

# Exosquelettes chez les blessés médullaires



## Powered-exoskeletons in patients with spinal cord injuries

R. Verron<sup>a</sup>  
D. Ricard<sup>b,c,d</sup>

<sup>a</sup>Service de MPR, service de santé des Armées, HIA Percy, Clamart, France

<sup>b</sup>Service de neurologie, service de santé des Armées, HIA Percy, Clamart, France

<sup>c</sup>Inserm, UMR 9010, ENS Paris-Saclay, CNRS, service de santé des Armées, centre Borelli, université Paris-Saclay, université de Paris, Paris, France

<sup>d</sup>Service de santé des Armées, école du Val-de-Grâce, Paris, France

### RÉSUMÉ

Les lésions médullaires entraînent, notamment, des difficultés, voire l'impossibilité, à se tenir debout ou marcher. Elles sont à l'origine de graves complications liées à la restriction de mobilité et au décubitus qui en découle. De surcroît, elles touchent une population jeune et active chez qui l'état de santé et les conditions socioprofessionnelles sont bouleversées. De telles lésions se traduisent également par un coût lié aux soins et au handicap toujours plus impressionnant, en parallèle d'une espérance de vie croissante, chez une population dont la reprise de la marche est une priorité. Les orthèses fonctionnelles, la stimulation électrique fonctionnelle ou encore des systèmes de lutte contre la pesanteur sont des réponses apportées à la demande des patients. Néanmoins, ces dispositifs nécessitent la présence d'aides externes ou engendrent une consommation énergétique majeure qui limite leur usage régulier au quotidien. C'est ainsi que les exosquelettes représentent une réponse qui semble adaptée à la problématique soulevée et dont le présent travail vise à éclaircir les limites et bénéfices d'utilisation. Il existe, à ce jour, une dizaine de modèles d'exosquelettes adressés aux blessés médullaires sur le marché mondial. Chacun vise à suppléer les fonctions déficientes de marche et de station érigée, tout en offrant aux équipes médicales un outil de travail rééducatif intéressant et un moyen innovant de lutte contre les complications du décubitus. Cette triple perspective de prise en charge place les exosquelettes comme un outil révolutionnaire dans le parcours de soins des blessés médullaires. Cependant, les exosquelettes n'en restent pas moins encore extrêmement coûteux financièrement et cognitivement pour leurs utilisateurs. S'ajoutent à cela, entre autres exemples, un manque de preuves scientifiques robustes sur leur efficacité et une sollicitation intense des membres supérieurs à l'origine de troubles musculosquelettiques et limitant les interactions du sujet avec son environnement. De telles complications limitent actuellement leur démocratisation et utilisation en vie courante.

© 2021 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

### SUMMARY

*Spinal cord injuries cause major impairments that may impede the ability to stand or walk. The subsequent restriction of movement and imposed decubitus lead to serious side effects. Moreover, spinal cord injury often affects a young and working population with an increasing life expectancy. For these patients and society in general, disrupted health and socio-occupational conditions have a significant cost related not only to healthcare but also the individual's disability per se. For most, the top priority is to recover the ability to walk. Functional orthoses, functional*

### MOTS CLÉS

Exosquelettes  
Blessé médullaire  
Tétraplégie/paraplégie  
Marche  
Rééducation neurologique

### KEYWORDS

*Exoskeletons/powerd-exoskeletons  
Spinal cord injury  
Tetraplegia/paraplegia  
Walking  
Neurorehabilitation*

### Auteur correspondant :

**R. Verron,**  
Service de MPR, service de santé des Armées, HIA Percy, 101, avenue Henri-Barbusse, 92140 Clamart, France.  
Adresse e-mail :  
[verron@hotmail.fr](mailto:verron@hotmail.fr)

*electrical stimulation or even weight-bearing systems are current responses to this demand. Nevertheless, these devices require external assistance or imply tremendous energy consumption. Thus, an adequate answer to this important issue would be the powered exoskeleton. Here, we discuss the benefits and limits of powered exoskeletons. Currently, around ten different powered exoskeletons are available for people with spinal cord injuries. Each has been designed to compensate for defective walking or standing function. These devices constitute an innovative rehabilitation tool for medical teams and greatly contribute to alleviating the deleterious effects of decubitus. Powered exoskeletons can revolutionize the lives of patients with spinal cord injury, but they are costly and require significant cognitive capacity. In addition, strong scientific proof of efficiency is still lacking. Most powered exoskeletons require intense use of the upper limbs leading to musculo-skeletal problems that restrain patients in their interactions. Here, we present a handful of examples that currently curtail worldwide distribution and everyday use of powered exoskeletons.*

