

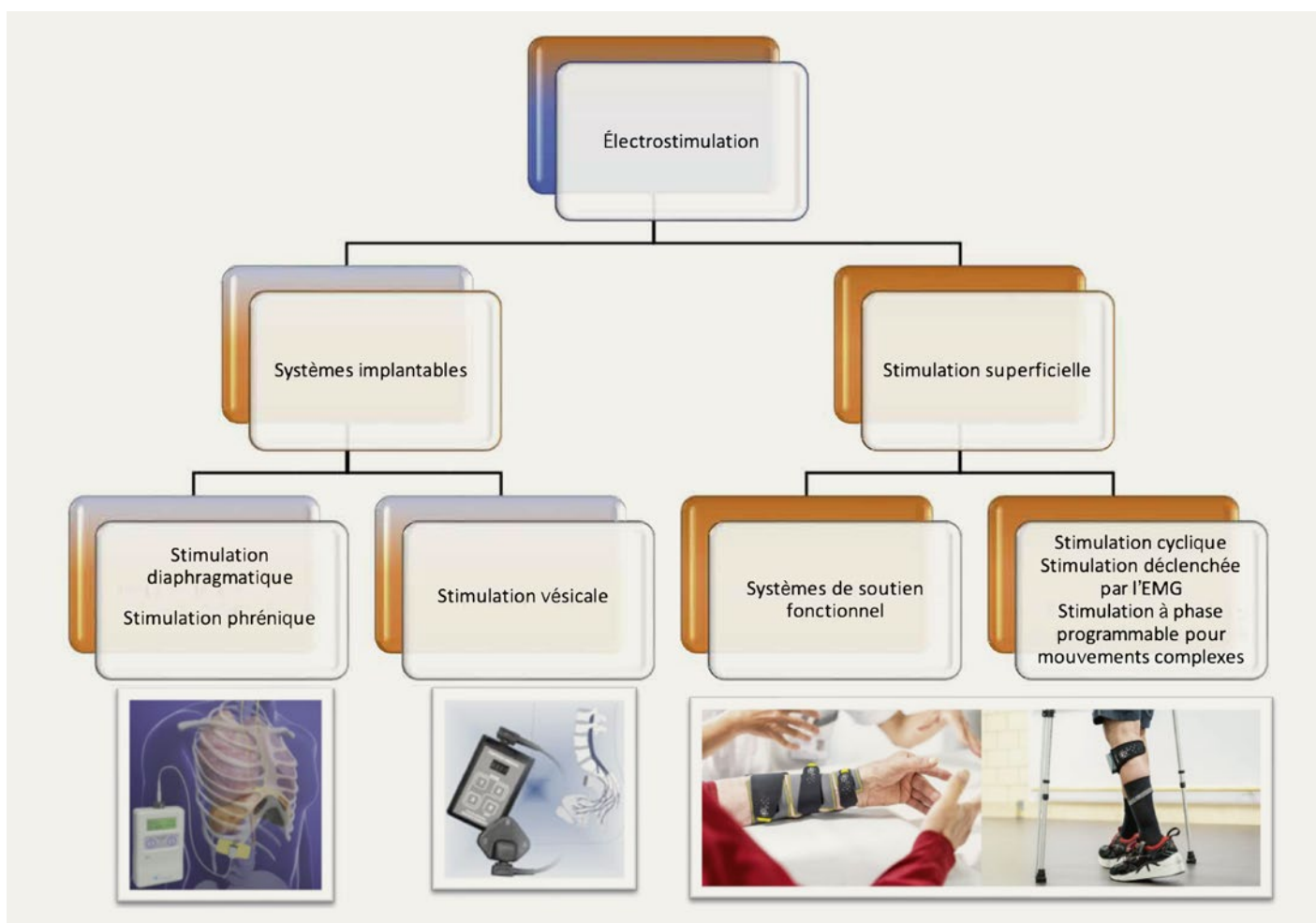


Figure 1: Aperçu des systèmes pour l'électrostimulation. EMG: électromyographie.

Highlight: Médecine physique et réadaptation

Électrostimulation et technologies – réalité et réalisation

Depuis des années, la médecine tente de restaurer la fonction et la force musculaires des personnes qui ont perdu la capacité de bouger volontairement leurs muscles à la suite d'un traumatisme ou d'une maladie neurologique. L'électrostimulation est aujourd'hui une option thérapeutique réaliste dans le quotidien de la rééducation.

