

Faculté des sciences de la motricité

Evaluation de l'efficacité de l'exosquelette chez l'adulte avec lésion médullaire selon le modèle de la CIF.

Revue narrative

Auteur : Maxime Uriarte

Promotrice : Professeure Christine Detrembleur

Année académique 2023-2024

Master en kinésithérapie et réadaptation [60.0] – KINE2

Remerciements

Mes premiers remerciements s'adressent à Madame la Professeure Christine Detrembleur pour m'avoir permis de travailler sur ce sujet en toute liberté. Merci pour votre aide, votre disponibilité et vos précieux conseils.

Mes remerciements vont également à Emma, pour ses relectures et son soutien quotidien afin de mener au mieux ce mémoire.

Enfin, je tiens à remercier ma famille pour leur soutien sans faille, apporté durant toutes ces années.

Liste des abréviations

10MWT	Test de marche de 10 mètres
6MWT	Test de marche de 6 minutes
CIF	Classification Internationale du Fonctionnement, du handicap et de la santé
EVA	Echelle Visuelle Analogique
FC	Fréquence cardiaque
FDA	Food and Drug Administration
FIM	Mesure Fonctionnelle d'Indépendance
FR	Fréquence respiratoire
HADS	Hospital Anxiety and Depression Scale
<i>Infra</i>	Ci-dessous
MAS	Modified Ashworth Scale = Echelle d'Ashworth Modifiée
MFRT	Modified Functional Reach Test
NPRS	Numeric Pain Rating Scale
NPSI	Neuropathic Pain Syndrom Inventory
QoL	Quality of Life = Qualité de vie
RER	Rapport des Echanges Respiratoires
<i>Supra</i>	Ci-dessus
SWLS	Satisfaction With Life Scale = Echelle de satisfaction de vie
TA	Tension artérielle
TUG	Timed Up and Go
V _{CO2}	Consommation en dioxyde de carbone
V _{O2}	Consommation en oxygène
VE	Débit ventilatoire
V _t	Volume courant

Sommaire

1	Introduction	1
1.1	La lésion médullaire	1
1.2	Les exosquelettes.....	2
1.3	La Classification Internationale du Fonctionnement, du handicap et de la santé (CIF)	5
1.4	Objectifs du mémoire	7
2	Méthode.....	8
2.1	Stratégie de recherche	8
2.2	Critères de sélection des articles	8
2.2.1	Participants.....	9
2.2.2	Intervention	9
2.2.3	Comparaison	9
2.2.4	Outcomes.....	9
2.2.5	Study Design	11
3	Résultats	13
3.1	Sélection des études.....	13
3.2	Caractéristiques des études.....	14
3.2.1	Caractéristiques des participants	14
3.2.2	Caractéristiques des interventions	14
3.2.3	Synthèse des résultats.....	15
3.2.3.1	Fonctions organiques, structures anatomiques et déficiences	15
3.2.3.2	Activités.....	18
3.2.3.3	Participation.....	20
3.2.3.4	Facteurs environnementaux.....	20
3.2.3.5	Éléments extérieurs à la CIF	21
4	Discussion.....	32

4.1	Rappels des objectifs de la revue narrative	32
4.2	Discussion	32
5	Limitations et points forts.....	36
5.1	Limitations.....	36
5.2	Points forts.....	36
6	Conclusion.....	37
7	Bibliographie.....	39
8	Annexes.....	44
9	Table des illustrations	51
9.1	Table des tableaux	51
9.2	Table des figures	51

1 Introduction

1.1 La lésion médullaire

La lésion médullaire, aussi appelée lésion de la moelle épinière, est décrite comme une *“atteinte à cet organe résultant d’un traumatisme (accident de voiture, par exemple) ou d’une maladie ou dégénérescence (cancer, par exemple)”* (WHO., 2013). Dans 80% des cas, cette atteinte est d’origine traumatique et principalement liée aux accidents de la route (45%). Pour autant, dans 20% des cas, elle est d’origine médicale (cause infection, parasitaire ou pour cause vasculaire, tumorale etc...). Cette lésion est répertoriée à 80% chez les hommes, pour seulement 20% chez les femmes (Hanson, 2021). Ces lésions sont souvent associées à une altération de vie, impliquant d’importantes morbidités, un handicap, une dépendance permanente ainsi qu’un impact psychologique et financier très important. La prévalence globale des lésions médullaires a augmenté au cours des 30 dernières années et varie de 236 à 1298 patients par million d’habitants selon les différents pays (Khorasanizadeh, 2019).

De nombreux symptômes peuvent être engendrés par la lésion médullaire. À ce titre, peuvent être cités les troubles de la motricité volontaire, pouvant entraîner une paralysie en cas de lésion complète ou une parésie en cas d’atteinte incomplète ; des troubles de la motricité réflexe ayant pour conséquence une spasticité ou au contraire une hypotonie ; des troubles sensitifs superficiels ou profonds ; des troubles sphinctériens, vésicaux et intestinaux ; des troubles neurovégétatifs se manifestant par exemple en cas de lésion \geq T6, pouvant ainsi amener une hyper-réflexivité autonome (HRA)¹ ou bien une hyper ou

¹ Hypertension artérielle, amenée par une hyperactivité du système neurovégétatif entraînant de céphalées violentes, de sudation, de frissons et d’horripilation

hypothermie² ; des douleurs par hyper-stimulation ou par levée d'inhibition ; des troubles cardiovasculaire ; suivant le niveau de lésion ou autres troubles associés tels que des troubles respiratoires et des décalcifications osseuses (Désert, 2008). Le niveau de lésion sur la colonne vertébrale viendra influencer le type de handicap (*cf annexe n°1*) et donc l'autonomie, puisque les déplacements pourront même être limités (*cf annexe n°2*).

Afin de pouvoir déterminer la sévérité de l'atteinte de la lésion médullaire, l'American Spinal Injury Association (ASIA) a élaboré l'ASIA Imperment Scale (AIS). Cette échelle évalue la fonction neurologique, l'étendue de la blessure et classifie le patient suivant 5 grades différents (*cf annexe n°3*).

La prise en charge habituelle du patient par le kinésithérapeute est faite dans un but de réadaptation (apprentissage des transferts, des retournements, maniement du fauteuil roulant, apprentissage des push-up), de prévention des complications (éducation du patient, verticalisation, kiné passive, prévention des douleurs d'épaule, postures, étirements, kiné respiratoire), ou de rééducation à la marche pour les personnes atteintes d'une lésion médullaire partielle (Hanson, 2021).

Cependant, ces dernières années, on note l'émergence d'une nouvelle technologie dans la rééducation de ces patients, l'exosquelette.

1.2 Les exosquelettes

Les débuts de l'émergence de l'exosquelette remontent aux années 1960. Initialement, l'exosquelette était utilisé à des fins militaires pour amplifier les capacités ambulatories des soldats (Anam, 2012). Rapidement, les chercheurs travaillèrent également pour la réhabilitation, qui a débuté en 1994 avec le Lokomat® (Rodríguez-Fernández, 2021). Deux types d'exosquelettes ont alors été

² Augmentation ou diminution de la température liée à des problèmes vasculaire et de sudation au niveau de lésion

développés : un pour l'utilisation sur tapis roulant, combinant l'aide au mouvement des membres inférieurs via l'exosquelette ainsi qu'un système de soutien du poids pour ainsi diminuer la force gravitationnelle comme Lokomat® ; l'autre sur sol pour mobiliser les membres tout en augmentant la mise en charge, comme Indego®, Rewalk®, HAL® (Shi, 2019), Atalante®.

Le Rewalk® est le premier exosquelette à avoir été approuvé par la Food and Drug Administration (FDA) dans un objectif de réadaptation dans les centres de jours, hôpitaux et d'utilisation personnelle à domicile ainsi qu'à l'extérieur (Rewalk, s.d.). Celui-ci a également été approuvé par l'Union Européenne. Il permet aux personnes atteintes de lésions médullaires d'effectuer différents types de mouvements grâce à des moteurs localisés sur les hanches et genoux en bilatéral (Kim, 2021). Cet appareil est destiné aux patients avec une lésion médullaire de T7 à L5, pouvant marcher à une vitesse ≥ 0.4 m/s sur 10m et avec un test de 6 minutes à la marche (6MWT) ≥ 110 m (Hong, 2020). Il faudra également un score sur l'échelle modifiée de Ashworth inférieur ou égal à 3, ou bien une absence de toute contrainte articulaire (Bissolotti, 2018) . Le patient initie la marche en réalisant un mouvement du tronc en avant ou en arrière, déplaçant ainsi le centre de masse. Il est à spécifier que des béquilles doivent être utilisées pour son bon fonctionnement (Kim, 2021).



Figure 1 : Exosquelette Rewalk® (Kim, 2021) – Illustration tirée de <https://exoskeletonreport.com/product/rewalk/>

L'exosquelette Ekso® est semblable au Rewalk®. Accepté par la FDA, l'initiation à la marche se fait également par un transfert du centre de masse et le patient doit avoir deux béquilles ou un rollator à deux roues (Kim, 2021). L'appareil peut être utilisé par les patients atteints de lésion médullaire de T4 à L5 avec une fonction motrice des membres supérieurs d'au moins 4/5 ou de lésion médullaire de C7 à T3 ASIA D avec fonction motrice des membres supérieurs d'au moins 4/5 (FDA, 2022).



Figure 2 : Exosquelette Ekso® - Illustration tirée <https://exoskeletonreport.com/2015/08/ekso-bionics-company-profile/>

Le Lokomat® est différent des deux exosquelettes précédents car il est utilisé sur tapis roulant et n'implique pas l'activation des muscles du tronc (Xiang, 2021). Cet exosquelette est également connecté à un écran permettant un travail avec biofeedback en réalité virtuelle augmentée. Il est également équipé d'un contrôle et d'une possibilité continue de mesure des fonctions motrices pour ainsi déterminer l'évolution du patient.

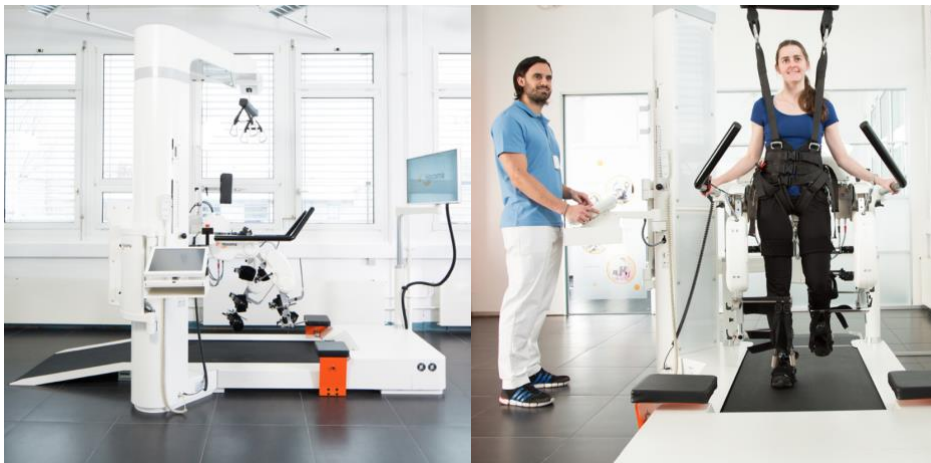


Figure 3 : Photos exosquelette Lokomat® issues fiche technique via <https://www.medimex.fr/wp-content/uploads/2023/02/Fiche-produit-Lokomat-Medimex-08-2022.pdf>

Parmi les articles retenus dans le cadre de ce mémoire, les exosquelettes présentés ci-dessus sont les principaux utilisés dans les différentes études menées. Cependant, les exosquelettes Indego®, Atalante® ou bien même HAL® ont également été testés et sont donc décrits dans l'annexe n°4.

Comme énoncé précédemment, la lésion médullaire est une pathologie complexe, affectant les aspects bio-psycho-sociaux. Le traitement se doit de prendre en compte l'ensemble de ces aspects. Dans le cadre de ce mémoire, nous utiliserons le modèle de la CIF pour évaluer l'impact de l'exosquelette sur les différents domaines.

1.3 La Classification Internationale du Fonctionnement, du handicap et de la santé (CIF)

La Classification Internationale du Fonctionnement, du handicap et de la santé (CIF) a été proposée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) pour être appliquée à différents aspects de la santé (Organization, 2001). Celle-ci constitue le modèle le plus récent et le plus complet permettant de définir le handicap dans le cadre bio-psycho-social. En raison de la prévalence accrue des maladies chroniques non-transmissibles, du vieillissement de la population et des déficiences dues à des maladies infectieuses, les données sur la mortalité et la morbidité ne suffisent pas à elles seules pour ainsi définir l'état de santé général. (Leonardi, 2022) C'est pour cela que ce modèle a été accepté en 2001 par l'OMS. Tout comme les autres classifications de l'OMS, la CIF offre un langage normalisé permettant ainsi d'être la plus pertinente possible (Cuenot, 2017).