© 2021 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

## INTRODUCTION

La lésion médullaire, qui touche annuellement entre 180 000 et 500 000 personnes à travers le monde [1,2], consiste en une interruption totale ou partielle des voies sensitivomotrices situées entre la commande cérébrale et les effecteurs musculaires. De telles lésions engendrent, de facto, des difficultés, voire l'impossibilité, de se tenir debout ou de marcher. Les lésions médullaires précarisent ainsi dramatiquement à la fois l'état de santé et les conditions socioprofessionnelles d'une population très jeune (30 ans d'âge médian) amenée à vivre en moyenne 32 ans avec ce handicap [3,4].

## CONSÉQUENCES DU DÉCUBITUS

La lésion médullaire, et le décubitus prolongé qu'elle entraîne, débouchent sur un déconditionnement physique global et chronique. De manière non exhaustive, il est décrit classiquement une déminéralisation osseuse, des troubles cardiorespiratoires, une immunodépression, des dysrégulations glycémiques et lipidiques, ainsi que des problématiques de dénutrition et/ou d'obésité.

Les complications sont également nombreuses : escarres, fractures osseuses, chutes, infections systémiques, spasticité musculaire, contractures, douleurs neuropathiques, constipation opiniâtre, troubles mictionnels et érectiles font partie des complications primaires et secondaires qui obèrent massivement la qualité de vie des patients et représentent un véritable challenge thérapeutique [5,6]. Si la plupart sont prises en charge efficacement, il n'en reste pas moins que l'espérance de vie de cette population est réduite de 18 ans comparativement à des sujets de même âge et de même sexe [7].

Par ailleurs, on estime le coût global de cette pathologie à 5,3 millions de dollars sur la vie d'un patient aux États-Unis à la fois en coûts directs de soins et de manière indirecte par la perte d'emploi ou de productivité [4]. Si 83 % des blessés médullaires sont employés au moment de l'accident, seuls 25 % le resteront au bout de quatre ans [8].

## MARCHE ET LÉSION MÉDULLAIRE

Récupérer la marche est une priorité pour un grand nombre de blessés médullaires [9]. Cette activité représente donc une problématique centrale dans la prise en charge médicorééducative.

Le pronostic de marche est grevé à la fois par le niveau de l'atteinte médullaire mais également par le caractère complet ou incomplet des lésions (*Tableau 1*) [10,11]. Ainsi, la déambulation érigée à la sortie du centre de prise en charge initiale varie de 75 % chez un patient AIS (ASIA Impairment Scale) D à moins de 1 % chez un patient AIS A.

On constate également que la dépendance aux aides techniques tels que le fauteuil roulant s'accroît au cours du temps. Au total, 59 % des patients ont ainsi recours à un moyen de locomotion à un an, quand 75 à 80 % d'entre eux l'utilisent au-delà de 10 ans d'évolution [4].

Cet état de dépendance vis-à-vis d'aides tierces entraîne également une importante sédentarité chez cette population. Environ la moitié des blessés médullaires n'ont ainsi pas d'activités physiques de loisir [12].

## MÉTHODES ACTUELLES PERMETTANT DE RESTAURER LA FONCTION DE MARCHE

Historiquement, les orthèses fonctionnelles constituent la première réponse apportée afin de restaurer la fonction de marche chez les lésés médullaires. Malheureusement, les orthèses cruropédieuses ou HKAFO (*Hip-Knee-Ankle-Foot Orthotic*) en dénominations anglaises et les orthèses pendulaires mécanique ou RGO (*Reciprocal Gait Orthotic*) présentent des inconvénients majeurs limitant leur utilisation [13]. Le schéma de marche parfois erratique et la forte demande énergétique, constituée par la mise en jeu anormale des muscles antigravitaires et leur temps de mise en place, s'opposent à une utilisation prolongée et régulière [14]. On comprend, dès lors, que les recommandations de santé pour contrer les conséquences de la sédentarité ne peuvent être respectées avec ce type d'outils.

Des systèmes hybrides associant orthèses et stimulation électrique fonctionnelle sont aujourd'hui utilisés chez des patients avec lésions complètes ou quasi-complètes sans pour autant s'épargner les complications précédemment décrites [14].

