stroke : recovering wrist and finger extension by electromyography-triggered neuromuscular stimulation. *Stroke*, 31(6), 1360-1364. <https://doi.org/10.1161/01.STR.31.6.1360>
- Chae, J., & Yu, D. (2000). A critical review of neuromuscular electrical stimulation for treatment of motor dysfunction in hemiplegia. *Assistive Technology*, 12(1), 33-49. <https://doi.org/10.1080/10400435.2000.10132008>



- Crépon, F. (2012). *Électrothérapie et physiothérapie : applications en rééducation et réadaptation*. Issy-Les-Moulineaux : Elsevier Masson.
- De Kroon, J. R., IJzerman, M. J., Chae, J., Lankhorst, G. J., & Zilvold, G. (2005). Relation between stimulation characteristics and clinical outcome in studies using electrical stimulation to improve motor control of the upper extremity in stroke. *Journal of Rehabilitation Medicine*, 37(2), 65-74. <https://doi.org/10.1080/16501970410024190>
- De Kroon, J. R., van der Lee, J. H., IJzerman, M. J., & Lankhorst, G. J. (2002). Therapeutic electrical stimulation to improve motor control and functional abilities of the upper extremity after stroke : a systematic review. *Clinical Rehabilitation*, 16(4), 350-360. <https://doi.org/10.1191/0269215502cr5040a>
- Dohle, C., Püllen, J., Nakaten, A., Küst, J., Rietz, C., & Karbe, H. (2009). Mirror therapy promotes recovery from severe hemiparesis : a randomized controlled trial. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 23(3), 209-217. <https://doi.org/10.1177/1545968308324786>
- Ertelt, D., Hemmelmann, C., Dettmers, C., Ziegler, A., & Binkofski, F. (2012). Observation and execution of upper-limb movements as a tool for rehabilitation of motor deficits in paretic stroke patients : protocol of a randomized clinical trial. *BMC Neurology*, 12(42), 1-10. <https://doi.org/10.1186/1471-2377-12-42>
- Ertelt, D., Small, S., Solodkin, A., Dettmers, C., McNamara, A., Binkofski, F., & Buccino, G. (2007). Action observation has a positive impact on rehabilitation of motor deficits after stroke. *NeuroImage*, 36 Suppl 2, T164-T173. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.03.043>
- Fadiga, L., Fogassi, L., Pavesi, G., & Rizzolatti, G. (1995). Motor facilitation during action observation : a magnetic stimulation study. *Journal of Neurophysiology*, 73(6), 2608-2611. <https://doi.org/10.1152/jn.1995.73.6.2608>
- Fu, J., Zeng, M., Shen, F., Cui, Y., Zhu, M., Gu, X., & Sun, Y. (2017). Effects of action observation therapy on upper extremity function, daily activities and motion evoked potential in cerebral infarction patients. *Medicine*, 96(42), e8080, 1-6. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000008080>
- Fugl-Meyer, A. R., Jääskö, L., Leyman, I., Olsson, S., & Stegling, S. (1975). The post-stroke hemiplegic patient. 1. a method for evaluation of physical performance. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*, 7(1), 13-31.