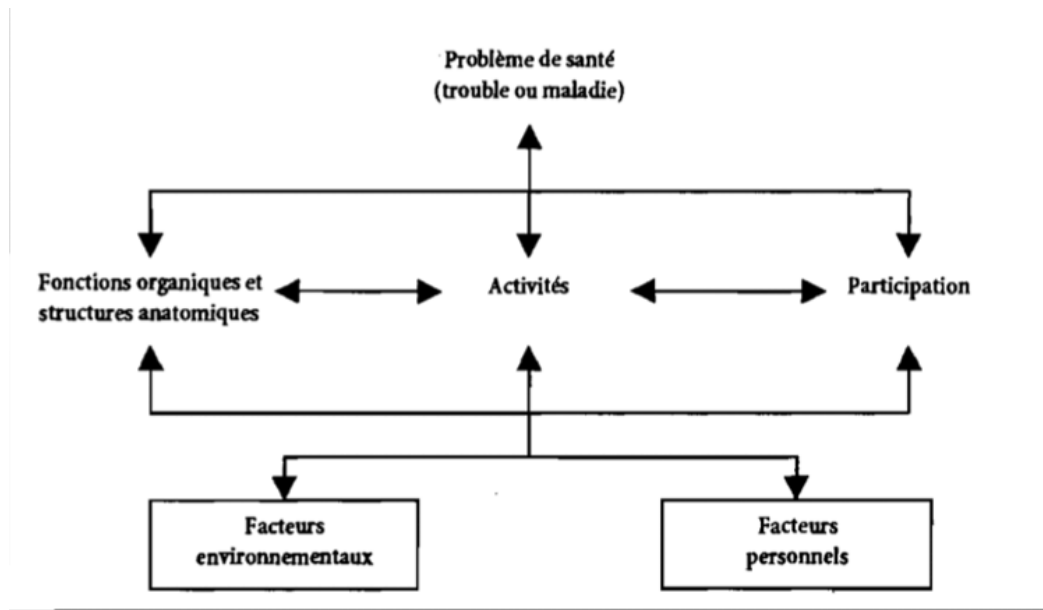


Figure 4 : Interactions entre les composantes de la CIF via (Cuenot, 2017)

La CIF est composée de 5 domaines en interaction :

- **Les fonctions organiques, structures anatomiques et déficiences :**
« elles désignent les fonctions physiologiques des systèmes organiques et les parties du corps comme les organes, les membres et leurs composantes. Les déficiences sont les problèmes des fonctions organiques ou des structures anatomiques, manifestés par une différence ou une perte par rapport à la normale » (Leonardi, 2022).

- **Activités :** font référence à la capacité d'exécution d'une tâche ou d'une action par un individu. Lorsque ce dernier rencontre des difficultés pour mener une activité, il est question de limitations d'activités.

- **Participation :** correspond au fait, pour une personne, de prendre part à une situation de la vie réelle. Lorsqu'une personne rencontre des difficultés pour participer à une situation réelle, il est question de restrictions de participation.

- **Facteurs environnementaux :** signifie l'environnement dans lequel l'individu vit et mène sa vie. Ces facteurs tiennent compte de l'aspect physique, social et attitudinal.

- **Facteurs personnels :** représentent les facteurs contextuels qui ont trait à l'individu tels que la motivation, l'état émotionnel, la condition sociale, les expériences de la vie, l'âge, le sexe etc. Il est à noter qu'ils ne sont pas classifiés

dans la CIF, même s'ils peuvent avoir un impact sur le résultat des différentes interventions (Bleyenheuft, Y. , 2023) (Leonardi, 2022).

Les composantes de la CIF ont chacune une nomenclature organisée en chapitres, qui correspondent au premier niveau de classification. Chaque chapitre est ensuite classifié en catégories. Ce mémoire utilise le modèle de la CIF et cherchera donc à classifier selon ce modèle. Les différentes catégories au sein de cette revue seront ainsi écrites entre crochets (exemple : [b450] : marcher).

1.4 Objectifs du mémoire

(Quiryne & Grilli, 2017) ont réalisé un mémoire, évaluant l'effet des exosquelettes chez le patient blessé médullaire en se concentrant principalement sur les paramètres de marche, les paramètres physiologiques et des questionnaires. Le domaine des déficiences des fonctions organiques et des structures anatomiques a été largement étudié dans ce travail. L'objectif de ce mémoire narratif est d'actualiser les recherches initialement centrées sur le deuxième domaine de la CIF, à savoir les activités, en faisant le choix d'aborder également les aspects psychosociaux liés à cette technologie. Pour cela, ce mémoire s'intéressera aux effets des exosquelettes sur les différents domaines du modèle de la Classification Internationale du Fonctionnement, du handicap et de la santé (CIF) (Leonardi, 2022).

2 Méthode

2.1 Stratégie de recherche

Après avoir déterminé le sujet de ce mémoire, la prospection a été réalisée sur deux moteurs de recherches principaux : « Pubmed », « Embase ». Toutes les recherches supplémentaires ont été effectuées via « Google Scholar ». Afin de permettre une recherche pertinente, différents mots-clefs ont été définis pour élaborer des équations de recherche englobant au maximum les différents axes du sujet. Cette recherche a été réalisée d'octobre à mi-novembre 2023.

Ces différents termes ont été sélectionnés pour ainsi répondre aux critères « PICO », nous permettant par la suite, via des opérateurs booléens « OR » et « AND » de former nos différentes équations de recherche pour les moteurs « Pubmed » et « Embase » (*cf annexe n°4*).

2.2 Critères de sélection des articles

Afin de pouvoir opérer une mise à jour des informations données dans (Quirynen & Grilli, 2017), les articles ont été sélectionnés sur les six dernières années, de 2018 inclus à 2023. Lors de la sélection des articles, différents critères d'inclusions et d'exclusions ont été déterminés pour répondre au mieux à notre sujet principal : déterminer les effets de l'exosquelette sur les domaines de la CIF. Les recherches ont été effectuées par une seule personne durant la sélection des articles.

2.2.1 Participants

Les participants devaient être adultes, âgés entre 18 et 65 ans. Le sexe n'a pas été pris en compte lors de la sélection. Enfin, les personnes devaient être atteintes d'une lésion médullaire complète ou incomplète, quel que soit le niveau de la lésion. Toute autre pathologie neurologique était rejetée.

2.2.2 Intervention

Les articles devaient être liés à une intervention avec un exosquelette du membre inférieur dans sa totalité. Tout exosquelette du membre supérieur a été exclu ainsi que tout exosquelette du membre inférieur ne prenant pas les trois articulations (hanche, genou, cheville) dans son aide à la marche.

2.2.3 Comparaison

Le traitement via exosquelette n'avait pas l'obligation d'être comparé à d'autres traitements.

2.2.4 Outcomes

Pour ce qui est du domaine des fonctions organiques, structures anatomiques et déficiences, nous avons retenu la variable « **fonctions émotionnelles [b152]** », qui a été évaluée grâce au HADS³. De plus, la « **sensation de douleur [b280]** » a été évaluée par différents tests : l'EVA⁴, le NPSI⁵ et le NPRS⁶. Les variables « **fréquence cardiaque [b4100]** » et « **fonctions respiratoires [b440]** » ont également été prises en compte par l'analyse des gaz,

³ Hospital Anxiety and Depression Scale

⁴ Echelle Visuelle Analogique

⁵ Neuropathic Pain Syndrom Inventory

⁶ Numeric Pain Rating Scale

ainsi que la mesure de la fréquence cardiaque (FC), la consommation en oxygène (VO₂), la consommation en dioxyde de carbone (VCO₂), le débit ventilatoire (VE), le volume courant (V_t), le rapport des échanges respiratoires (RER) et la fréquence respiratoire (FR). Par la suite, les « **fonctions de la défécation [b525]** » ainsi que « **les fonctions de l'excrétion urinaire [b610]** » et « **les fonctions urinaires [b620]** » ont été analysées avec l'échelle de Bristol, le Modified Lynch gastro intestinal, le score NBD, le Qualiveen score et le SCI-QOL bowel management difficulties short form instrument. Enfin, « **les sensations relatives aux fonctions des muscles et aux fonctions motrices [b780]** » ont été évaluées par l'échelle modifiée de Ashworth (MAS).

Pour le domaine de l'activité, la variable « **marcher [d450]** » a été mesurée à travers différents tests : 6MWT⁷, 10MWT⁸, TUG⁹. La vitesse de marche et le coût de la marche ont également été pris en compte. De plus, « **changer la position corporelle de base [d410]** » et « **garder la position du corps [d415]** » ont été évaluées respectivement grâce au MFRT¹⁰ et la posturographie SMART. Enfin, « **aller aux toilettes [d530]** », « **S'habiller [d540]** », « **Manger [d550]** », « **Boire [d560]** » sont des variables abordées grâce à la mesure fonctionnelle d'indépendance (FIM).

Le domaine de la participation a été évalué au travers d'interviews et du SF36¹¹ pour pouvoir ainsi mesurer les variables « **Effectuer la routine quotidienne [d230]** » et « **Rencontres [d9205]** ».

Pour les facteurs environnementaux, la variable « **produits et systèmes techniques à usage personnel dans la vie quotidienne [e115]** » a été évaluée par le biais de la FIM. Nous avons également différents rapports et interviews

⁷ 6 minutes walking test = Test de marche de 6 minutes

⁸ 10 meters walking test = Test de marche de 10 mètres

⁹ Timed Up and Go

¹⁰ Modified Functional Reach Test

¹¹ 36-item short form

permettant de traiter les variables « **Produits et systèmes techniques destinés à faciliter la mobilité et le transport à l'intérieur et à l'extérieur [e120]** », « **personnes étrangères [e345]** ».

Finalement, des retours sur le coût du traitement avec exosquelette ont été calculés avec une analyse d'impact budgétaire.

2.2.5 Study Design

Dans le résultat des recherches, une grande variété de types d'articles a été pris en compte. Des études randomisées contrôlées, des revues, des case report... Aucune revue systématique et méta-analyses n'a été retenue.

Critères PICO(S)	En français	En anglais
Population	Paraplégi* Paraparesie Adulte Lésion de la moelle épinière tetraplégi*	Paraplegi* Paraparesis adult Spinal cord injury tetraplegi*
Intervention	Exosquelette	Exoskeleton
Comparator	/	/
Outcomes	<ul style="list-style-type: none"> - HADS, SWLS - EVA, NPSI - FC, TA, V_{O2}, V_{CO2}, VE, RER, Vt - L'échelle de Bristol, le Modified lynch gastro intestinal, le score NBD, le Qualiveen score, le SCI-QOL bowel management difficulties short form instrument - LEMS, MAS - 6MWT, 10MWT, TUG - MFRT, posturographie SMART - FIM, - SF36, PGI-I 	
Study design	Pas de limitation	No limitation

Tableau 1 : Les critères PICO(s)

Critères d'inclusion	Critères d'exclusion
<ul style="list-style-type: none"> - 18 à 66 ans - Lésion complète ou incomplète de la moelle épinière - Homme/Femme - Lésion > 6 mois - Article > 2018 - Exosquelette motorisé pour les membres inférieurs 	<ul style="list-style-type: none"> - Patient atteint AVC ou toute pathologie différente de la lésion médullaire - Articles d'une autre langue que français ou anglais - Date étude < 2018 - Lésion < 6 mois - Orthèses partielles du membre inférieur