Dr Ines Bersch-Porada^{a,b*}, PT; Dr méd. Michael Baumberger^{a,b*}

Schweizer Paraplegiker-Zentrum, Nottwil: ^a Paraplegiologie und Rehabilitationsmedizin; ^b International FES Centre® für Behandlung, Forschung und Lehre

*Co-premiers auteurs

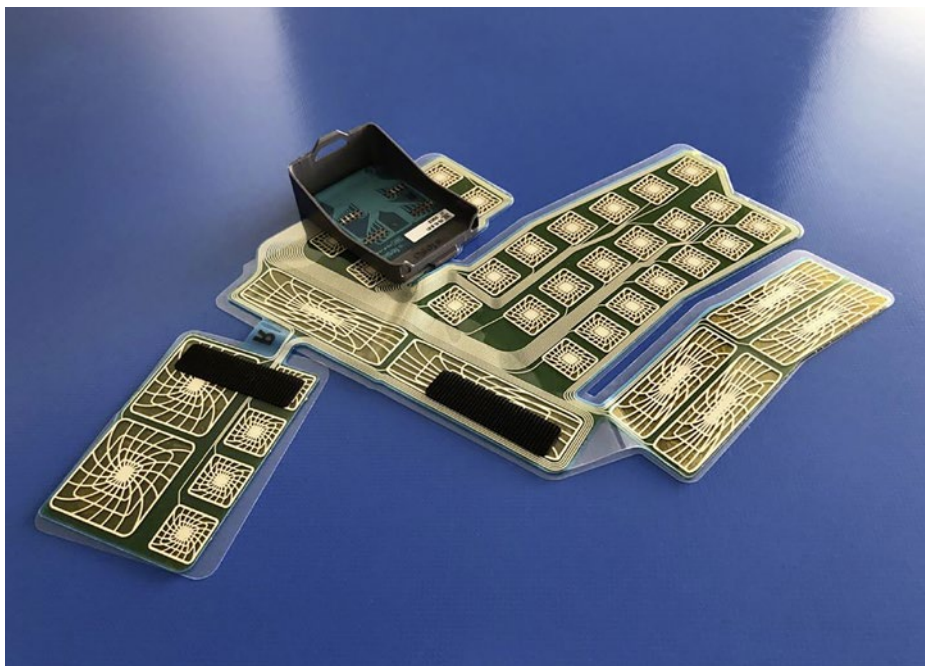


Figure 2: Électrodes en réseau ou multi-pad pour l'avant-bras pour la stimulation des fonctions de la main (FESIA Grasp®).



Figure 3: Intégration de l'électrostimulation fonctionnelle dans un traitement physiothérapeutique. Un consentement éclairé écrit est disponible pour la publication.

Électrostimulation

La méthode de l'électrostimulation (ÉS) est étayée par des preuves scientifiques et cliniques très bonnes à modérées, selon l'application et l'indication. L'ÉS était déjà utilisée il y a plus de 200 ans pour des personnes atteintes de paralysie. Dans la littérature, on trouve deux descriptions de Brockliss (1782) et de Mauduyt (1784) en France. Tous deux ont recommandé un traitement précoce par ÉS chez les patients et patients paralysés à partir de la taille [1]. À la fin du 19^e siècle, quatre cas de personnes atteintes de paralysie incomplète ont été décrits, un par Gull de Londres [2] et trois par Erb de Heidelberg [3]. Les électrodes ont été placées sur la peau au-dessus de la colonne vertébrale. Chez les patientes et patients, la force musculaire s'est améliorée après le traitement par ÉS. Tous ont retrouvé la capacité de marcher et une personne a signalé un soulagement de la douleur [2, 3]. Dans les années 1960, Dimitrijevic et al. ont franchi une nouvelle étape capitale en démontrant qu'une stimulation ciblée provoquait la facilitation des motoneurones spinaux et que les influx afférents dans la moelle épinière avec inhibition simultanée des interneurones entraînaient une amélioration motrice [4]. Aujourd'hui, l'ÉS, avec ses différentes formes d'ÉS neuromusculaire et fonctionnelle et la stimulation musculaire directe, est bien établie dans le concept de rééducation des personnes atteintes de paralysie aiguë et chronique [5, 6]. Les indications sont la neuromodulation pour la stimulation des fonctions résiduelles [7, 8], l'apprentissage moteur [9, 10], le soutien et la

suppléance des fonctions de la station debout, de la marche et de la préhension au moyen d'orthèses [11], la gestion de la respiration [12, 13], l'entraînement cardiovasculaire [14], la prévention des escarres [15], la subluxation de l'articulation de l'épaule et l'ostéoporose [16], l'amélioration de la force musculaire, ainsi que la coordination inter- et intramusculaire et la régulation du tonus [17].