D'autres techniques visent, quant à elles, à lutter contre la pesanteur. En centre de rééducation, le patient peut s'aider du support d'un thérapeute ou avoir accès à des tapis de marche avec suspension du poids du corps (*Body-Weight-Supported Treadmill Training*) ou encore des dispositifs associant un système robotisé d'assistance à la marche avec un système de suspension (*Robotic Assisted Gait Training*). C'est le cas notamment du système Lokomat de Hocoma (Suisse) [15].

**Tableau I. Échelle AIS (ASIA Impairment Scale).**

ASIA Impairment Scale (AIS)	Caractère complet/incomplet de la lésion médullaire	Description
A	Lésion complète	Pas de préservation motrice ou sensitive sur les segments S4–S5
B	Lésion incomplète	Préservation de la fonction sensitive mais pas motrice en dessous du niveau lésionnel incluant les segments S4–S5
C	Lésion incomplète	Préservation de la fonction motrice. Plus de la moitié des muscles clés en dessous du niveau lésionnel sont cotés à moins de 3/5 sur l'échelle mMMS
D	Lésion incomplète	Préservation de la fonction motrice. Au moins la moitié des muscles clés en dessous du niveau lésionnel sont cotés à 3/5 ou plus sur l'échelle mMMS
E	Aucune lésion	Fonction sensitive et motrice normale

Cependant, ces techniques reposent sur la présence d'un thérapeute afin de soutenir ou de guider les membres inférieurs lors de la marche (BWSTT) et/ou nécessitent un tapis de marche, rendant leur usage en vie quotidienne impossible (BWSTT et RAGT).

Dès lors, il est licite de se demander si les exosquelettes peuvent constituer une solution adaptée à la problématique de la marche chez le blessé médullaire en milieu de vie ordinaire. En effet, ces dispositifs offrent la possibilité d'une locomotion sans assistance humaine tierce ou tapis de marche. Afin d'apporter un élément de réponse à cette problématique, leurs bénéfices et limites sont ici dressés.

## EXOSQUELETES, ÉTAT ACTUEL

Les exosquelettes sont des dispositifs médicaux motorisés, dont l'objectif est de restaurer des fonctions motrices dans la plus grande autonomie possible, tout en restant non invasifs. Le principe chez les blessés médullaires consiste, donc, à la fois, à lutter contre les complications de décubitus sus-décrites et d'améliorer la qualité de vie des patients, en leur permettant une station debout, de marcher, descendre et monter des escaliers, par exemple. Il existe, à ce jour, une dizaine de modèles sur le marché mondial (*Tableau II*) ».

**Tableau II. Modèles actuels d'exosquelettes des membres inférieurs (arrêté en décembre 2019).**

Nom du modèle	Nom de l'entreprise	Pays	Accepté sur le marché américain	Marque CE
Keeogo	B-Temi	Canada	Non	Non
Arke	<i>Bionik Laboratories</i>	Canada	Non	Non
H-Mex	Hyundai	Corée du Sud	Non	Non
ROBIN	Non connu	Corée du Sud	Non	Non
Hank	Gogoa	Espagne	Non	Oui
Exo-H2 et H3	Technaid	Espagne	Non	Non
Atlas 2020/Atlas 2030	Marsi-Bionics	Espagne	Non	Non
Ekso	Ekso Bionics	États-Unis	Oui	Oui
Indego	Parker Hannifin	États-Unis	Oui	Oui
Phœnix	Suit-X	États-Unis	Non	Oui
NASA-IHMC X1 Mina Exoskeleton	<i>Institute for Human and Machine cognition</i>	États-Unis	Non	Non
Atalante	Wandercraft	France	Non	Oui
HAL	Cyberdine	Japon	Oui	Oui
WPAL	<i>Fujita Health University</i>	Japon	Non	Non
<i>Honda Walking Assise Device</i>	Honda	Japon	Non	Oui
REX Rehab et REX P	Rex Bionics	Nouvelle-Zélande	Oui pour REX Rehab sous la supervision d'un thérapeute	Oui
Axosuit	Axosuits	Roumanie	Non	Non
ExoAtlet	ExoAtlet	Russie	Non	Non
Mindwalker	Non connu	Non connu	Non	Non
Kinesis	Non connu	Non connu	Non	Non

Actuellement, seuls trois d'entre eux (*Fig. 1–3*) ont obtenu un accord d'utilisation par l'administration américaine des denrées alimentaires et du médicaments (*US Food and Drug Administration*) dans des indications précisées dans le *Tableau III*. D'autres compagnies possèdent, quant à elles, une marque CE autorisant leur commercialisation sur le marché européen et donc français (*Tableau II*).