Tableau 2 : Critères d'inclusion et d'exclusion

3 Résultats

3.1 Sélection des études

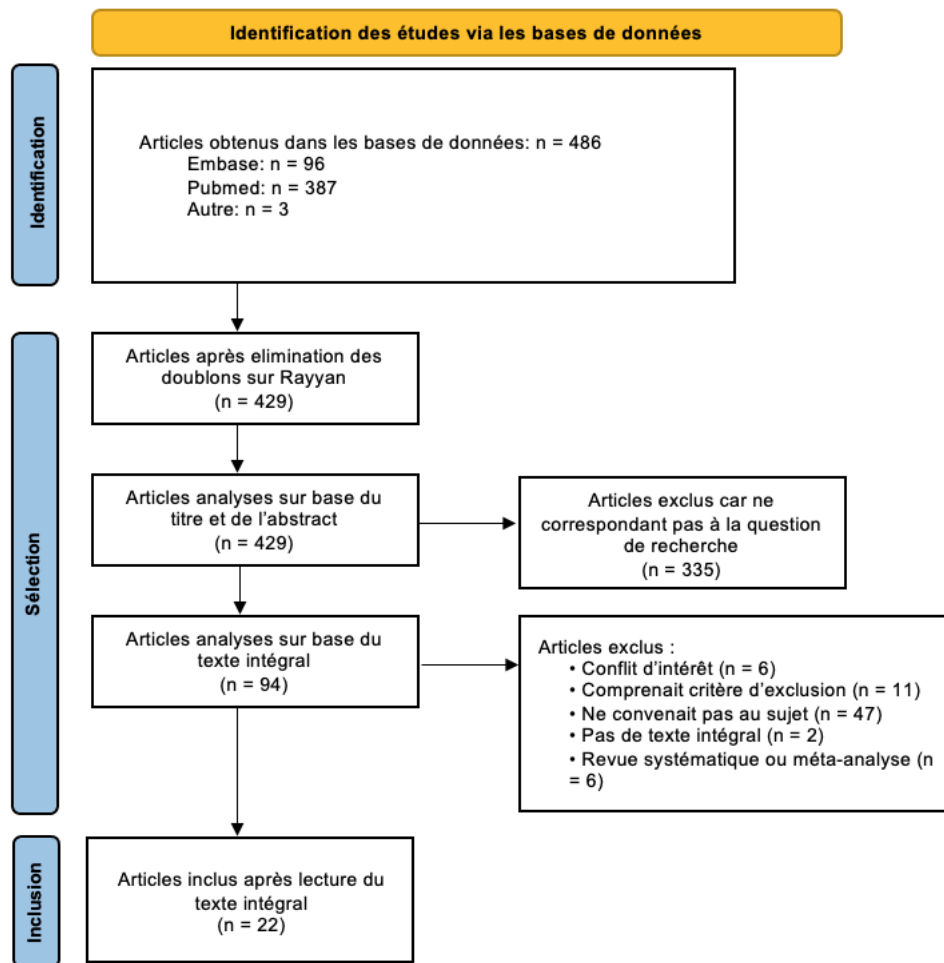


Figure 5 : Organigramme Prisma 2020 - Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* 2021 ;372:n71. doi: 10.1136/bmj.n71

La sélection des articles a été effectuée selon l'organigramme de PRISMA (cf figure 6). Grâce aux équations de recherche, un premier tri a été opéré, rassemblant au total 486 articles. A l'aide de l'application RAYYAN, un deuxième tri a permis d'enlever les doublons existants entre les différents sites de recherches (Pubmed et Embase). 57 articles ont alors été retirés (n = 429). Le troisième tri a ensuite été réalisé par la lecture du titre et de l'abstract, le but étant d'observer si les articles correspondaient au sujet de notre étude. Au final et à la suite de ces tris, 94 articles restaient à lire.

De cette lecture intégrale ont émergé 22 articles, qui seront ainsi utilisés lors de ce mémoire.

3.2 Caractéristiques des études

3.2.1 Caractéristiques des participants

Les caractéristiques détaillées des participants sont reprises dans le tableau 3. Lors de cette revue de littérature réunissant 22 articles, près de 390 participants ont été pris en charge. Pour la plupart, les personnes étaient du sexe masculin ($\pm 60\%$), avec une atteinte complète ou incomplète de la moelle épinière. Dans 19 des 22 études, ces personnes atteintes de ces pathologies étaient catégorisées selon le score ASIA.

Au total, 146 participants étaient ASIA A, 22 étaient ASIA B, 31 étaient ASIA C et 7 ASIA D. De plus, nous avons 90 patients ASIA A ou B et 68 personnes ASIA C ou D. L'âge de la population variait entre 18 et 65 ans.

3.2.2 Caractéristiques des interventions

Les caractéristiques détaillées des interventions sont reprises dans le tableau 4. Dans ces études, différentes marques d'exosquelettes ont été utilisées :

- L'exosquelette Rewalk®, dans 9 des 22 études,
- Le Lokomat® dans 9 études,
- L'Ekso® dans 7 études,
- L'Indego® dans 2 études,
- L'Atalante® dans 1 étude,
- Aider® dans 1 étude

Chaque étude disposait d'un protocole d'entraînement différent, mais on peut noter que chacune d'entre elles utilisait lors de leurs entraînements les exosquelettes et que sur 17 des 22 études, la fréquence d'entraînement était autour de 3 ± 1 séances par semaine. On peut donc en déduire que la fréquence d'entraînement était importante.

Les différentes composantes de la CIF sont retrouvées et évaluées à travers ces études grâce aux différents tests, échelles ou même interviews spécifiés dans les outcomes¹².

3.2.3 Synthèse des résultats

3.2.3.1 Fonctions organiques, structures anatomiques et déficiences

10 études s'intéressaient à la composante fonctions organiques, structures anatomiques et déficiences. L'intérêt se porte plus précisément sur 9 variables.

Dans cette revue de littérature, 3 articles se sont intéressés aux « **fonctions émotionnelles [b152]** » au travers d'études qualitatives telles que (Manns, 2019), donnant l'avis personnel des participants. Celle-ci explique la grande joie qu'ils ont ressenti de pouvoir utiliser cet appareil pour réaliser les activités du quotidien et que cela leur donnait un espoir de remarcher. Ces propos furent également partagés dans (Cahill, 2018) précisant que les participants avaient un sentiment d'accomplissement à la marche.

La santé mentale a également été mesurée sur une population de 21 personnes à l'aide du Hospital Anxiety and Depression Scale (HADS). Une amélioration significative ($p = 0.02$) a été signalée (Van Nes, 2022).

La « sensation de la douleur [b280] » est évoquée dans 5 articles.

Nous constatons un avis général convergent vers l'idée que l'exercice avec exosquelette a un potentiel effet antalgique.

A travers une échelle visuelle analogique (EVA), 2 patients pris en charge ont déclaré une diminution de la douleur lors de l'exercice. Suite à un arrêt du programme, ils ont pu préciser que la douleur revenait dans les 2 mois suivants (Manns, 2019). Une autre étude confirme les dires précédents en utilisant également une échelle analogique visuelle (Van Silfhout, 2019).

¹² cf *supra* partie 2.2.4 (p 9-10-11)

Le Numeric Pain Rating Scale (NPRS) et Neuropathic Pain Symptom Inventory (NPSI) ont permis de montrer une évolution positive de la douleur lors des séances avec exosquelette (Kerdraon, 2021).

Enfin, (Cahill, 2018) explique qu'il a également pu constater une diminution générale de la douleur chez ses patients.

Seule une étude explique qu'à travers l'échelle EVA, aucune diminution significative de la douleur n'a été rapportée entre le début (1.1 ± 1.7) et la fin (0.9 ± 1.6) de la prise en charge (Juszczak, 2018).

Les variables « **fréquence cardiaque [b4100]** » ; et « **fonctions respiratoires [b440]** » ont été abordées dans 4 articles.

Une étude sur 13 personnes a montré qu'à une vitesse de marche de 0.18m/s, 11 d'entre eux avaient déjà atteint un niveau d'intensité à l'exercice modéré à rigoureux comme recommandé dans les guidelines ACSM pour générer des adaptations bénéfiques à la santé. On note une consommation d'O₂ 1.9 fois supérieure à un adulte valide. Nous avons également des différences significatives de la plupart des paramètres cardio-vasculaires (V_{O₂}, V_{CO₂} %FC_{max}, %VO_{2max}, VE) entre la position assise et debout avec une fourchette de 9% à 35%, ainsi que des différences significatives entre la position debout et lors de la marche avec une fourchette de 22% à 52%. Les exceptions sont le V_t qui ne change pas et le RER qui change seulement entre la position debout et la marche (Escalona, 2018).

L'hypothèse exposée d'une amélioration cardiovasculaire par l'exercice d'intensité modérée à soutenue grâce à l'exosquelette dans le précédent article se retrouve dans l'article de (Xiang, 2021), où les valeurs des groupes ayant travaillé avec l'exosquelette étaient significativement supérieures (CVF = $3.8 \pm 1.1L$; FEV₁ = $3.5 \pm 1.0L$) au groupe n'utilisant pas d'exosquelette (CVF = 2.8 ± 1.1 ; FEV₁ = $2.4 \pm 0.6L$).

Lors de séances de marche au Rewalk®, la VO₂ se voit augmenter de manière significative passant de $9.76 \pm 1.23mL/kg.m$ à $12.73 \pm 2.30mL/kg.m$, p = 0.04 (Knezevic, 2021).

Enfin, il est à noter que quel que soit le niveau de lésion (cervicales ou thoraciques), il n'y a pas de différence significative sur la fréquence respiratoire ($p = 0.419$), ni sur la fréquence cardiaque ($p = 0.699$) lors de la marche avec l'exosquelette Ekso® (Van Silfhout, 2019).

Pour ce qui est des « **fonctions de la défécation [b525]** », 7 des études sélectionnées ont mesuré celles-ci.

Il est à noter que les résultats sont en demi-teinte. En effet, nous observons que 3 articles ne déclarent pas de changements significatifs ou peu sur les fonctions intestinales. 80% des personnes ayant utilisé Indego® n'ont pas signalé de changement (Juszczak, 2018). De plus, il ne semble pas y avoir eu de changements significatifs sur la gestion intestinale, le nombre d'accidents d'incontinence (Van Nes, 2022) ainsi que sur le score NBD mis à part sur le score de Bristol ayant une tendance d'amélioration ($p = 0,06$) (Kerdraon, 2021). Dans les 4 autres études, les patients déclarent une amélioration de la fréquence d'évacuation des selles (Chun, 2019) (Cahill, 2018), ainsi que du temps (Gorman, 2021) et de la régularité d'évacuation (Manns, 2019).

Une amélioration de la continence est également à signaler chez 8 des 10 participants (Chun, 2019) avec finalement une normalisation de la texture des selles (Gorman, 2021), venant justifier l'amélioration du score Bristol dans (Kerdraon, 2021).

Enfin, le test SCI-QOL ne semble pas montrer d'améliorations significatives sur la qualité de vie liée à une évolution des fonctions intestinales (Gorman, 2021). Cet élément est contesté par une autre étude qui montre, au contraire, que 7 des 11 participants présentaient également une amélioration supérieure à 10% sur ce test, montrant donc un résultat significatif (Chun, 2019).

Les études abordant « **les fonctions de l'excrétion urinaire [b610]** » et « **les fonctions urinaires [b620]** » ne révèlent que peu de résultats significatifs.

Dans l'étude de (Van Nes, 2022), il est expliqué que la satisfaction de la gestion de la vessie, décrite à travers une échelle de 0 à 5, s'est vu passer de 3 à 4 ($p = 0.01$).

Toutes autres recherches sur la vessie ne révèlent que des changements minimes, avec 10% d'améliorations notifiées par les participants sur la vessie, dont 4 participants déclarant une diminution des problèmes d'incontinence (Juszczak, 2018). Des tests UDS, un journal de miction sur 3 jours (Williams, 2021) ainsi que le questionnaire Qualiveen (Kerdraon, 2021) n'ont ici pas déclaré de changements significatifs (Williams, 2021)

L'une des principales déficiences secondaires à la lésion médullaire est la spasticité (Juszczak, 2018), élément discuté dans la CIF avec la variable « **les sensations relatives aux fonctions des muscles et aux fonctions motrices [b780]** » (Organization, 2001).

Deux des 6 articles traitant la spasticité impliquent des patients ayant déclaré une diminution de leur spasticité grâce à la rééducation avec l'exosquelette (Manns, 2019) (Cahill, 2018). Ces dires sont confirmés avec le MAS¹³, montrant une diminution de la spasticité de 26.7% des participants (Juszczak, 2018).

Chez les patients ayant peu de limitations articulaires, il n'y a pas eu d'améliorations significatives (Van Nes, 2022).

Le niveau d'amélioration de la spasticité grâce à l'exosquelette ne dépend pas du niveau de lésion. En effet, le fait que la lésion soit au niveau des vertèbres cervicales ou thoraciques n'amène pas de différences significatives (Van Silfhout, 2019).

3.2.3.2 Activités

10 études s'intéressent à la composante activités et plus précisément à 7 variables.

La variable « **marcher [d450]** » est généralement la plus grande préoccupation du patient atteint de lésion médullaire (Yıldırım, 2019) et est ici abordée suivant différents aspects de la marche.

Permettant une grande répétition de mouvement et une intensité supérieure à la rééducation conventionnelle, l'exosquelette nous montre une amélioration significative ($p = 0,011$) du WISCI-II (Yıldırım, 2019).

¹³ Modified Ashworth Scale = échelle modifiée d'Ashworth

De cette répétition d'exercices, les exosquelettes ont su améliorer la vitesse de marche des patients (Williams, 2021) en atteignant la vitesse moyenne de 0.26 m/s avec l'exosquelette Rewalk®. Une utilisation de l'exosquelette en société ne semble néanmoins pas possible d'un point de vue sécuritaire, puisque la vitesse dite « pallier » de déambulation en communauté est à 0.44 m/s (Guanziroli, 2019). Les exosquelettes, suivant leurs modèles, semblent avoir des vitesses de marche variées. Une étude montre 3 participants marcher avec l'Ekso® à une vitesse moyenne de 0.4 m/s et 2 participants déambuler à une moyenne de 0.6 m/s avec le Lokomat® (Williams, 2021).