- Global Burden of Diseases 2016 Neurology Collaborators. (2019). Global, regional, and national burden of neurological disorders, 1990-2016 : a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016. *The Lancet Neurology*, 18(5), 459-480. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(18\)30499-X](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(18)30499-X)
- Gondin, J., Brocca, L., Bellinzona, E., D'Antona, G., Maffiuletti, N. A., Miotti, D., [...] Bottinelli, R. (2011). Neuromuscular electrical stimulation training induces atypical adaptations of the human skeletal muscle phenotype : a functional and proteomic analysis. *Journal of Applied Physiology*, 110(2), 433-450. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00914.2010>

- Gorelick, P. B. (2019). The global burden of stroke : persistent and disabling. *The Lancet Neurology*, 18(5), 417-418. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(19\)30030-4](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(19)30030-4)
- Hagura, N., Takei, T., Hirose, S., Aramaki, Y., Matsumura, M., Sadato, N., & Naito, E. (2007). Activity in the posterior parietal cortex mediates visual dominance over kinesthesia. *The Journal of Neuroscience*, 27(26), 7047-7053. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0970-07.2007>
- Hamdy, S., Rothwell, J. C., Aziz, Q., Singh, K. D., & Thompson, D. G. (1998). Long-term reorganization of human motor cortex driven by short-term sensory stimulation. *Nature Neuroscience*, 1(1), 64-68. <https://doi.org/10.1038/264>
- Hara, Y., Obayashi, S., Tsujiuchi, K., & Muraoka, Y. (2013). The effects of electromyography-controlled functional electrical stimulation on upper extremity function and cortical perfusion in stroke patients. *Clinical Neurophysiology*, 124(10), 2008-2015. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2013.03.030>
- Hatem, S. M., Saussez, G., Della Faille, M., Prist, V., Zhang, X., Dispa, D., & Bleyenheuft, Y. (2016). Rehabilitation of Motor Function after Stroke : A Multiple Systematic Review Focused on Techniques to Stimulate Upper Extremity Recovery. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10(442), 1-22. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00442>
- Hebert, D., Lindsay, M. P., McIntyre, A., Kirton, A., Rumney, P. G., Bagg, S., ... Teasell, R. (2016). Canadian stroke best practice recommendations : Stroke rehabilitation practice guidelines, update 2015. *International Journal of Stroke*, 11(4), 459-484. <https://doi.org/10.1177/1747493016643553>
- Hoonhorst, M. H., Nijland, R. H., van den Berg, J. S., Emmelot, C. H., Kollen, B. J., & Kwakkel, G. (2015). How Do Fugl-Meyer Arm Motor Scores Relate to Dexterity According to the Action Research Arm Test at 6 Months Poststroke? *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 96(10), 1845-1849. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2015.06.009>
- Hsu, S.-S., Hu, M.-H., Wang, Y.-H., Yip, P.-K., Chiu, J.-W., & Hsieh, C.-L. (2010). Dose-response relation between neuromuscular electrical stimulation and upper-extremity function in patients with stroke. *Stroke*, 41(4), 821-824. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.109.574160>
- Jeannerod, M. (2001). Neural simulation of action : a unifying mechanism for motor cognition. *NeuroImage*, 14(1 Pt 2), S103-S109. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0832>
- Jiang, S., Wang, Z., Yi, W., He, F., Liu, S., Qi, H., & Ming, D. (2016). Cortical excitability effects of stimulation intensity change speed during NMES. *2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 4670-4673. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2016.7591769>
- Kaelin-Lang, A., Luft, A. R., Sawaki, L., Burstein, A. H., Sohn, Y. H., & Cohen, L. G. (2002). Modulation of human corticomotor excitability by somatosensory

- input. *The Journal of Physiology*, 540(Pt 2), 623-633. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2001.012801>
- Kim, H., Lee, G., & Song, C. (2014). Effect of functional electrical stimulation with mirror therapy on upper extremity motor function in poststroke patients. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, 23(4), 655-661. <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2013.06.017>
- Kimberley, T. J., Lewis, S. M., Auerbach, E. J., Dorsey, L. L., Lojovich, J. M., & Carey, J. R. (2004). Electrical stimulation driving functional improvements and cortical changes in subjects with stroke. *Experimental Brain Research*, 154(4), 450-460. <https://doi.org/10.1007/s00221-003-1695-y>
- Knutson, J. S., Fu, M. J., Sheffler, L. R., & Chae, J. (2015). Neuromuscular Electrical Stimulation for Motor Restoration in Hemiplegia. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, 26(4), 729-745. <https://doi.org/10.1016/j.pmr.2015.06.002>