Au sein de la diversité des systèmes d'ÉS, la distinction est faite entre les systèmes implantables et ceux destinés à la stimulation transcutanée (fig. 1).

Pour ces derniers, un champ électrique est généré via l'application d'électrodes sur la peau dans le cadre de l'ÉS, ce qui entraîne soit une dépolarisation de la membrane cellulaire des neurones proches, soit le déclenchement de potentiels d'action des fibres musculaires. Les deux résultent en une contraction musculaire [18]. En cas de lésion supranucléaire, la transmission du courant se fait par le nerf. En cas de lésion infranucléaire, la stimulation se fait directement par le muscle. Le seuil d'excitation pour la génération de potentiels d'action au niveau des fibres nerveuses est nettement infé-

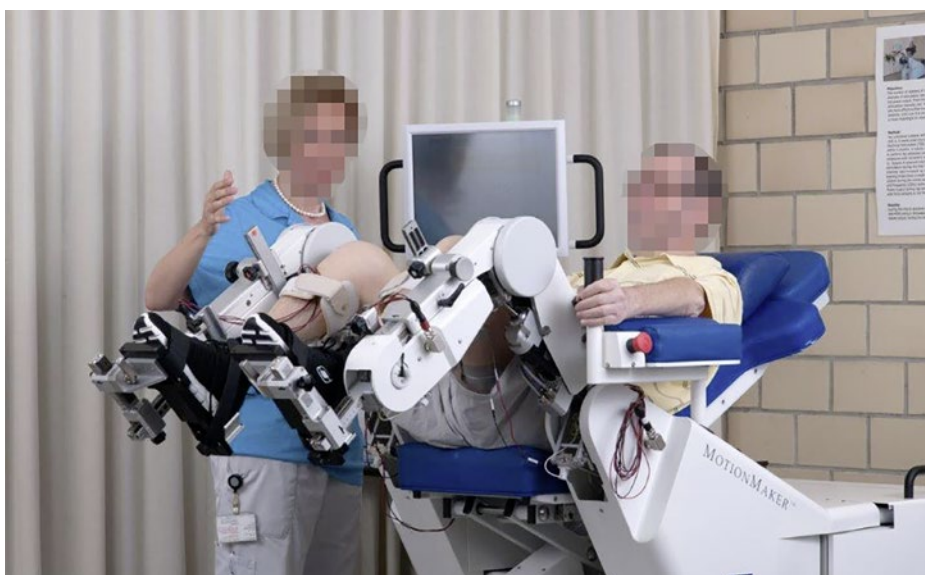


Figure 4: Séance de traitement sur MotionMaker™. Un consentement éclairé écrit est disponible pour la publication.



Figure 5: Combinaison de la stimulation musculaire directe et d'exercices fonctionnels, avec le soutien de la réalité virtuelle. Un consentement éclairé écrit est disponible pour la publication.

rieur à celui de l'excitation directe des fibres musculaires. Pour les fibres nerveuses, il correspond à une durée d'impulsion de 50 μ s (0,05 ms), tandis que celui des fibres musculaires est supérieur à 10 ms. Le choix des paramètres de stimulation et du système de stimulation approprié repose sur cette base physiologique.

Technologies

Le développement de systèmes de stimulation intégrant des électrodes en réseau (fig. 2) et la possibilité de programmer simplement des profils de mouvements dans la pratique clinique ont permis d'améliorer le traitement des personnes atteintes de paraplégie.

Il est possible de mettre en œuvre des traitements combinés avec l'ÉS intégrée dans le traitement physiothérapeutique et ergothérapeutique classique (fig. 3).

De plus, la robotique, qui synchronise en temps réel des profils de mouvements répétitifs ou alternatifs – qu'ils soient spécifiques à une tâche ou basés sur la locomotion – avec une ÉS, permet d'implémenter les principes de la neuromodulation et de l'apprentissage moteur dans les phases aiguës et subaiguës après une paraplégie (fig. 4) [7].

L'utilisation de formes d'apprentissage immersives, comme entre autres l'utilisation de mondes virtuels (fig. 5) en complément à l'ÉS

avec la robotique, offre au système nerveux central et périphérique une stimulation complète.