Cette vitesse de déambulation est également évaluée à l'aide du 10MWT, où la vitesse moyenne est de 0.13 m/s \pm 0.01 avec l'exosquelette Atalante® (Kerdraon, 2021) et de 0.37 \pm 0.08 m/s en intérieur ainsi qu'en extérieur avec l'Indego® (Tefertiller, 2018).

La distance ainsi que le nombre de pas ont augmenté par l'utilisation répétée de l'exosquelette (Williams, 2021). Dans une étude utilisant le 6MWT et le Rewalk®, tous les participants ont vu une amélioration significative ($p = 0.22$) de la distance parcourue, avec une augmentation de 94%, passant de 51.06 \pm 51.01 m à 98.98 \pm 42.31 m (Knezevic, 2021). Une autre étude vient confirmer ces observations mais cette fois-ci avec l'Ekso®, en montrant également une augmentation significative ($p < 0.05$) de la distance au 6MWT, passant de 50 \pm 23m à 67 \pm 25m (Chang, 2018).

Le niveau de lésion exerce une influence sur les paramètres de marche : une personne avec une atteinte complète inférieure saura marcher plus loin, plus vite, avec un meilleur contrôle cinétique de l'exosquelette qu'un patient avec une atteinte thoracique (Guanziroli, 2019).

Les variables « **changer la position corporelle de base [d410]** » et « **garder la position du corps [d415]** » font référence à l'équilibre des patients et plus précisément à la capacité à déplacer leur centre de masse et/ou garder leur équilibre et la position de leur corps. Ce changement de position a été mesuré par posturographie et montre une augmentation significative de ces paramètres. Nous

pouvons être plus précis en observant une amélioration du « endpoint excursion (EPE) » ainsi que du « maximal excursion (MXE) ». Pour ce qui est de l'équilibre assis, le test MFRT n'a pas montré de résultats significatifs (Tsai, 2021).

Malgré cela, certains patients rapportent une sensation d'amélioration sur cette stabilité (Cahill, 2018).

Enfin, « **aller aux toilettes [d530]** », « **S'habiller [d540]** », « **Manger [d550]** », « **Boire [d560]** » sont des éléments qui se sont améliorés grâce au port de l'exosquelette, ce qui explique l'augmentation significative de la mesure fonctionnelle d'indépendance ($p = 0.022$) (Yıldırım, 2019).

3.2.3.3 Participation

Les variables « **Effectuer la routine quotidienne [d230]** » et « **Rencontres [d9205]** » ont permis de venir évaluer la qualité de vie des patients. La variable [d230] est à mettre en parallèle des variables observées dans le domaine de l'activité [d530], [d540], [d560].

L'exosquelette, selon différents rapports de patients, semble amener une amélioration de la qualité de vie chez le patient. Le SF36 est amélioré de manière significative suite à des séances avec exosquelette (Van Nes, 2022).

Une autre étude, utilisant le SF36, explique qu'une amélioration significative des fonctions physiques est perçue, sans pour autant avoir un impact significatif sur les fonctions du quotidien (Tsai, 2021).

3.2.3.4 Facteurs environnementaux

Le dernier facteur de la CIF a été traité dans 5 articles, en abordant 3 variables.

La rééducation via exosquelette permet d'augmenter la mesure fonctionnelle d'indépendance (Yıldırım, 2019) et augmenter les capacités à réaliser des activités du quotidien (Cahill, 2018). Ces derniers éléments permettent de traiter la variable

« **produits et systèmes techniques à usage personnel dans la vie quotidienne [e115]** ».

Pour la variable « **Produits et systèmes techniques destinés à faciliter la mobilité et le transport à l'intérieur et à l'extérieur [e120]** », différents rapports et interviews ont montré que les patients ont réussi à marcher en extérieur grâce à ces exosquelettes (Van Dijsseldonk, 2020), marcher aux côtés de leur famille (Manns, 2019).

Le dernier avantage rencontré par la rééducation avec exosquelette et plus précisément grâce aux différentes études autour de cet appareil, est la rencontre de « **personnes étrangères [e345]** », avec la même situation de handicap amenant un sentiment de soutien, influençant ainsi potentiellement le traitement, les patients étant plus motivés (Evans, 2020).

3.2.3.5 Éléments extérieurs à la CIF

L'exosquelette est un objet de prime à bord très coûteux pouvant aller de 77 000\$ à 220 000\$ (*cf annexe n°5*). Une analyse d'impact budgétaire a cependant été réalisée dans différents hôpitaux. Le résultat issu de cette analyse est que celui-ci pourrait permettre aux organismes de santé d'avoir une économie car oui, cette forme de traitement semblerait moins coûteuse que la rééducation dite « standard » de la lésion médullaire (Pinto, 2020).

Tableau 3 : Caractéristiques des études et des participants

Nom des articles	Type d'études	Nombre de participants	Age	Genre des participants	Type de lésion
Bass et al. (2020)	Case report	n = 1	35 ans	1H	ASIA A SCI complète T6
Cahill et al. (2018)	Etude de faisabilité	n = 4	18-65 ans $\bar{x} = 40.7 \pm 9.7$	F : 1 ; H : 3	2 SCI complètes 2 SCI incomplètes
Chang et al. (2018)	Etude pilote randomisée	n = 7	30-66 ans $\bar{x} = 58$ ans	F : 2 ; H : 5	ASIA D ou C > T12 et <C4
Chun et al. (2019)	Étude prospective et observationnelle avec deux mesures répétées	n = 11	18-65 ans	F : 1 ; H : 10	ASIA A ou B <T1 et >T11
Escalona et al. (2018)	Etude transversale	n = 13	26.7-63.1 ans $\bar{x} = 38.1$	F : 5 ; H : 8	ASIA A ou B < C6 >T10
Evans et al. (2020)	Rapport de participants à une RCT	n = 16	19-60ans $\bar{x} = 39.4 \pm 12.4$	F : 1 ; H : 15	ASIA C, D <C4 et >C7
Gorman et al. (2021)	étude simple, randomisée et contrôlée	n = 49	18-65 ans	F : 11 ; H : 38	ASIA A, B, C, D
Guanziroli et al. (2019)	Etude observationnelle non randomisée	n = 15	24-56 ans $\bar{x} = 39.3 \pm 10.3$	F : 4 ; H : 11	ASIA A ou B T4 à L4
Juszczak et al. (2018)	Analyse transversale	n = 45	> 18 ans $\bar{x} = 35 \pm 12.6$	F : 8 ; H : 37	ASIA A, B ou C <T3 et >L2
Kerdraon et al. (2021)	étude prospective, ouverte, multicentrique, non randomisée, non comparative et observationnelle	n = 12	18-50 ans $\bar{x} = 33.9 \pm 9.3$	F : 2 ; H : 10	ASIA A T5 à T12
Knezevic et al. (2021)	Etude de cohorte prospective	n = 5	37-61 ans $\bar{x} = 49 \pm 10$	H : 5	ASIA A ou B T1 à T11
Manns et al. (2019)	Etude qualitative	n = 11	18-65 ans $\bar{x} = 37,5$	F : 4 ; G : 7	SCI
Pinto et al. (2020)	Analyse d'impact budgétaire (BIA)	n = 669 (simulation)			

Tefertiller et al. (2018)	Etude multicentrique	n = 32	18-64 ans $\bar{x} = 37$	F : 5 ; H : 27	ASIA A, B, C T4 à L2
Tsai et al. (2021)	Etude pilote	n = 15	23-61 ans	F : 2 ; H : 13	ASIA A ou B et Personnes saines
Van Herpen et al. (2019)	Case report	n = 2	39 et 47 ans	F : 1 ; H : 1	ASIA A ou B
Van Dijsseldonk et al. (2020)	Etude qualitative	n = 14	24-49 ans $\bar{x} = 29$	F : 7 ; H : 7	ASIA A et 1 B T4 - L1
Van Nes et al. (2022)	Étude prospective pré-post en groupe unique	n = 21	24-57 ans $\bar{x} = 36$	F : 8 ; H : 13	ASIA A ou B T1-L1
Van Silfhout et al. (2019)	Etude pilote	n = 6	26-56 ans $\bar{x} = 41 \pm 10.8$	F : 1 ; H : 5	ASIA A ou B C7 - T11
Williams et al. (2021)	Etude pilote RCT	n = 5	19-65 ans		ASIA A ou B < T10
Xiang et al. (2021)	Etude pilote randomisée et contrôlée en simple aveugle	n = 18	18-65 ans $\bar{x} = 39.8 \pm 12.2$	F : 15 ; H : 3	ASIA A, B, C < T3 > L2
Yıldırım et al. (2019)	RCT	n = 88	$\bar{x}1 = 32$ $\bar{x}2 = 36.5$	F : 17 ; H : 27	ASIA A B C D < T6

Tableau 4 : Table reprenant le type d'exosquelette, le type de traitement (fréquence, durée...) et les paramètres mesurés dans les différentes études

Nom des articles	Exosquelette	Entraînement & expérience	Paramètres évalués
Bass et al. (2020)	Ekso®	Rééducation de 6 à 8 semaines	Fracture via scanner
Cahill et al. (2018)	Ekso®	4 séances de 40 à 50 minutes	Interview semi-structurée « Les ajustements psychologiques liés à l'utilisation de l'exosquelette en ce qui concerne le handicap », « Les avantages physiques, sociaux et psychologiques perçus de l'utilisation d'un exosquelette », « Le rôle des influences externes » et « Un modèle de bien-être pour la santé »
Chang et al. (2018)	Ekso®	Sessions de 60 min, 5x/semaine pendant 3 semaines Thérapie physique pour faciliter l'amélioration de la démarche : étirements, renforcements, entraînements à l'équilibre, position debout, position assise-debout, l'escalier et l'entraînement à la marche.	LEMS Marche (10MWT ; 6MWT ; TUG)
Chun et al. (2019)	Rewalk®	3 à 4 séances par semaine : au total 25 séances en 12 à 14 semaines : enfiler l'appareil, vérifier les signes vitaux, s'asseoir puis se tenir debout, marcher pendant 30 à 90 minutes dans l'appareil	Mobilité, équilibre, fonctions intestinales et vésicales (Modified Lynch Gastro- intestinal, Echelle Bristol, SCI-QOL Bowel Management Difficulties Short Form Instrument) ; spasticité, qualité de vie, composition corporelle
Escalona et al. (2018)	Ekso®	18 séances (2 à 3 séances/semaine) : évalués alors qu'ils étaient assis, debout et marchant avec l'exosquelette au cours d'une seule séance Test position debout pendant 1min en statique, marche de 10m	Borg Physiologie (analyse gaz, FC, V _{O2} , V _{CO2} , VE, Vt, RER, FR)

Evans et al. (2020)	Ekso®	3 séances par semaine pendant 24 semaines	Questions ouvertes avant et 6 mois après rééducation sur sa pathologie, ses attentes puis si cela s'est réalisé et les avantages perçus
Gorman et al. (2021)	Ekso® / Rewalk®	Groupe 1 : 12 semaines, 3 séances/semaine d'exosquelette, puis 12 semaines d'entraînement classique Groupe 2 faisait le schéma inverse 2 premières séances : travail des compétences d'équilibre puis le reste des séances : travail de marche via transfert de poids. Au total : 36 séances	Fonctions intestinales (Bristol Stool Form Scale) Qualité de vie (SCI-QOL)
Guanziroli et al. (2019)	Rewalk®	Séances de 60 minutes 3 séances/semaine pendant au moins 8 semaines	6MWT, 10MWT, STS-time
Juszczak et al. (2018)	Indego®	3 à 4 séances d'entraînement à la marche par semaine pendant une période d'essai de 8 semaines. (au total 26 séances)	Douleur (EVA) Spasticité, fonction vésicale/intestinale (positif ou négatif), Satisfaction with Life Scale (SWLS) Echelle Ashworth modifiée (MAS). Fatigue (Borg)
Kerdraon et al. (2021)	Atalante®	12 fois 1h pendant 3 semaines	Marche 10 mètres sans aide + autres fonctions ambulatoires Fonctions vésicales et intestinales (Bristol ; échelle NBD; PGI-I; Qualiveen score) douleur (NPSI) spasticité
Knezevic et al. (2021)	Rewalk®	60 séances de marche d'une heure (3 séances/semaine)	Physiologie (V_{O_2}) Marche (Vitesse, coût de la marche, 6MWT, 10MWT) Evaluation de l'effort perçu (RPE)
4 x / sem pendant 12 sem			