Figure 1. Exosquelettes Indego.



Figure 2. Exosquelettes ReWalk.

### QUELS SERAIENT LES USAGES DES EXOSQUELETTES ?

Tout d'abord, ces dispositifs peuvent être utilisés à visée de suppléance. Leur demande physiologique est réduite de près de 50 % comparativement aux orthèses fonctionnelles avec un coût de 3,0 à 5,9 équivalent métabolique (MET) [16] – unité estimant par la consommation d'oxygène, la dépense énergétique et l'intensité d'une activité physique. Cette consommation correspond à une marche de 5 km/h, ce qui va de pair avec le ressenti des patients qui cotent l'effort de marche avec exosquelette en moyenne à 10/20 sur l'échelle de Borg décrite dans le *Tableau IV* [17]. Par ailleurs, les vitesses et



Figure 3. Exosquelette Ekso.

distances réalisées lors de tests standardisés tels que le test de marche de 6 minutes sont également améliorées comparativement aux autres dispositifs [17]. Utilisés, selon les normes de leur constructeur, les exosquelettes sont des dispositifs qui n'engendrent que peu d'effets indésirables tant du point de vue cardiovasculaire que cutané [18]. De même, le

**Tableau III. Modèles, indications et niveaux lésionnels retenus par la FDA (US Food and Drug Administration).**

Nom du modèle	Utilisation autorisée	Niveau lésionnel
Indego (Fig. 1)	Vie courante	T3 à L5
	Rééducation	C7 à L5
Ekso (Fig. 2)	Rééducation	T4 à T5 AIS A à D Ou C7 à T3 si AIS D
ReWalk (Fig. 3)	Vie courante	T7-L5
	Rééducation	T4-L5

**Tableau IV. Échelle de Borg, échelle d'évaluation de l'effort perçu.**

Perception de l'effort	Cote
Pas d'effort	< 6
Très léger	6 à 8
Léger	9 à 10
Modéré	11 à 12
Intense	13 à 16
Très intense	17 à 19
Maximale	20

risque de chute lors de leur utilisation est estimé à environ 4 % sans conséquence traumatique préjudiciable [17]. Ils permettent, en outre, une autonomisation du patient, puisque 76 % sont capables de déambuler sans assistance humaine après entraînement [17].

Un autre point d'intérêt des exosquelettes réside dans leur potentiel rééducatif.

Plus de la moitié des blessés médullaires ont effectivement une atteinte incomplète avec préservation de fibres sensitivo-motrices. On peut, dès lors, espérer la récupération d'un *pattern* de marche satisfaisant grâce à la plasticité médullaire par le biais d'afférences multimodales [19]. Des études ont également permis de démontrer l'obtention d'un meilleur signal électromyographique par le biais d'un travail actif comparativement à une mobilisation passive [20]. Les exosquelettes pourraient, de facto, permettre un renforcement efficace de la motricité résiduelle.

Enfin, les exosquelettes ont un intérêt thérapeutique de prévention secondaire en permettant de lutter activement contre les complications du décubitus. Malgré de nombreuses études encourageantes, ces dernières restent de petites tailles avec des critères de jugement régulièrement subjectifs et/ou différents limitant l'extrapolation de leurs données à plus vaste échelle [16,17,21].

### LES LIMITES ACTUELLES

Aux vues de ces multiples perspectives, on peut se demander ce qui limite aujourd'hui l'utilisation des exosquelettes dans la stratégie de prise en charge des blessés médullaires.

Comme expliqué dans le chapitre précédent, la communauté médicorééducative manque encore actuellement de données fiables et robustes permettant de justifier l'usage de ces dispositifs auprès des financeurs. Effectivement, le coût des exosquelettes reste encore très prohibitif, entre 70 000 et 175 000 euros, selon les constructeurs [22]. Un certain nombre d'articles scientifiques ne retrouvant pas d'effet bénéfique systématique sur les complications secondaires, on peut comprendre la frilosité actuelle avant d'en acquiescer.

Par ailleurs, leur taux d'abandon reste encore aujourd'hui élevé, et ce, pour plusieurs raisons.