En fin de compte, l'objectif de la neuroréhabilitation est d'utiliser toutes les voies motrices, sensorielles et cognitives afin de restaurer les fonctions résiduelles dans la zone lésée du système nerveux.

Mise en œuvre à l'exemple de la locomotion

L'innovation clinique combinée à des connaissances neurologiques approfondies sont les compétences clés de l'équipe de rééducation interprofessionnelle.

La neuromodulation est un pilier de la rééducation, qui est utilisée dans la phase aiguë et subaiguë après une paraplégie. Selon la résistance physique de la personne à traiter, il est possible de travailler avec un système robotique stationnaire, par exemple le MotionMaker™. Le MotionMaker™ est une cyberthèse (fig. 4), qui combine l'ÉS neuromusculaire en temps réel des membres inférieurs avec des mouvements d'extension, de flexion et alternés des jambes dans une robotique. L'ÉS elle-même peut fonctionner de manière sensorielle éfférente ou motrice afférente, en fonction du choix des paramètres de stimulation et de la hauteur de l'amplitude. L'appareil dispose en outre d'un système de feed-back visuel qui donne à la patiente ou au patient un feed-back sur la synchronisation de son propre mouvement de jambe et de la robotique sur l'ensemble du trajet de mouvement. Les personnes concernées, quel que soit le niveau de la lésion, peuvent bénéficier de la thérapie à un stade précoce de la rééducation.

Une autre approche de la neuromodulation consiste à combiner l'entraînement locomoteur sur l'appareil Lokomat® et la stimulation transcutanée de la moelle épinière («transcutaneous spinal cord stimulation» [tSCS]). Dans la tSCS, les fibres sensorielles, en particulier les fibres afférentes Ia, sont activées dans les racines postérieures, ce qui provoque une activation transsynaptique des motoneurones α [19]. Il est supposé que l'amélioration immédiate de la motricité est due à l'addition temporelle des influx afférents et des injonctions volontaires sur les voies descendantes [20]. La mise en œuvre dans la pratique clinique quotidienne est simple. La tSCS se déroule simultanément à l'entraînement locomoteur. S'il est possible de la combiner avec la thérapie par observation d'actions, la stimulation du système nerveux et, en fin de compte, de la plasticité neuronale est complète.

Dans la phase chronique après une lésion de la moelle épinière, lorsque les déficits moteurs doivent être compensés par des moyens auxi-



Figure 6: FESIA Walk®.

liaires, les systèmes releveurs du pied induits par l'ÉS offrent une alternative aux orthèses classiques. Les appareils qui disposent d'électrodes en réseau permettent la plus grande personnalisation possible en matière de programmation (fig. 6). L'ÉS comprend l'activation ciblée des muscles péroniers, du muscle tibial antérieur et, le cas échéant, des longs extenseurs des orteils. Durant la phase d'appui, l'activité du muscle triceps sural est décisive pour garantir une stabilité suffisante dans le transport vers l'avant du poids du corps via la jambe d'appui. De plus, si cela est souhaité, le réflexe de fuite peut être stimulé à proximité du nerf péronier, si des déficits de la flexion du genou et de la hanche entravent le déclenchement du pas. La marche en avant, la marche en arrière, les pas de côté, les changements de direction et de vitesse, ainsi que la montée des escaliers sont possibles avec une ÉS fiable.

Conclusion

En résumé, l'exemple du traitement des troubles de la marche après une lésion de la moelle épinière illustre l'utilisation de l'ÉS et de la technologie de la phase aiguë à la phase chronique. Cette approche thérapeutique devrait être standardisée et étayée par des preuves scientifiques et cliniques complémentaires.

Correspondance

Dr méd. Michael Baumberger
Schweizer Paraplegiker-Zentrum
Guido A. Zäch Str. 1
CH-6207 Nottwil
[michael.baumberger\[at\]paraplegie.ch](mailto:michael.baumberger[at]paraplegie.ch)

Informed consent

Des consentements éclairés écrits sont disponibles pour la publication.

Disclosure statement

Les auteurs ont déclaré ne pas avoir de conflits d'intérêts potentiels.