Manns et al. (2019)	Rewalk®	assis-debout et debout-assis et travail équilibre debout. Participants tenant équilibre debout >30sec avec une béquille ont pu s'entraîner à la marche. Entraînement marche : s'arrêter, tourner et marcher sur différentes surfaces. Séances 60 à 90 min avec 60 min de marche	Interview avant entraînement, post entraînement, post 2 mois sur ses attentes puis si cela s'est réalisé et les avantages perçus
Tefertiller et al. (2018)	Indego	3 entraînements/semaine pendant 8 semaines marche en intérieur et extérieur	10MWT 6MWT TUG
Tsai et al. (2021)	Rewalk®	3-4 entraînements/semaine (4-6h). Au total 7 et 90 séances Enfilage et retrait du dispositif, position assis-debout et debout-assis, équilibre via transfert de poids debout, l'équilibre avec 2 béquilles	Equilibre (posturographie SMART) Positionnement du tronc MFRT QoL (SF-36)
Van Herpen et al. (2019)	Rewalk®	Programme de rééducation de 6 à 8 semaines	Fractures (Scanner) Densitométrie (DEXA-scan)
Van Dijsseldonk et al. (2020)	Rewalk®	Formation de 8 semaines période d'utilisation à domicile et en communauté pendant 2 à 3 semaines	Nombre de pas D-QUEST System Usability Scale
Van Nes et al. (2022)	Rewalk®	24 séances avec exo réparties sur 8 semaines de 1,5h chacune	QoL (SF-36ww) Passive ROM (pROM) Spasticité (Ashworth) Psy (HADS) NBSS & NBDS
Van Silfhout et al. (2019)	Lokomat®	6 séances Marche sur tapis, avec augmentation progressive de la vitesse, à chaque séance :30 minutes de formation.	Vitesse Physiologie (FR, FC, TA) Douleur (EVA) Spasticité (MAS)
Williams et al. (2021)	Ekso® et Lokomat®	36 sessions de 45 min, 3x/sem pendant 12 semaines	Perception fatigue via EMG, vitesse, nombre de pas (Ekso), distance (Lokomat)

			Journal des mictions 3 jours, questionnaire qualiveen
Xiang et al. (2021)	Aider®	16 sessions de 50-60minutes (4jours/semaine pendant 4 semaines) Assis, debout, marcher, monter les escaliers et la pente avec une vitesse maximale mode d'assistance à la marche entre 40 à 60 %	Physiologie (CVF, VEMS, FEF, PEF, maximal voluntary ventilation) 6MWT LEMS
Yıldırım et al. (2019)	Lokomat®	groupe 1 : 16 sessions robot pendant 8 semaines et thérapie conventionnelle 5x/semaine (2x/j) ; groupe 2 : traitement conventionnel : ROM, stretching, renforcement, entraînement à la marche	Walking index for spinal injury II Fonctionnal independence mesure (FIM)

Légende : LEMS = Lower Extremity Motor Score ; 10MWT = Test de marche 10 mètres ; 6MWT = Test de marche de 6 minutes ; TUG = Timed Up and Go ; FC = Fréquence cardiaque ; VO2 = consommation en oxygène ; VCO2 = consommation en dioxyde de carbone ; VE = Ventilation ; Vt = Volume courant ; RER = ; FR = Fréquence respiratoire ; TA = Tension artérielle ; FEF = forced expiratory flow ; PEF = peak expiratory flow = débit expiratoire de pointe ; ROM = Range of motion ; échelle NBD = Neurogenic Bowel Dysfunction ; PGI-I = Patient global impression of Improvement ; SF36 = 36-item short form ; NPSI = Neuropathic Pain Symptom Inventory ; D-Quest = Quebec User Evaluation of Satisfaction with Assistive Technology ; HADS = Hospital Anxiety and Depression Scale ; NBSS = Neurogenic Bladder Symptom Score ; NBDS = Neurogenic Bowel Dysfunction Score ; EVA = Echelle visuelle analogique ; CVF = Capacité vitale fonctionnelle ; VEMS = Volume maximal expiratoire en 1 seconde ; FEF = Forced expiratory flow ; PEF = Débit de pointe expiratoire

Tableau 5 : Extraction des données

Domaine de la CIF	Variable de la CIF	Nom des articles	Moyen d'évaluation	Résultat
Fonctions organiques, structures anatomiques et déficiences	Fonctions émotionnelles [b152]	(Manns, 2019)	Interviews	Grande joie des participants ; gain d'espoir.
		(Cahill, 2018)	Interviews	Grande joie des participants accomplissement à la marche.
		(Van Nes, 2022)	HADS	Une amélioration significative (P=.02).
	Sensation de la douleur [b280]	(Manns, 2019)	EVA	Diminution déclarée par les 2 patients.
		(Van Silfhout, 2019)	EVA	Diminution déclarée.
		(Kerdranon, 2021)	NPRS/NPSI	Diminution de la douleur.
		(Cahill, 2018)	Interview	Diminution de la douleur.
	Fréquence cardiaque [b4100]	(Escalona, 2018)	Appareil d'analyse des gaz	Augmentation significative des paramètres cardio-vasculaires (V _{O2} , V _{CO2} , %FC _{max} , VE) entre position assise et debout [9% à 35%], ainsi que différences significatives entre position debout et marche [22% à 52%].
		(Xiang, 2021)	Moniteur de fréquence cardiaque	Augmentation significative (CVF = 3.8 ±1.1L ; FEV ₁ = 3.5 ±1.0L) en comparaison au groupe n'utilisant pas d'exosquelette CVF = 2.8 ±1.1L ; FEV ₁ = 2.4 ±0.6L).
		(Knezevic, 2021)	Spirométrie	Augmentation significative V _{O2} (de 9.76 ±1.23mL/kg/m à 12.73 ±2.3mL/kg/m ; p = 0.04).
(Van Silfhout, 2019)		Spirométrie	Pas de divergence significative sur la fréquence respiratoire (p = 0.419) et la fréquence cardiaque (p = 0.699) suivant le niveau de lésion cervicale ou thoracique à la marche via Ekso®.	
Fonctions de la défécation [b525]	(Juszczak, 2018)	Moniteur fréquence cardiaque	Pas de divergence significative sur la fréquence respiratoire (p = 0.419) et la fréquence cardiaque (p = 0.699) suivant le niveau de lésion cervicale ou thoracique à la marche via Ekso®.	
	(Van Nes, 2022)	Interviews	80% des patients ayant utilisé Indego® ne déclarent pas de changement.	
	(Kerdranon, 2021)	NBSS & NBDS	Pas de changements significatifs sur la gestion intestinale, nombre d'accidents d'incontinence.	
	(Chun, 2019)	Score NBD Score Bristol Echelle de Bristol Modified Lynch Gastro-intestinal SCI-QOL Bowel Management Difficulties Short Form Instrument	Pas de changement significatif score NBD mais tendance à l'amélioration sur score de Bristol (p = 0.06). Amélioration de la fréquence d'évacuation des selles et de l'échelle de Bristol. Amélioration de la qualité de vie ≥ 10% selon le SCI-QOL.	

Fonctions organiques, structures anatomiques et déficiences		(Gorman, 2021)	Echelle de Bristol SCI-QOL	Amélioration de la fréquence d'évacuation des selles ainsi que du temps d'évacuation. Normalisation de la texture des selles.
		(Manns, 2019)	Interviews	Pas de changement significatif de la qualité de vie selon SCI-QOL. Amélioration de la fréquence, du temps et de la régularité d'évacuation des selles.
	Fonctions de l'excrétion urinaire [b610]	(Van Nes, 2022)	Satisfaction via une échelle visuelle de 0 à 5	Satisfaction sur la gestion de la vessie passant de 3 à 4 (p = 0.01).
		(Juszczak, 2018)	Interviews	10 % des patients ont notifié une amélioration, dont 4 déclarant une diminution de leurs incontinences.
		(Williams, 2021)	Journal des mictions 3jours	Pas de changement significatif.
		(Kerdraon, 2021)	Questionnaire Qualiveen Questionnaire Qualiveen	Pas de changement significatif.
	Fonctions urinaires [b620]	(Manns, 2019)	Interviews	Patients déclarent une diminution de la spasticité.
		(Cahill, 2018)	Interviews	Patients déclarent une diminution de la spasticité.
		(Juszczak, 2018)	Echelle Ashworth modifiée	Diminution de la spasticité sur 26.7 % des patients.
		(Van Nes, 2022)	Echelle Ashworth modifiée	Chez les patients ayant peu de limitations articulaires, il n'y a pas eu d'améliorations significatives.
		(Van Silfhout, 2019)	Echelle Ashworth modifiée	Le niveau d'amélioration de la spasticité ne dépend pas du niveau de lésion.
	Sensations relatives aux fonctions des muscles et aux fonctions motrices [b780]	(Yıldırım, 2019)	WISCI-II	Amélioration significative (p = 0.011) du WISCI-II.
(Williams, 2021)		Vitesse sélectionnée sur Lokomat® ou vitesse calculée via 10MWT sur Ekso®	Amélioration de la vitesse et de la distance de marche.	
(Guanziroli, 2019)		6MWT, 10MWT, STS-Time	Vitesse moyenne atteinte de 0.26 m/s, vitesse inférieure à la donnée minimale à avoir en société (0.44 m/s). Le niveau de lésion influence vitesse de marche, distance et contrôle moteur de l'exosquelette.	
(Kerdraon, 2021)		10MWT	Vitesse moyenne de 0.13 ±0.01 m/s.	
(Knezevic, 2021)		6MWT	Amélioration significative (p = 0.023) de la distance parcourue, avec moyenne d'augmentation de 94 %, passant de 51.06 ±51.01 m à 98.98 ±42.31 m.	
(Tefertiller, 2018)		10MWT 6MWT	Vitesse moyenne de marche en extérieur et intérieur de 0.37 ±0.08 m/s. Amélioration significative entre le milieu et la fin des entraînements (p < 0.05).	
Activités	Marcher [d450]	(Yıldırım, 2019)	WISCI-II	Amélioration significative (p = 0.011) du WISCI-II.
		(Williams, 2021)	Vitesse sélectionnée sur Lokomat® ou vitesse calculée via 10MWT sur Ekso®	Amélioration de la vitesse et de la distance de marche.
		(Guanziroli, 2019)	6MWT, 10MWT, STS-Time	Vitesse moyenne atteinte de 0.26 m/s, vitesse inférieure à la donnée minimale à avoir en société (0.44 m/s). Le niveau de lésion influence vitesse de marche, distance et contrôle moteur de l'exosquelette.
		(Kerdraon, 2021)	10MWT	Vitesse moyenne de 0.13 ±0.01 m/s.
		(Knezevic, 2021)	6MWT	Amélioration significative (p = 0.023) de la distance parcourue, avec moyenne d'augmentation de 94 %, passant de 51.06 ±51.01 m à 98.98 ±42.31 m.
		(Tefertiller, 2018)	10MWT 6MWT	Vitesse moyenne de marche en extérieur et intérieur de 0.37 ±0.08 m/s. Amélioration significative entre le milieu et la fin des entraînements (p < 0.05).

Activités		(Chang, 2018)	6MWT	Augmentation de la distance passant de 92 m à 107.5 m de moyenne. Augmentation significative de la distance au 6MWT, passant de 50 ±23 m à 67 ±25 m.
	Changer la position corporelle de base [d410]	(Tsai, 2021)	EPE MXE MFRT	Amélioration significative EPE et MXE, MFRT : pas de résultat significatif.
	Garder la position du corps [d415]	(Cahill, 2018)	Interviews	Sensation d'amélioration.
	Aller aux toilettes [d530] S'habiller [d540] Boire [d560]	(Yıldırım, 2019)	FIM	Augmentation significative de la mesure fonctionnelle d'indépendance (p = 0.022).
Participation	Effectuer la routine quotidienne [d230] Rencontres [d9205]	(Van Nes, 2022)	SF36	Amélioration significative qualité de vie suite à des séances avec exosquelette.
		(Tsai, 2021)	SF36	Amélioration significative des fonctions physiques, sans pour autant avoir un impact significatif sur les fonctions du quotidien.
		(Juszczak, 2018)	SWLS	Un programme de rééducation via exosquelette n'entraîne pas d'amélioration de la qualité de vie (le score étant passé de 20.4 ±8.0 à 21.7.6 ±7.6 (p > 0.05)).
Facteurs environnementaux	Produits et systèmes techniques à usage personnel dans la vie quotidienne [e115]	(Yıldırım, 2019)	FIM	Augmentation significative de la mesure fonctionnelle d'indépendance (p = 0.022).
		(Cahill, 2018)	Interviews	Sensation des patients d'une augmentation des capacités à réaliser des activités du quotidien.
	Produits et systèmes techniques destinés à faciliter la mobilité et le transport à l'intérieur et à l'extérieur [e120]	(Van Dijsseldonk, 2020)	Interviews	Patients ont pu se déplacer, marcher en extérieur avec l'exosquelette.
		(Manns, 2019)	Interviews	Patients ont pu se déplacer, marcher en extérieur avec l'exosquelette, marcher au côté de leur famille.
Personnes étrangères [e345]	(Evans, 2020)	Etude qualitative	Sentiment de soutien inter-participants à l'expérience.	
Eléments sortant de la CIF	Coût	(Pinto, 2020)	Analyse de l'impact budgétaire	Traitement avec exosquelette moins coûteux que la rééducation conventionnelle.