- Kojima, K., Ikuno, K., Morii, Y., Tokuhisa, K., Morimoto, S., & Shomoto, K. (2014). Feasibility study of a combined treatment of electromyography-triggered neuromuscular stimulation and mirror therapy in stroke patients : a randomized crossover trial. *NeuroRehabilitation*, 34(2), 235-244. <https://doi.org/10.3233/NRE-131038>
- Langhorne, P., Bernhardt, J., & Kwakkel, G. (2011). Stroke rehabilitation. *Lancet*, 377(9778), 1693-1702. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(11\)60325-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)60325-5)
- Langhorne, P., Coupar, F., & Pollock, A. (2009). Motor recovery after stroke : a systematic review. *The Lancet Neurology*, 8(8), 741-754. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(09\)70150-4](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(09)70150-4)
- Lee, D., Lee, G., & Jeong, J. (2016). Mirror Therapy with Neuromuscular Electrical Stimulation for improving motor function of stroke survivors : A pilot randomized clinical study. *Technology and Health Care*, 24(4), 503-511. <https://doi.org/10.3233/THC-161144>
- Liu, H., & Au-Yeung, S. S. Y. (2017). Corticomotor Excitability Effects of Peripheral Nerve Electrical Stimulation to the Paretic Arm in Stroke. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 96(10), 687-693. <https://doi.org/10.1097/PHM.0000000000000748>
- Michielsen, M. E., Selles, R. W., van der Geest, J. N., Eckhardt, M., Yavuzer, G., Stam, H. J., ... Bussmann, J. B. J. (2011). Motor recovery and cortical reorganization after mirror therapy in chronic stroke patients : a phase II randomized controlled trial. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 25(3), 223-233. <https://doi.org/10.1177/1545968310385127>
- Nagapattinam, S., Babu, V., Kumar, S., & Ayyappan, V. R. (2015). Effect of task specific mirror therapy with functional electrical stimulation on upper limb function for subacute hemiplegia. *International Journal of Physiotherapy*, 2(5), 840-849. <https://doi.org/10.15621/ijphy/2015/v2i5/78243>
- Nichols-Larsen, D. S., Clark, P. C., Zeringue, A., Greenspan, A., & Blanton, S. (2005). Factors influencing stroke survivors' quality of life during sub-

- acute recovery. *Stroke*, 36(7), 1480-1484. <https://doi.org/10.1161/01.STR.0000170706.13595.4f>
- Nojima, I., Mima, T., Koganemaru, S., Thabit, M. N., Fukuyama, H., & Kawamata, T. (2012). Human motor plasticity induced by mirror visual feedback. *The Journal of Neuroscience*, 32(4), 1293-1300. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5364-11.2012>
- Nudo, R. J. (1997). Remodeling of cortical motor representations after stroke : implications for recovery from brain damage. *Molecular Psychiatry*, 2(3), 188-191. <https://doi.org/10.1038/sj.mp.4000188>
- Nudo, R. J., Milliken, G. W., Jenkins, W. M., & Merzenich, M. M. (1996). Use-dependent alterations of movement representations in primary motor cortex of adult squirrel monkeys. *The Journal of Neuroscience*, 16(2), 785-807. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.16-02-00785.1996>
- Nussbaum, E. L., Houghton, P., Anthony, J., Rennie, S., Shay, B. L., & Hoens, A. M. (2017). Neuromuscular Electrical Stimulation for Treatment of Muscle Impairment : Critical Review and Recommendations for Clinical Practice. *Physiotherapy Canada*, 69(5), 1-76. <https://doi.org/10.3138/ptc.2015-88>
- Ovbiagele, B., Goldstein, L. B., Higashida, R. T., Howard, V. J., Johnston, S. C., Khavjou, O. A., ... American Heart Association Advocacy Coordinating Committee and Stroke Council. (2013). Forecasting the future of stroke in the United States : a policy statement from the American Heart Association and American Stroke Association. *Stroke*, 44(8), 2361-2375. <https://doi.org/10.1161/STR.0b013e31829734f2>
- Parker, V. M., Wade, D. T., & Langton Hewer, R. (1986). Loss of arm function after stroke : measurement, frequency, and recovery. *International Rehabilitation Medicine*, 8(2), 69-73. <https://doi.org/10.3109/03790798609166178>
- Patten, C., Condliffe, E. G., Dairaghi, C. A., & Lum, P. S. (2013). Concurrent neuromechanical and functional gains following upper-extremity power training post-stroke. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 10(1), 1-19. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-10-1>
- Penta, M., Tesio, L., Arnould, C., Zancan, A., & Thonnard, J. L. (2001). The ABIL-HAND questionnaire as a measure of manual ability in chronic stroke patients : Rasch-based validation and relationship to upper limb impairment. *Stroke*, 32(7), 1627-1634. <https://doi.org/10.1161/01.STR.32.7.1627>
- Pomeroy, V. M., King, L., Pollock, A., Baily-Hallam, A., & Langhorne, P. (2006). Electrostimulation for promoting recovery of movement or functional ability after stroke. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, (2, CD003241), 1-71. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD003241.pub2>