La première d'entre elles est que la plupart des exosquelettes ne permettent pas une libération des membres supérieurs. Seuls deux modèles actuels disposent en effet d'actuateurs linéaires permettant de stabiliser verticalement le dispositif. Il

s'agit des modèles néo-zélandais REX (Rex Bionics) et français ATALANTE (Wandercraft). Sans cette capacité d'auto-gestion de l'équilibre latéral, les autres dispositifs entraînent irrémédiablement une utilisation importante des membres supérieurs par l'usage de déambulateurs ou cannes. La promesse de pouvoir accéder plus facilement aux objets ou rangements situés en hauteur comparativement au fauteuil roulant devient alors désuète. Cette notion entraîne également deux autres limites non négligeables : à savoir celles des douleurs musculo-articulaires des poignets et épaules liées à l'usage répété des aides techniques de marche ainsi que la nécessité de pouvoir agripper à minima une poignet [14]. C'est ainsi que la spasticité, qui résulte de la perte du contrôle pyramidal cortico-spinal sur les effecteurs musculaires, peut à la fois être un écueil et une aide dans l'usage des exosquelettes. L'hypertonie réflexe pouvant découler d'une lésion médullaire peut ainsi favoriser la préhension des aides techniques de marche nécessaires à la plupart des exosquelettes [23]. A contrario, en regard des membres inférieurs, elle peut engendrer une limitation des mobilités passives trop importante pour permettre au système robotisé de reproduire un schéma de marche convenable [22]. C'est ainsi qu'en cas de spasticité diffuse, l'usage de traitements à effet systémique tels que le Baclofène ou la Tizanidine requiert une véritable réflexion si le recours à un exosquelette est envisagé. Par ailleurs, ces dispositifs permettent une vitesse de locomotion estimée entre 0,2 et 0,26 m/s, ce qui reste loin des standards d'une marche dite normale. Il faut ajouter, à cela, le temps de mise en place et de désadaptation qu'ils exigent avec les risques de chutes s'y ajoutant. La plupart des patients nécessitent ainsi une aide externe à la fois pour le transfert, la vérification des réglages du dispositif et la mise en place des systèmes d'attache avant de pouvoir se déplacer [24]. Les autres points notables concernent le coût cognitif important qu'exige l'apprentissage des exosquelettes, le manque de *feedback* sensitif lors de la marche, l'autonomie limitée des batteries (8 heures pour la plus longue) ou tout simplement l'absence de système parfaitement étanche en cas d'usage en condition humide [14,24].

## CONCLUSION

Les exosquelettes présentent l'avantage de proposer plusieurs axes de prise en charge concernant la locomotion chez les blessés médullaires : suppléance des fonctions perdues, réadaptation de celles restantes par le jeu de la plasticité médullaire et enfin thérapeutique par prévention de complications secondaires du décubitus. Néanmoins, cet outil reste encore aujourd'hui extrêmement coûteux et les études menées, à son sujet, n'offrent pas de certitudes quant à ses effets. D'ailleurs, son taux d'abandon est, à ce jour, encore important du fait notamment de sa lenteur, du recours important aux membres supérieurs et des difficultés de réglages et mise en place qui limitent grandement son usage en vie quotidienne.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'IRME pour son soutien efficace et particulièrement Sophie Blancho, qui en est gestionnaire, pour sa relecture attentive du manuscrit.