Tableau 6 : Synthèse des résultats selon le modèle de la CIF

Nom de l'article	Fonctions organiques, structures anatomiques et déficiences	Activités	Participation	Facteurs environnementaux
Cahill et al. (2018)	X	X		X
Chang et al. (2018)	X	X		
Chun et al. (2019)	X			
Escalona et al. (2018)	X			
Evans et al. (2020)				X
Gorman et al. (2021)	X			
Guanziroli et al. (2019)		X		
Juszczak et al. (2018)	X		X	
Kerdraon et al. (2021)	X	X		
Knezevic et al. (2021)		X		
Manns et al. (2019)	X			X
Tefertiller (2018)		X		
Tsai et al. (2021)		X	X	
Van Dijsseldonk et al. (2020)				X
Van Nes et al. (2022)	X		X	
Van Silfhout et al. (2019)		X		
Williams et al. (2021)		X		
Xiang et al. (2021)	X			
Yıldırım et al. (2019)		X		X

4 Discussion

4.1 Rappels des objectifs de la revue narrative

Les objectifs de cette revue narrative étaient premièrement d'actualiser les recherches du mémoire de (Quirynen & Grilli, 2017), initialement centrées sur le deuxième domaine de la CIF, les activités. Le second objectif était d'aborder les aspects psychosociaux liés à cette technologie chez l'adulte atteint de lésion médullaire à travers le modèle de la CIF.

4.2 Discussion

Lors de la comparaison avec le mémoire de (Quirynen & Grilli, 2017), il s'avère que la plupart des composantes analysées n'ont pas montré d'évolutions significatives. De ces deux mémoires, il peut être déduit que l'exosquelette améliore les différents aspects bio-psycho-sociaux du patient.

La variable « **Marcher [d450]** » et plus précisément la vitesse de la marche, dans cet ancien mémoire, était en moyenne de 0.4 m/s avec le Rewalk®. Si l'on revient sur nos résultats, nous observons en effet des similitudes sur des exosquelettes tel que l'Ekso® à 0.4 m/s (Williams, 2021), l'Indego® à 0.37m/s (Tefertiller, 2018). L'étude trouvée sur le Rewalk® montre une vitesse moyenne des participants à 0.26m/s ce qui démontre donc une vitesse inférieure à la donnée de l'ancien mémoire.

Il est à noter qu'une étude avec le Lokomat® a observé une vitesse moyenne de 0.6m/s pour 2 patients (Williams, 2021).

L'Atalante, enfin, semble avoir une vitesse bien inférieure (0.13m/s) (Kerdraon, 2021). Il faut toutefois avoir en tête que l'expérience a été réalisée pendant un court délai, permettant de supposer un temps d'apprentissage insuffisant pour les patients. Ce large panel de vitesse nous laisse la possibilité d'imaginer, à l'avenir, une augmentation de la rapidité de certains modèles d'exosquelettes. Par la suite, on peut également imaginer la possibilité de déambuler en société en toute sécurité. Il

est à noter que ces variations de vitesse ainsi que la cinématique de la marche pouvaient, dans le mémoire de (Quirynen & Grilli, 2017), être liées au niveau de lésion des patients, ce qui est toujours le cas ici (Xiang, 2021), (Guanziroli, 2019). Ce dernier élément influence donc également les performances du 10MWT et la distance du 6MWT (Knezevic, 2021).

L'amélioration notable observée sur ces exosquelettes est la prise en compte des patients atteints de lésions au niveau des vertèbres cervicales dans les études, avec les exosquelettes Ekso® et Lokomat®. Ce progrès permet donc une prise en charge chez des patients tétraplégiques, permettent ainsi une marche de ces derniers (Van Silfhout, 2019) ainsi qu'une limitation des troubles secondaires (*cf infra*).

Cette progression à la marche, accompagnée d'une augmentation de l'équilibre [d410], [d415] entraîne une augmentation des activités du quotidien [d530], [d540], [d560], déterminée grâce à l'augmentation du FIM.

Nous voyons ici des interactions possibles entre les différentes variables de la CIF. Cet évènement est également observable entre le domaine de la participation et des activités.

Lors de nos recherches, nous avons vu que l'amélioration de la qualité de vie liée à une augmentation de l'activité était significative. Cela a pu être confirmé par une augmentation de la SF36 (Van Nes, 2022)(Tsai, 2021).

Des résultats semblables avec le mémoire (Quirynen & Grilli, 2017) ont pu être observés autour de la FC et de la V_{O_2} . Nous avons repris ces recherches avec les variables « **fréquence cardiaque [b4100]** » et « **fonctions respiratoires [b440]** ». Il a été remarqué une consommation plus importante de V_{O_2} (Knezevic, 2021) ainsi qu'une plus grande FC à l'exercice (Escalona, 2018).

Nous avons également une augmentation de bons nombres de fonctions cardio-respiratoires et cardio-vasculaires détaillés dans les résultats telles que la V_{CO_2} , la VE (Escalona, 2018), la CVF, la FEV_1 (Xiang, 2021).

De par ces résultats, nous voyons ici une possibilité de pouvoir venir limiter les effets secondaires de la lésion médullaire. En effet, ces efforts d'intensité modérée

à rigoureusement recommandés dans les guidelines ACSM, pourraient entraîner des adaptations bénéfiques à la santé.

Nous avons pu aborder un large échantillon d'éléments physiques et physiologiques, nous permettant de montrer de manière claire une diminution des douleurs des patients et de leur spasticité.

D'autres évolutions, semblaient moins significatives dans les études, comme le système urinaire et gastro-intestinal. Nous savons cependant que l'activité physique a une action positive sur ces différents systèmes (Peters, 2001). Nous pouvons donc supposer que cette divergence entre ces observations peut être liée à la taille des échantillons de population, trop faibles pour pouvoir amener des conclusions formelles.

Le deuxième objectif de ce mémoire, était de classer ce type de traitement d'après le modèle de la CIF, en tenant compte des aspects bio-psycho-sociaux.

S'agissant des fonctions organiques, structures anatomiques et déficiences, nous avons pu travailler sur la variable des « **fonctions émotionnelles [b152]** ».

Le traitement a eu des effets positifs sur celles-ci, ce qui est un aspect important à prendre en compte. En effet, nous nous intéressons désormais aux aspects psychologiques car le patient a un rôle à part entière dans le traitement et plus particulièrement dans son adhésion à celui-ci. L'exosquelette, ici, en amenant un « gain d'espoir » (Manns, 2019) et une satisfaction au patient, entraînera une augmentation de leur motivation intrinsèque, terme élaboré dans les travaux de Deci.

Cette motivation entraîne un « cercle vertueux », impliquant un plus grand effort des patients (Pelletier, 2001) et engendrant une augmentation des performances.

Enfin, l'exosquelette permettrait de réinsérer les blessés médullaires comme acteurs dans la société et ainsi augmenter leur autonomie. Ces éléments ont été observés dans les facteurs environnementaux de la CIF et plus précisément les variables [e115], [e120] et [e345]. Grâce à cette technologie, les patients pourraient

aider aux tâches de la vie quotidienne, effectuer des déplacements en extérieur en famille et faire des rencontres.

Dans tous les articles traités durant ce mémoire, aucune chute n'a été recensée. Pour autant, 3 cas de fractures ont pu être répertoriés. Ces dernières étaient généralement dues à un manque de densité osseuse ainsi qu'une surcharge pondérale (Bass, 2020). Les exosquelettes ont désormais des conditions d'utilisation, dont un T-score < -3.5 ainsi qu'un poids maximum, variant selon les exosquelettes (Van Herpen, 2019).

5 Limitations et points forts

5.1 Limitations

- La plupart des études ont un faible échantillon de population
- Les personnes ont des atteintes très variées suivant le niveau de lésion
- Tous les patients ne sont pas répertoriés selon le score ASIA
- Une seule RCT

5.2 Points forts

- La méthodologie utilisée lors de cette revue narrative a été appliquée selon les recommandations PRISMA
- Cette revue narrative a permis d'avoir une vision globale du traitement, tenant compte des aspects bio-psycho-sociaux
- L'utilisation de la CIF permet ainsi une communication normalisée sur ce traitement avec exosquelette chez les patients blessés médullaires
- La revue narrative permet de cibler les éléments phares à traiter à l'avenir

6 Conclusion

Grâce à l'émergence de nouvelles technologies ces dernières décennies, s'est alors dessinée une perspective inédite des traitements médicaux. Bien qu'encore récents, les exosquelettes connaissent une ascension fulgurante dans le domaine médical et semblent être un partenaire idéal pour les personnes atteintes de lésions médullaires au vu des différents résultats observés lors de ce mémoire narratif.

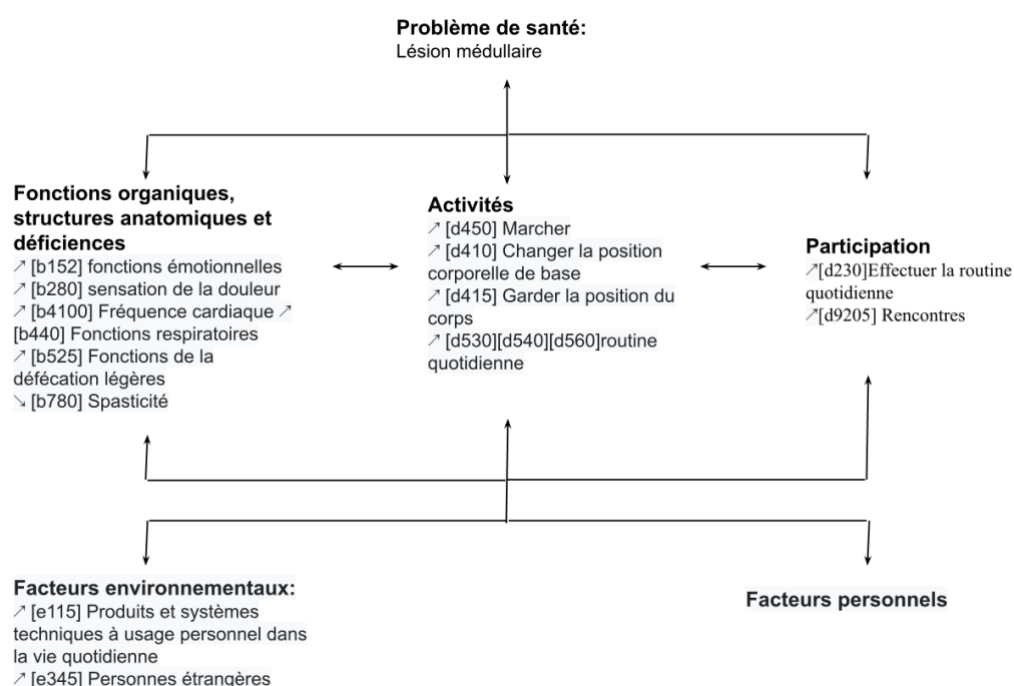


Figure 6 : Résumé des améliorations sur les différents domaines de la CIF

Cependant, nous nous devons de prendre des précautions avec nos recherches. Comme expliqué dans les limitations du mémoire (*cf supra*, 5.1), les études sont pour la plupart réalisées sur de petites populations. Ces résultats, afin d'avoir un poids plus conséquent dans le domaine scientifique, se doivent d'être poursuivis par le biais d'études effectuées sur de plus grandes populations, en études randomisées contrôlées.

Nous devrions rapidement voir des recherches de plus grande ampleur, au vu des financements qui ne cessent d'augmenter et des centres détenant un appareil exosquelette qui ne cessent de se multiplier. Récemment, l'entreprise Wandercraft,

société française produisant les exosquelettes Atalante®, a reçu des financements à hauteur de 25 millions d'euros par la commission européenne ainsi que l'European Investment Bank pour pouvoir continuer à développer ces exosquelettes.

L'exosquelette à usage personnel se développe également et se démocratise de plus en plus aux USA, où les Centers for medicare & medicaid services (MCS) ont révisé, en avril 2024, leurs frais pour les équipements médicaux pour ainsi augmenter les taux de remboursement des patients. L'entreprise Wandercraft a également récemment annoncé une sortie prochaine d'un exosquelette Atalante® à usage personnel.

En Belgique, l'exosquelette apparaît aussi petit à petit dans des centres de rééducation comme par exemple à l'hôpital de Libramont ou encore au sein d'association comme l'association To Walk Again spécialisée dans la recherche, afin de permettre à des personnes en situation de handicap de récupérer leur fonction de la marche.