Références

- 1 Silver JR, Weiner MF. Electrical treatment of spinal cord injuries in the 18th and 19th centuries. *J Med Biogr.* 2013;21(2):75–84.
- 2 Gull SW. A collection of the published writings of William Withey Gull. University of Toronto Libraries; 2011.
- 3 Georg Thieme Verlag, Stuttgart. Handbuch der Elektrotherapie von W. Erb. I. Hälfte. Dtsch Med Wochenschr. 1882;8(48):654. Epub 2009 26 Okt.
- 4 Dimitrijevic MR. Restorative Neurology of Spinal Cord Injury. New York: Oxford University Press; 2012. p 1–337.
- 5 Atkins KD, Bickel CS. Effects of functional electrical stimulation on muscle health after spinal cord injury. *Curr Opin Pharmacol.* 2021;60:226–31.
- 6 Luo S, Xu H, Zuo Y, Liu X, Ali AH. A Review of Functional Electrical Stimulation Treatment in Spinal Cord Injury. *Neuromol Med.* 2020;22(4):447–63.
- 7 Bersch I, Albery M, Fridén J. Robot-assisted training with functional electrical stimulation enhances lower extremity function after spinal cord injury. *Artif Organs.* 2022;46(10): 2009–146.
- 8 Al'joboori Y, Hannah R, Lenham F, Borgas P, Kremers CJP, Bunday KL, et al. The Immediate and Short-Term

Effects of Transcutaneous Spinal Cord Stimulation and Peripheral Nerve Stimulation on Corticospinal Excitability. *Front Neurosci.* 2021;15:749042.

9 Kapadia N, Moineau B, Popovic MR. Functional Electrical Stimulation Therapy for Retraining Reaching and Grasping After Spinal Cord Injury and Stroke. *Front Neurosci.* 2020;14:718.

10 Jovanovic LI, Kapadia N, Zivanovic V, Rademeyer HJ, Alavinia M, McGillivray C, et al. Brain-computer interface-triggered functional electrical stimulation therapy for rehabilitation of reaching and grasping after spinal cord injury: a feasibility study. *Spinal Cord Ser Cases.* 2021;7(1):24.

11 Taylor P, Humphreys L, Swain I. The long-term cost-effectiveness of the use of Functional Electrical Stimulation for the correction of dropped foot due to upper motor neuron lesion. *J Rehabil Med.* 2013;45(2):154–60.

12 McCaughey EJ, Jonkman AH, Boswell-Ruys CL, McBain RA, Bye EA, Hudson AL, et al. Abdominal functional electrical stimulation to assist ventilator weaning in critical illness: a double-blinded, randomised, sham-controlled pilot study. *Crit Care.* 2019;23(1):261.

13 Onders RP. Functional electrical stimulation: restoration of respiratory function. *Handb Clin Neurol.* 2012;109:275–82.

14 Solinsky R, Mercier H, Picard G, Taylor JA. Cardio-metabolic Effects of High-Intensity Hybrid Functional Electrical Stimulation Exercise after Spinal Cord Injury. *PM R.* 2021;13(9):937–44.

15 Smit CAJ, Zwinkels M, Dijk T van, Groot S de, Stollwijk-Swuste JM, Janssen TWJ. Gluteal blood flow and oxygenation during electrical stimulation-induced muscle activation versus pressure relief movements in wheelchair users with a spinal cord injury. *Spinal Cord.* 2013;51(9):694–9.

16 Craven BC, Giangregorio LM, Alavinia SM, Blencowe LA, Desai N, Hitzig SL, et al. Evaluating the efficacy of functional electrical stimulation therapy assisted walking after chronic motor incomplete spinal cord injury: effects on bone biomarkers and bone strength. *J Spinal Cord Med.* 2017;40(6):748–58.

17 Thrasher TA, Ward JS, Fisher S. Strength and endurance adaptations to functional electrical stimulation leg cycle ergometry in spinal cord injury. *Neuro Rehabil.* 2013;33(1):133–8.

18 Peckham PH, Knutson JS. Functional electrical stimulation for neuromuscular applications. *Annu Rev Biomed Eng.* 2005;7(1):327–60.

19 Minassian K, Persy I, Rattay F, Dimitrijevic MR, Hofer C, Kern H. Posterior root-muscle reflexes elicited by transcutaneous stimulation of the human lumbosacral cord. *Muscle Nerve.* 2007;35(3):327–36.

20 Gerasimenko Y, Gorodnichev R, Puhov A, Moshonkina T, Savochin A, Selionov V, et al. Initiation and modulation of locomotor circuitry output with multisite transcutaneous electrical stimulation of the spinal cord in noninjured humans. *J Neurophysiol.* 2015;113(3):834–42.



Dr Ines Bersch-Porada, PT
Schweizer Paraplegiker-Zentrum,
Nottwil



Dr méd. Michael Baumberger
Schweizer Paraplegiker-Zentrum,
Nottwil