- Quandt, F., & Hummel, F. C. (2014). The influence of functional electrical stimulation on hand motor recovery in stroke patients : a review. *Experimental & Translational Stroke Medicine*, 6(9), 1-7. <https://doi.org/10.1186/2040-7378-6-9>

- Raghavan, P. (2015). Upper Limb Motor Impairment After Stroke. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, 26(4), 599-610. <https://doi.org/10.1016/j.pmr.2015.06.008>
- Ramachandran, V. S., & Altschuler, E. L. (2009). The use of visual feedback, in particular mirror visual feedback, in restoring brain function. *Brain*, 132(Pt 7), 1693-1710. <https://doi.org/10.1093/brain/awp135>
- Ring, H., & Rosenthal, N. (2005). Controlled study of neuroprosthetic functional electrical stimulation in sub-acute post-stroke rehabilitation. *Journal of Rehabilitation Medicine*, 37(1), 32-36. <https://doi.org/10.1080/16501970410035387>
- Rizzolatti, G., & Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annual Review of Neuroscience*, 27, 169-192. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.27.070203.144230>
- Roorda, L. D., Houwink, A., Smits, W., Molenaar, I. W., & Geurts, A. C. (2011). Measuring upper limb capacity in poststroke patients : development, fit of the monotone homogeneity model, unidimensionality, fit of the double monotonicity model, differential item functioning, internal consistency, and feasibility of the stroke upper limb capacity scale, SULCS. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 92(2), 214-227. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2010.10.034>
- Rosewilliam, S., Malhotra, S., Roffe, C., Jones, P., & Pandyan, A. D. (2012). Can surface neuromuscular electrical stimulation of the wrist and hand combined with routine therapy facilitate recovery of arm function in patients with stroke? *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 93(10), 1715-1721.e1. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2012.05.017>
- Schick, T., Schlake, H.-P., Kallusky, J., Hohlfeld, G., Steinmetz, M., Tripp, F., ... Dohle, C. (2017). Synergy effects of combined multichannel EMG-triggered electrical stimulation and mirror therapy in subacute stroke patients with severe or very severe arm/hand paresis. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 35(3), 319-332. <https://doi.org/10.3233/RNN-160710>
- Schuhfried, O., Crevenna, R., Fialka-Moser, V., & Paternostro-Sluga, T. (2012). Non-invasive neuromuscular electrical stimulation in patients with central nervous system lesions : an educational review. *Journal of Rehabilitation Medicine*, 44(2), 99-105. <https://doi.org/10.2340/16501977-0941>
- Selles, R. W., Michielsen, M. E., Bussmann, J. B. J., Stam, H. J., Hurkmans, H. L., Heijnen, I., [...] Ribbers, G. M. (2014). Effects of a mirror-induced visual illusion on a reaching task in stroke patients : implications for mirror therapy training. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 28(7), 652-659. <https://doi.org/10.1177/1545968314521005>
- Taub, E., Uswatte, G., Mark, V. W., & Morris, D. M. (2006). The learned nonuse phenomenon : implications for rehabilitation. *Europa Medicophysica*, 42(3), 241-256.
- Thieme, H., Bayn, M., Wurg, M., Zange, C., Pohl, M., & Behrens, J. (2013). Mirror therapy for patients with severe arm paresis after stroke – a randomized

- controlled trial. *Clinical Rehabilitation*, 27(4), 314-324. <https://doi.org/10.1177/0269215512455651>
- Vafadar, A. K., Côté, J. N., & Archambault, P. S. (2015). Effectiveness of functional electrical stimulation in improving clinical outcomes in the upper arm following stroke : a systematic review and meta-analysis. *BioMed Research International*, 2015(729768), 1-14. <https://doi.org/10.1155/2015/729768>
- Xu, Q., Guo, F., Salem, H. M. A., Chen, H., & Huang, X. (2017). Effects of mirror therapy combined with neuromuscular electrical stimulation on motor recovery of lower limbs and walking ability of patients with stroke : a randomized controlled study. *Clinical Rehabilitation*, 31(12), 1583-1591. <https://doi.org/10.1177/0269215517705689>
- Yavuzer, G., Selles, R., Sezer, N., Sütbeyaz, S., Bussmann, J. B., Köseoğlu, F., [...] Stam, H. J. (2008). Mirror therapy improves hand function in subacute stroke : a randomized controlled trial. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 89(3), 393-398. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2007.08.162>
- Yun, G. J., Chun, M. H., Park, J. Y., & Kim, B. R. (2011). The synergic effects of mirror therapy and neuromuscular electrical stimulation for hand function in stroke patients. *Annals of Rehabilitation Medicine*, 35(3), 316-321. <https://doi.org/10.5535/arm.2011.35.3.316>