7 Bibliographie

- Anam, K. &-J. (2012). Active Exoskeleton Control Systems : State of the Art. *Procedia Engineering*, 41, 988-994. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.273>.
- Bass, A. M.-L. (2020). Incidental bilateral calcaneal fractures following overground walking with a wearable robotic exoskeleton in a wheelchair user with a chronic spinal cord injury : is zero risk possible ? . *Osteoporosis International*, 31(5), 1007-1011. <https://doi.org/10.1007>.
- Bissolotti, L. N. (2018). Domestic Use of the Exoskeleton for Gait Training in Patients with Spinal Cord Injuries : Ethical Dilemmas in Clinical Practice. *Frontiers In Neuroscience*, 12. <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00078>.
- Bleyenheuft, Y. (2023). Evaluation fonctionnelle du patient (cours magistral). (Université Catholique de Louvain 2023).
- Burns, S. P. (2021). International standards for neurological classification of spinal cord injury. *Topics In Spinal Cord Injury Rehabilitation*, 27(2), 1-22.
- Cahill, A. G. (2018). Gym-based exoskeleton walking : A preliminary exploration of non-ambulatory end-user perspectives. *Disability And Health Journal*, 11(3), 478-485. <https://doi.org/10.1016/j.dhjo.2018.01.004>.
- Chang, S. A. (2018). Exoskeleton-assisted gait training to improve gait in individuals with spinal cord injury : a pilot randomized study. . *Pilot And Feasibility Studies*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s40814-018-0247-y>.
- Chun, A. A. (2019). Changes in bowel function following exoskeletal-assisted walking in persons with spinal cord injury : an observational pilot study. *Spinal Cord*, 58(4), 459-466. <https://doi.org/10.1038/s41393-019-0392-z>.
- Cuenot, M. (2017). *Manuel d'utilisation de la CIF en pratique clinique*. Presses de l'EHESP.
- Désert, J.-F. (2008). *Déficiences motrices et situations de handicaps, aspects sociaux, psychologiques, techniques, sociaux et législatifs*. Récupéré sur (APF 2002): <https://paratetra.apf.asso.fr>
- Escalona, M. J.-L. (2018). Cardiorespiratory demand and rate of perceived exertion during overground walking with a robotic exoskeleton in long-term manual wheelchair users with chronic spinal cord injury : A cross-sectional study.

- Annals Of Physical And Rehabilitation Medicine, 61(4), 215-223.
<https://doi.org/10.1016/j.rehab.2017.12.008>.
- Evans, R. W. (2020). “I was like intoxicated with this positivity” : the politics of hope amongst participants in a trial of a novel spinal cord injury rehabilitation technology in South Africa. *Disability And Rehabilitation. Assistive Technology*, 17(6), 712-718.
<https://doi.org/10.1080/17483107.2020.1815086>.
- FDA, F. &. (2022, Juin). *accessdata.FDA.gouv*. Récupéré sur https://www.accessdata.fda.gov/cdrh_docs/pdf22/K220988.pdf
- Gorman, P. H. (2021). The Effect of Exoskeletal-Assisted Walking on Spinal Cord Injury Bowel Function : Results from a Randomized Trial and Comparison to Other Physical Interventions. *Journal Of Clinical Medicine*, 10(5), 964.
<https://doi.org/10.3390/jcm10050964>.
- Guanziroli, E. C. (2019). Assistive powered exoskeleton for complete spinal cord injury: correlations between walking ability and exoskeleton control. *European journal of physical and rehabilitation medicine*, 55(2), 209–216.
<https://doi.org/10.23736/S1973-9087.18.05308-X>.
- Gurriet, T. F. (2018, Mai). Towards restoring locomotion for paraplegics: Realizing dynamically stable walking on exoskeletons. *IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)* (pp. 2804-2811).
- Hanson, P. (2021, Hanson, P. Lésion médullaire : paraplégie – tétraplégie (cours magistral). Université Catholique de Louvain). Lésion médullaire : paraplégie – tétraplégie (cours magistral). . Université Catholique de Louvain.
- Hong, E. G. (2020). Mobility Skills With Exoskeletal-Assisted Walking in Persons With SCI : Results From a Three Center Randomized Clinical. *Frontiers In Robotics And AI*, 7. <https://doi.org/10.3389/frobt.2020.00093>.
- Jansen, O. G.-K. (2018). Hybrid Assistive Limb Exoskeleton HAL in the Rehabilitation of Chronic Spinal Cord Injury : Proof of Concept ; the Results in 21 Patients. *World Neurosurgery*, 110, e73-e78.
<https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.10.080>.
- Juszczak, M. G. (2018). Examining the Effects of a Powered Exoskeleton on Quality of Life and Secondary Impairments in People Living With Spinal

- Cord Injury. Topics in spinal cord injury rehabilitation, 24(4),336-342. <https://doi.org/10.1310/sci17-00055>.
- Kerdraon, J. P. (2021). Evaluation of safety and performance of the self balancing walking system Atalante in patients with complete motor spinal cord injury. Spinal Cord Series And Cases, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41394-021-00432-3> .
- Khorasanizadeh, M. Y.-M. (2019). Neurological recovery following traumatic spinal cord injury : a systematic review and meta-analysis. Journal Of Neurosurgery. Spine (Online), 30(5), 683 699. <https://doi.org/10.3171/2018.10.spine18802>.
- Kim, H. S. (2021). Effects of Wearable Powered Exoskeletal Training on Functional Mobility, Physiological Health and Quality of Life in Non-ambulatory Spinal Cord Injury Patients. Journal Of Korean Medical Science, 36(12). <https://doi.org/10.3346/jkms.2021.36.e80>.
- Knezevic, S. A. (2021). Oxygen Uptake During Exoskeletal-Assisted Walking in Persons With Paraplegia. Archives Of Physical Medicine And Rehabilitation (Print), 102(2), 185-195. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2020.08.025>.
- Leonardi, M. L. (2022). 20 Years of ICF—International Classification of Functioning, Disability and Health : Uses and Applications around the World. International Journal Of Environmental Research And Public Health (Online), 19(18), 11321. <https://doi.org/10.3390/ijerph191811321>.
- Manns, P. J. (2019). Perspectives of people with spinal cord injury learning to walk using a powered exoskeleton. Journal Of Neuroengineering And Rehabilitation, 16(1). <https://doi.org/10.1186/s12984-019-0565-1>.
- Marie Cuenot, O. R.-N. (2017, Avril). *Manuel d'utilisation de la CIF en pratique clinique*. Presses de l'EHESP.
- Morand, A. d. (2010). *Pratique de la rééducation neurologique*. Elsevier Masson.
- Organization, W. H. (2001). *Classification internationale du fonctionnement, du handicap et de la santé*. . OMS.
- Pelletier, L. F. (2001). Associations among Perceived autonomy support, Forms of Self-Regulation, and Persistence : A Prospective study. Motivation And Emotion, 25(4), 279-306. <https://doi.org/10.1023/a:1014805132406>.

- Peters, H. P.-H. (2001). Potential benefits and hazards of physical activity and exercise on the gastrointestinal tract. *Gut*, 48(3), 435-439.
- Pinto, D. G.-F. (2020). Budget impact analysis of robotic exoskeleton use for locomotor training following spinal cord injury in four SCI Model Systems. *Journal Of Neuroengineering And Rehabilitation*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s12984-019-0639-0>.
- Quirynen, A., & Grilli, W. (2017). Intérêts de l'utilisation de l'exosquelette motorisé pour les membres inférieurs dans la rééducation des blessés médullaires : revue de la littérature. *Faculté des sciences de la motricité, Université catholique de Louvain*, 2017. Prom. : Loiseau, Olivier. <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:8717>.
- Rewalk. (s.d.). Récupéré sur <https://golifeward.com/products/rewalkpersonal-exoskeleton/>
- Rodríguez-Fernández, A. L.-P.-L. (2021). Systematic review on wearable lower-limb exoskeletons for gait training in neuromuscular impairments. *Journal Of Neuroengineering And Rehabilitation*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s12984-021-00815-5>.
- Shi, D. Z. (2019). A Review on Lower Limb Rehabilitation Exoskeleton Robots. . *Chinese Journal Of Mechanical Engineering*, 32(1). <https://doi.org/10.1186/s10033-019-0389-8>.
- Tefertiller, C. H. (2018). Initial Outcomes from a Multicenter Study Utilizing the Indego Powered Exoskeleton in Spinal Cord Injury. *Topics In Spinal Cord Injury Rehabilitation*, 24(1), 78-85. <https://doi.org/10.1310/sci17-00014>.
- Tsai, C. Y. (2021). Exoskeletal-assisted walking may improve seated balance in persons with chronic spinal cord injury: a pilot study. *Spinal cord series and cases*, 7(1), 20. <https://doi.org/10.1038/s41394-021-00384-8>.
- Van Dijsseldonk, R. B. (2020). Exoskeleton home and community use in people with complete spinal cord injury. . *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72397-6>.
- Van Herpen, F. H. (2019). Case Report : Description of two fractures during the use of a powered exoskeleton. . *Spinal Cord Series And Cases*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/s41394-019-0244-2>.

- Van Nes, I. J. (2022). Improvement of quality of life after 2-month exoskeleton training in patients with chronic spinal cord injury. *The .*
- Van Silfhout, L. V. (2019). Highest ambulatory speed using Lokomat gait training for individuals with a motor-complete spinal cord injury : a clinical pilot study. *Acta Neurochirurgica*, 162(4), 951-956. <https://doi.org/10.1007/s00701-019-04189-5>.
- WHO., W. H. (2013, Novembre 19). *Lésions de la moelle épinière*. Récupéré sur <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/spinal-cord-injury>
- Williams, A. M. (2021). Exoskeleton gait training to improve lower urinary tract function in people with motor-complete spinal cord injury: A randomized pilot trial. *Journal of rehabilitation medicine*, 53(8), jrm00222. <https://doi.org/10.2340/16501977-2864>.
- Xiang, X. Z. (2021). Exoskeleton- assisted walking improves pulmonary function and walking parameters among individuals with spinal cord injury : a randomized controlled pilot study. *Journal Of Neuroengineering And Rehabilitation*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s12984-021- 00880-w>.
- Yıldırım, M. A. (2019). Early term effects of robotic assisted gait training on ambulation and functional capacity in patients with spinal cord injury. *Turkish journal of medical sciences*, 49(3), 838-843. <https://doi.org/10.3906/sag-1809-7>.

8 Annexes

Annexe n°1 : Atteinte respiratoire et niveau lésionnel

Handicap	Niveau de lésion	Atteinte motrice		Réflexes		Atteinte système autonome	
Tétraplégie	C1					Diaphragme	Intubation nécessaire
	C2	Flexion nuque					
	C3	Inclinaisons lat nuque					
	C4	Elévation épaules					
	C5	Abduction bras	Biceps	Bicipital	Stylo-radial		
	C6						
	C7		Triceps	Tricipital			
	C8	Extension pouces					
	T1 à T10	Intercostaux				Respiration	T1 à T4 innervation sympathique cardiaque
	T6 à T12	Abdominaux					
	L1	Flexion de hanches					
	L2	Extension genoux					

Paraplégie	L3				T10 à S2 : Erection
	L4	Flexion dorsale chevilles + extenseur orteils + fibulaires			
	L5	Flexion plantaire pieds			
	S1	Flexion genoux	Achilléen		
	S2	Flexion de hanches		Femme : insensibilité organes génitaux externes et vagin	
	S3				

Annexe n°2 : Activités possibles suivant le niveau de lésion (Morand, 2010)

Niveau de lésion	Déplacement possible
≥ C4	Dépendance complète : <ul style="list-style-type: none"> - fauteuil électrique avec commande mentonnière - utilisation de robotique, domotique, informatique - aucune possibilité fonctionnelle
C5	Dépendance complète : <ul style="list-style-type: none"> - fauteuil électrique avec joystick simple ou fourche chez le patient de niveau C5 - utilisation d'informatique, domotique - préhension possible bimanuelle - si force biceps suffisante, toilette possible
C6	Dépendance partielle : <ul style="list-style-type: none"> - fauteuil roulant électrique en extérieur et manuel en intérieur avec aide-roue - difficulté pour auto-sondage
C7/C8/D1	Dépendance partielle : <ul style="list-style-type: none"> - transferts possibles - toilette et habillage du haut possible, du bas possible mais difficiles - alimentation possible - déplacement en fauteuil roulant manuel
T6 à T10	Déambulation très difficile voire impossible même avec corset et gros appareillage membres inférieurs
T10 à L1	Déambulation à quatre temps avec des orthèses crurojambières articulées
L2 à L3	Déambulation se fait à deux ou quatre temps et appareillage constitué de deux releveurs
L4	Absence verrouillage hanche par le moyen fessier impose utilisation d'une paire de cannes
L5	Marche possible avec chaussures montantes assurant stabilité latérale

Annexe n°3 : Score ASIA

Cotation fonction musculaire

- 0 = paralysie totale
- 1 = contraction visible ou palpable
- 2 = mouvement actif dans son amplitude complète, sans pesanteur
- 3 = mouvement actif dans son amplitude complète, contre pesanteur
- 4 = mouvement actif dans son amplitude complète, contre résistance
- 5 = mouvement normal (dans son amplitude complète, contre résistance complète)
- NT = non testable (immobilisation, douleur, amputation, hypertonie sur > 50% amplitude du mouvement)

Cotation sensitive

- 0 = absente
- 1 = diminuée (appreciation partielle ou aténuée, incluant hyperesthésie)
- 2 = normale
- NT = non testable

Fonctions musculaires non clés (facultatif)

Peut être utilisé pour attribuer un niveau moteur et différencier AIS B vs C

Mouvement	Racine
Epaule : flexion, extension, abduction, adduction, rotation interne et externe	C5
Coude : flexion	C6
Poignet : flexion	C6
Doigts : flexion, extension	C7
Pouce : flexion, extension, abduction dans le plan	C8
Doigts : flexion MCP	C8
Pouce : opposition, adduction et abduction dans le plan perpendiculaire à la paume	C8
Doigts : abduction de l'index	T1
Hanche : adduction	L2
Hanche : rotation externe	L3
Hanche : extension, abduction, rotation interne	L4
Genou : flexion	L4
Chevilles : inversion et éversion	L5
Oreilles : extension MTP et IP	L5
Hallux et Oreille : flexion et abduction	L5
IPP et IPD	
Hallux : adduction	S1

Echelle de déficience ASIA

A = Complet : aucune sensibilité ou motricité dans le territoire S4-S5.