## Déclaration de liens d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

## RÉFÉRENCES

- [1] WHO. International perspectives on spinal cord injury, 2013. World Health Organization. ISBN : 9789241564663. Disponible sur: [https://www.who.int/disabilities/policies/spinal\\_cord\\_injury/en/](https://www.who.int/disabilities/policies/spinal_cord_injury/en/).
- [2] Lee BB, Cripps RA, Fitzharris M, Wing PC. The global map for traumatic spinal cord injury epidemiology: update 2011, global incidence rate. *Spinal Cord* 2014;52:110–6.
- [3] 2015 NSCISC Annual Statistical Report Complete Public Version. Disponible sur: <https://www.nscisc.uab.edu/PublicDocuments/reports/pdf/2015%20NSCISC%20Annual%20Statistical%20Report%20Complete%20Public%20Version.pdf>.
- [4] Miller LE, Herbert W. Health and economic benefits of physical activity for patients with spinal cord injury. *Clin Outcomes Res* 2016;8:551–8.
- [5] Sezer N, Akkuş S, Uğurlu FG. Chronic complications of spinal cord injury. *World J Orthop* 2015;6(1):24–33.
- [6] Jensen MP, Truitt AR, Schomer KG, Yorkston KM, Baylor C, Molton IR. Frequency and age effects of secondary health conditions in individuals with spinal cord injury: a scoping review. *Spinal Cord*. 2013;51(12):882-892. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24126851>.
- [7] Bureau UC. Projections of the Size and Composition of the U.S: 2014-2060. The United States Census Bureau:25-1143. Disponible sur: <https://www.census.gov/library/publications/2015/demo/p25-1143.html>.
- [8] Krause J, Edles P, Charlifue S. Changes in employment status and earnings after spinal cord injury: a pilot comparison from pre- to post-injury. *Top Spinal Cord Inj Rehabil* 2011;16:74–9.
- [9] Ditunno PL, Patrick M, Stineman M, Ditunno JF. Who wants to walk? Preferences for recovery after SCI: a longitudinal and cross-sectional study. *Spinal Cord* 2008;46(7):500–6.
- [10] Waters RL, Adkins RH, Yakura JS, Sie I. Motor and sensory recovery following incomplete tetraplegia. *Arch Phys Med Rehabil* 1994;75(3):306–11.
- [11] Burns AS, Marino RJ, Flanders AE, Flett H. Clinical diagnosis and prognosis following spinal cord injury. *Handb Clin Neurol* 2012;109:47–62.
- [12] Ginis KAM, Latimer AE, Arbour-Nicitopoulos KP, Buchholz AC, Bray SR, Craven BC, et al. Leisure time physical activity in a population-based sample of people with spinal cord injury part I: demographic and injury-related correlates. *Arch Phys Med Rehabil* 2010;91(5):722–8.
- [13] Sykes L, Edwards J, Powell ES, Ross ER. The reciprocating gait orthosis: long-term usage patterns. *Arch Phys Med Rehabil* 1995;76(8):779–83.
- [14] Palermo AE, Maher JL, Baunggaard CB, Nash MS. Clinician-focused overview of bionic exoskeleton use after spinal cord injury. *Top Spinal Cord Inj Rehabil* 2017;23(3):234–44.
- [15] Cheung EYY, Ng TKW, Yu KKK, Kwan RLC, Cheing GLY. Robot-assisted training for people with spinal cord injury: a meta-analysis. *Arch Phys Med Rehabil* 2017;98(11):2320e12–31e12.
- [16] Mekki M, Delgado AD, Fry A, Putrino D, Huang V. Robotic rehabilitation and spinal cord injury: a narrative review. *Neurother J Am Soc Exp Neurother* 2018;15(3):604–17.
- [17] Miller LE, Zimmermann AK, Herbert WG. Clinical effectiveness and safety of powered exoskeleton-assisted walking in patients

with spinal cord injury: systematic review with meta-analysis. *Med Devices Auckl NZ* 2016;9:455–66.

- [18] Yang A, Asselin P, Knezevic S, Kornfeld S, Spungen AM. Assessment of in-hospital walking velocity and level of assistance in a powered exoskeleton in persons with spinal cord injury. *Top Spinal Cord Inj Rehabil* 2015;21(2):100–9.
- [19] Edgerton VR, Tillakaratne NJK, Bigbee AJ, de Leon RD, Roy RR. Plasticity of the spinal neural circuitry after injury. *Annu Rev Neurosci* 2004;27:145–67.
- [20] Jezernik S, Colombo G, Keller T, Frueh H, Morari M. Robotic orthosis lokomat: a rehabilitation and research tool. *Neuromodulation Technol Neural Interface* 2003;6(2):108–15.
- [21] Baunsgaard CB, Nissen UV, Brust AK, Frotzler A, Ribeill C, Kalke Y-B, et al. Exoskeleton gait training after spinal cord injury: an exploratory study on secondary health conditions. *J Rehabil Med* 2018;50(9):806–13.
- [22] Heinemann AW, Jayaraman A, Mummidisetty CK, Spraggins J, Pinto D, Charlifue S, et al. Experience of robotic exoskeleton use at four spinal cord injury model systems centers. *J Neurol Phys Ther JNPT* 2018;42(4):256–67.
- [23] Gassert R, Dietz V. Rehabilitation robots for the treatment of sensorimotor deficits: a neurophysiological perspective. *J Neuroengineering Rehabil* 2018;15(1):46.
- [24] Gorgey AS. Robotic exoskeletons: the current pros and cons. *World J Orthop* 2018;9(9):112–9.