B = Incomplet sensitif : la sensibilité mais pas la motricité est préservée au dessous du niveau lésionnel, en particulier dans le territoire S4-S5.

C = Incomplet moteur : la motricité est préservée au dessous du niveau lésionnel et plus de la moitié des muscles testés au dessous de ce niveau a un score < 3 (motricité non fonctionnelle).

D = Incomplet moteur : la motricité est préservée au dessous du niveau lésionnel et au moins la moitié des muscles testés au dessous de ce niveau a un score ≥ 3.

E = Normal : la sensibilité et la motricité sont normales. Il peut persister des anomalies des réflexes.



Etapes de la classification

- Déterminer les niveaux sensitifs pour les côtés droit et gauche.
Le niveau sensitif est le dernier dermatome sain pour la piqure et le toucher.
- Déterminer les niveaux moteurs pour les côtés droit et gauche.
Défini par le dernier muscle clé côté > 3, à condition que les muscles sus-jacents soient considérés intacts.
Note : dans les régions où il n'y a pas de myotome à tester, le niveau moteur est présumé être le même que le niveau sensoriel, si la fonction motrice testable au dessus de ce niveau est également normale.
- Déterminer le niveau lésionnel
Il s'agit de la partie la plus distale avec sensibilité intacte et force musculaire antigravitaire (R-3), pourvu qu'il y ait au-dessus respectivement une fonction normale. Le niveau lésionnel est la plus proximale des niveaux sensoriels et moteurs déterminés dans les étapes 1 et 2.
- Déterminer si la lésion est complète ou incomplète.
(c'est à dire l'absence ou la présence d'épargne sacrée)
Si la contraction anale volontaire = Non ET tous scores sensitifs S4-S5 = 0 ET la pression anale profonde = Non, alors la lésion est considérée comme **Complète**. Sinon, la lésion est **Incomplète**.
- Déterminer le score de déficience ASIA.
Est-ce une lésion complète ? Si OUI, ASIA = A et noter la zone de préservation partielle (dernier dermatome ou myotome de chaque côté avec une préservation)
NON
Est-ce une lésion motrice complète ? Si OUI, ASIA = B (Non = contraction anale volontaire OU présence d'une fonction motrice sur plus de trois niveaux au-dessous du niveau moteur sur un côté donné, si le patient a une classification sensitive incomplète)
NON
Y a-t-il au moins la moitié (moitié ou plus) des muscles clés en dessous du niveau neurologique lésionnel classé 3 ou mieux ?
NON → ASIA = C
OUI → ASIA = D
Si la sensation et la fonction motrice sont normales dans tous les segments, alors ASIA = E (si ATCO lésion documentée)

INTERNATIONAL STANDARDS FOR NEUROLOGICAL CLASSIFICATION OF SPINAL CORD INJURY (ISNCSCI)

The International Spinal Cord Society

ASSOCIATION FRANÇAISE DES NEUROLOGES

Nom du patient _____ Date / heure de l'examen _____

Nom de l'examineur _____ Signature _____

DROITE

MUSCLES CLÉS	SENSITIF	
	Toucher (LTD)	Piqure (PPD)
C2		
C3		
C4		
C5		
C6		
C7		
C8		
T1		
T2		
T3		
T4		
T5		
T6		
T7		
T8		
T9		
T10		
T11		
T12		
L1		
L2		
L3		
L4		
L5		
S1		
S2		
S3		
S4-5		

SCORES MOTEURS
MSD (25) + MSG (25) = MS TOTAL (50)
MID (25) + MIG (25) = MI TOTAL (50)
LTD (56) + LTG (56) = LT TOTAL (112)
PPD (56) + PPG (56) = PP TOTAL (112)

SCORES SENSITIFS
LTD (56) + LTG (56) = LT TOTAL (112)
PPD (56) + PPG (56) = PP TOTAL (112)

NIVEAUX NEUROLOGIQUES
1. SENSITIF D G
2. MOTEUR D G
3. NIVEAU LÉSIONNEL
4. COMPLETE OU INCOMPLETE
5. SCORE DE DEFICIENCE ASIA (AIS)

ZONE DE PRESERVATION PARTIELLE
SENSITIVE D G
MOTRICE D G

GAUCHE

MUSCLES CLÉS	SENSITIF	
	Toucher (LTG)	Piqure (PPG)
C2		
C3		
C4		
C5		
C6		
C7		
C8		
T1		
T2		
T3		
T4		
T5		
T6		
T7		
T8		
T9		
T10		
T11		
T12		
L1		
L2		
L3		
L4		
L5		
S1		
S2		
S3		
S4-5		

SCORES MOTEURS
MSG (25) + MIG (25) = MG TOTAL (50)
LTD (56) + LTG (56) = LT TOTAL (112)
PPD (56) + PPG (56) = PP TOTAL (112)

SCORES SENSITIFS
LTD (56) + LTG (56) = LT TOTAL (112)
PPD (56) + PPG (56) = PP TOTAL (112)

NIVEAUX NEUROLOGIQUES
1. SENSITIF D G
2. MOTEUR D G
3. NIVEAU LÉSIONNEL
4. COMPLETE OU INCOMPLETE
5. SCORE DE DEFICIENCE ASIA (AIS)

ZONE DE PRESERVATION PARTIELLE
SENSITIVE D G
MOTRICE D G

Ce formulaire peut être copié librement, mais ne peut pas être modifié dans la permission de l'American Spinal cord Injury Association. Rédigé et révisé par C. Crocy, 2018.

Annexe n°4 : Les exosquelettes Indego®, Atalante® et HAL®

L'exosquelette Indego® a été approuvé par la FDA pour les patients avec une lésion médullaire de C7 à L5. Avec son poids très léger et ses formes fines, il a l'avantage d'être fonctionnel au quotidien. Il permet de pouvoir s'asseoir sur des chaises sans avoir à le retirer.



Figure 7 : Exosquelette Indego®, image tirée de <https://orthexo.de/fr/exosquelettes/reha-und-hilfsmittel/indego-exo/>

L'Atalante® est le premier exosquelette avec auto-équilibre reconnu par la FDA pour les patients blessés médullaire de T5 à L5. Cet appareil n'a donc pas besoin d'aide pour tenir le patient debout et pour avancer. Il est pourvu de 12 degrés de libertés, permettant ainsi une stabilisation et une possibilité plus importante de mouvements spécifiques (Gurriet, 2018).



Figure 8 : Exosquelette Atalante®, images tirées de <https://exoskeletonreport.com/product/atalante/>

L'exosquelette Hybrid Assistive Limb (HAL®) se distingue par sa fonction myoélectrique. Les fonctions musculaires résiduelles sont détectées par cette fonction pour ainsi permettre le mouvement de l'exosquelette. Celui-ci répond donc aux mouvements volontaires des membres inférieurs des patients (Jansen, 2018).



Figure 9 : Exosquelette HAL : Illustration tirée d'HAL, l'exosquelette qui décuple la force des patients. (2021). Adresse URL: <https://www.chu-lyon.fr/hal-lexosquelette-qui-decuple-la-force-des-patients>

Annexe n°5 : Caractéristiques des différents exosquelettes

Exosquelette	Lésion	Poids	Prix
Atalante®	T5 à L5	80 kg	220 000 €
Ekso®	C7 à T3	13 kg	150 000 €
HAL®	C7 à L5	23 kg	219 000 €
Indego®	C5 à L5	11.8 kg	170 000 €
Lokomat®	C7 à L5	1000kg	170 000 €
Rewalk®	C7 à L5	30 kg	77 000 €

Annexe n °6 : Equations de recherche Pubmed et Embase

Pubmed :

("Exoskeleton Device"[MeSH Terms] OR "exoskeleton"[Title/Abstract]) AND ("Spinal Cord Injuries"[MeSH Terms] OR "cord injur*"[Title/Abstract] OR "quadruplegi*"[Title/Abstract] OR "paraplegi*"[Title/Abstract])

Embase :

((((paraplegia/exp OR 'paraparesis' OR 'paraplegia' OR 'paraplegic' OR 'paraplegic patient') OR ('spinal cord injury'/exp OR 'injury, spinal cord' OR 'spinal cord injuries' OR 'spinal cord injury' OR 'spinal cord trauma' OR 'trauma, spinal cord')) AND (exoskeleton/exp OR 'exoskeleton') AND (physiotherapy/br OR 'physical therapy' OR 'physical therapy (speciality)' OR 'physical therapy (specialty)' OR 'physical therapy modalities' OR 'physical therapy service' OR 'physical therapy speciality' OR 'physical therapy specialty' OR 'physical therapy techniques' OR 'physical treatment' OR 'physio therapy' OR 'physiotherapy' OR 'physiotherapy department' OR 'therapy, physical')) AND [2018-2022]/py

9 Table des illustrations

9.1 Table des tableaux

Tableau 1 : Les critères PICO(s)	12
Tableau 2 : Critères d'inclusion et d'exclusion	12
Tableau 3 : Caractéristiques des études et des participants	22
Tableau 4 : Table reprenant le type d'exosquelette, le type de traitement (fréquence, durée...) et les paramètres mesurés dans les différentes études	24
Tableau 5 : Extraction des données	28
Tableau 6 : Synthèse des résultats selon le modèle de la CIF	31

9.2 Table des figures

Figure 1 : Exosquelette Rewalk® (Kim, 2021) – Illustration tirée de https://exoskeletonreport.com/product/rewalk/	3
Figure 2 : Exosquelette Ekso® - Illustration tirée https://exoskeletonreport.com/2015/08/ekso-bionics-company-profile/	4
Figure 3 : Photos exosquelette Lokomat® issues fiche technique via https://www.medimex.fr/wp-content/uploads/2023/02/Fiche-produit-Lokomat-Medimex-08-2022.pdf	5
Figure 4 : Interactions entre les composantes de la CIF via (Cuenot, 2017)	6
Figure 5 : Organigramme Prisma 2020 - Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ 2021 ;372:n71. doi: 10.1136/bmj.n71	13
Figure 6 : Résumé des améliorations sur les différents domaines de la CIF.....	37
Figure 7 : Exosquelette Indego®, image tirée de https://orthexo.de/fr/exosquelettes/reha-und-hilfsmittel/indego-exo/	48
Figure 8 : Exosquelette Atalante®, images tirées de https://exoskeletonreport.com/product/atalante/	48
Figure 9 : Exosquelette HAL : Illustration tirée d'HAL, l'exosquelette qui décuple la force des patients. (2021). Adresse URL: https://www.chu-lyon.fr/hal-lexosquelette-qui-decuple-la-force-des-patients	49

Résumé du mémoire :

Introduction

La lésion médullaire est une atteinte de la moelle épinière, souvent associée à une altération de la vie et une atteinte des différents aspects bio-psycho-sociaux. Au cours de ces dernières années, a émergé une nouvelle technologie permettant de traiter cette pathologie : les exosquelettes. Les objectifs de cette revue narrative étaient d'actualiser les données issues du mémoire de (Quiryne & Grilli, 2017) tout en évaluant l'efficacité de l'exosquelette chez l'adulte blessé médullaire selon le modèle de la CIF.

Méthode

Cette revue de littérature a utilisé 22 articles, réunissant un total de 390 participants atteints de lésions médullaires.

Résultats

Grâce à l'exosquelette, les différents domaines de la CIF étudiés révèlent une amélioration chez les patients. Le domaine des fonctions organiques, structures anatomiques et déficiences montrent une amélioration des fonctions émotionnelles, cardio-vasculaires et respiratoires. Il y a également une diminution de la douleur, de la spasticité. Dans l'activité, la marche et l'équilibre se sont améliorés. La participation et les facteurs environnementaux montrent une progression chez les patients, notamment dans les activités du quotidien.

Conclusion

Cette revue a permis de mettre en évidence les conséquences de l'usage des exosquelettes dans le traitement du patient blessé médullaire selon le modèle de la CIF. Les données comparées avec le mémoire de (Quiryne & Grilli, 2017) sont similaires.